

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA Y GESTIÓN
DE LAS EXPLOTACIONES E INDUSTRIAS FORESTALES

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES



**CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE
REPOBLACIONES DE *Pinus radiata* D.Don EN LA
PROVINCIA DE GUIPÚZCOA (PAÍS VASCO)**

TESIS DOCTORAL

D. Luis Mario CHAUCHARD BADANO
Ingeniero de Montes

DIRECTOR:
D. Antonio PRIETO RODRÍGUEZ
Doctor Ingeniero de Montes

2000

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid,
el día de del

Presidente	D.
Vocal	D.
Vocal	D.
Vocal	D.
Secretario	D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de del
2001 en

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento en primer lugar y por un lado a la hospitalidad y apoyo que he recibido en España y por el otro a mi familia; ambos han sido los puntales para el logro de estos estudios.

Pero la posibilidad que he tenido, se inicia con los respaldos que me han otorgado las autoridades y compañeros del Asentamiento Universitario San Martín de los Andes, Universidad Nacional del Comahue y de la Administración de Parques Nacionales de mi país. Esta empresa comienza a concretarse justamente en estas Instituciones.

A mi Director Antonio, quien depositó su confianza para entregarme la continuidad del proyecto de investigación y los datos que con esmero y esfuerzo recopiló durante los últimos años en la Provincia de Guipúzcoa. Sus enseñanzas tuvieron y tienen un gran significado para mí.

A José Antonio Sáez de Omeñaca y Luis Díaz Balteiro, con quienes he compartido interesantes trabajos y vivencias que me han ayudado a insertarme en la sociedad española, que por cierto no me ha costado mucho. Sus consejos han sido invaluable, y son quienes, junto a Antonio, se han pasado estos años corrigiendo mi español argentinizado.

En general a los integrantes del Departamento de Economía y Gestión de las Explotaciones e Industrias Forestales y en especial al Secretario del mismo, David, el cual siempre con mucha paciencia me fue explicando los procedimientos normales y los excepcionales.

En el País Vasco no he recibido más que apoyo y aliento, comenzando por la Diputación Foral de Guipúzcoa, Servicio Forestal. El respaldo recibido por Vicente Dorronsoro y Jorge Ascasibar fue determinante para poder ampliar la base de datos que se poseía de la especie y el lugar. Por ellos he conocido a gente excepcional: Javier Zabala (Pagoa), Mikel Azkarate (Ametza), Imanol Artola (Ur), Andrés Lazcano (Tejón) Adelino Rodríguez (Gavilán), Juan Zapirain (Aingira), Juan M. Zubimendi (Pottoka), Xavier Ormazabal (Hontza) y José Manuel Oria. Todos ellos me han ido acompañando en la ubicación y medición de las distintas parcelas permanentes, excepto José Manuel, quien al mando de la motosierra tuvo que estar todos los días, en todos los sitios y hasta fuera del horario laboral. Gracias.

A la gente de IKT SA en Arkaute, Álava, en particular a Daniel Sáenz, Asier Arrese, Alejandro Cantero, Santi Espinel y Tito. A partir del apoyo de Daniel, Asier me ha acompañado en las tareas de campo e inclusive se ha encargado de terminar los trabajos de apeo y medición de árboles dominantes en estaciones pobres; Alejandro y Santi me han escuchado con paciencia y finalmente a Tito quien fue el encargado de realizar todas las mediciones de las rodajas obtenidas de los árboles muestra, mediciones con las que he realizado los análisis de los crecimientos en altura.

También un capítulo aparte le debo dedicar a Ernesto Andenmatten, que siempre estuvo presto a leer críticamente los borradores y es el responsable de parte de la metodología que he decidido aplicar en esta Tesis. Con sus vínculos entre los índices de densidad considero que ha marcado un momento en el desarrollo de los modelos de predicción, siempre y cuando logre mejorar la explicación de sus ideas.

En los aspectos relacionados con la lectura crítica de los borradores, debo también agradecer especialmente a Renato Sbrancia, quien puede encontrar en el texto aquello que uno ya es incapaz de hacer.

Finalmente quisiera decir que finalizar esta Tesis me trae por un lado la alegría de llegar, espero felizmente, al final del camino, pero por otro lado siento una gran tristeza, pues podría significar la despedida, de muchas de las personas que he citado y de muchísimas más que no aparecen, pero que fueron parte de esta feliz vivencia.

RESUMEN

En los últimos años se ha manifestado una necesidad de adaptar las técnicas de predicción del crecimiento y producción a nivel de rodal. Ello se ha traducido en intentos por cambiar los esquemas tradicionales y rígidos de las tablas de producción por sistemas o simuladores que liberalizan la toma de decisiones selvícolas.

Esta tesis tiene la finalidad de desarrollar las bases de un modelo para la predicción del crecimiento y la producción de las masas de *Pinus radiata* D. Don en la provincia de Guipúzcoa, País Vasco. Los modelos se componen de funciones de transición que respetan ciertos principios biológicos y propiedades matemáticas. Además cada función fue verificada y validada, esto último cuando se contó con la muestra independiente apropiada; con ello se obtuvieron los correspondientes errores de estimación y la exactitud del modelo.

El estudio consta de tres capítulos principales, el estudio de la calidad de estación, el desarrollo de las funciones de crecimiento del rodal y por último una aplicación práctica de los resultados obtenidos.

La calidad de estación se estudió a través del crecimiento en altura dominante del rodal, empleando además la metodología del Índice de Estación o Sitio. En primer lugar, se caracterizaron los patrones de crecimiento en la altura dominante en relación a la calidad de estación. De ello resultó que en las diferentes calidades de estación, los rodales de *Pinus radiata* mostraron culminaciones del incremento corriente anual muy tempranas para luego mantener un crecimiento sensiblemente proporcionales entre las diferentes estaciones.

Se desarrolló un método independiente para la clasificación de la estación. El método se denomina del Intercepto de Crecimiento o de Intercepción y consiste en relacionar la altura dominante del rodal con el Índice de Estación a través de una función lineal simple. El mismo tuvo que ser adaptado para especies de crecimiento policíclico como el que posee *Pinus radiata* y la virtud principal es que permite clasificar la estación donde están creciendo rodales juveniles (5 a 10 años). Esto se puede considerar inédito en el país y resuelve un problema planteado por los forestales del País Vasco.

Finalmente, se construyeron dos sistemas de curvas altura dominante – edad, que se confrontaron contra los sistemas desarrollados anteriormente. A través de esta confrontación se definieron la magnitud de los errores que son posibles de cometer al no emplear la curvas adecuadas. Se encontraron diferencias superiores al 15% en la estimaciones de la altura dominante entre los diferentes sistemas.

Las funciones de crecimiento del rodal se estudiaron con la variable área basal o basimétrica como variable de respuesta. Se desarrollaron diferentes métodos de predicción. Uno emplea el vínculo o relación entre dos índices de densidad, la Densidad Relativa de Curtis (1982) y el Factor de Altura de Andenmatten *et al.* (1997). El otro consiste en dos ecuaciones diferenciales de crecimiento que se diferencian entre sí en la variable conductora asociada con el tiempo que emplean. Mientras una usa la variable edad, al estilo tradicional, la otra se basa en la teoría del espacio de los estados y emplea la variable de estado altura dominante.

Los modelos fueron verificados con los datos de las parcelas permanentes. Se confrontaron las salidas de los modelos con la evolución real del área basal, registrada en dichas parcelas. Todos tuvieron una precisión más que aceptable, con errores que variaron entre el 6 y 8%.

La aplicación práctica consiste en unas nuevas tablas de producción para la especie. Se propone un cambio innovador en el funcionamiento de una tabla. Se podría considerar que se han logrado una mejora en las típicas tablas de selvicultura variable (3^{ra} generación) y de selvicultura a la carta (4^{ta} generación). Las mismas deben considerarse como provisionales dado que las funciones de volumen que incluyen son preliminares pues su perfeccionamiento escapan a los objetivos de la tesis.

SUMMARY

Since recent years there is the need to improve the stand growth and yield prediction techniques. This gave rise to implement simulators that liberalize silvicultural decisions, instead of using traditional and rigid yield tables.

The purpose of this thesis is to develop growth and yield models for *Pinus radiata* D. Don in Guipuzcoa, Basque-Country, Spain. These models include important biological and mathematical principles. Each function was verified and validated, when the independent sample was a proper one, and it allowed to obtain an estimation error and model accuracy.

This research has three main chapters: study of site quality, develop of growth functions and practical applications of the results.

Site quality was studied through both top height growth and site index methodology. Firstly the top height patterns in relation to site index were studied. The patterns showed early height annual increment and a later proportional growth, between different site qualities.

To estimate site index the growth intercept method was adapted for polycyclic species as *Pinus radiata*. This method allowed to estimate site index in young stands (5-10 years old).

Finally two set of site quality curves were developed and they were compared with the previously developed systems. Through this comparison, the extend of errors could be defined when inadequated curves were applied. Differences over 15 percent in top height estimations among different systems were found.

The basal area was the predictable variable used in the stand's growth model. Two different prediction methods were developed. One of them uses the link or relation between two stands density indexes (STDI), Curti's Relative Density (1982) and the Height Factor (Andenmatten *et al.*, 1997).

The other one lies in two differential growth equations, which differ in the driver variable associated with the time. While one in the traditional way, uses age as a variable, the other one uses top height as a variable of state (based on the theory of states' space).

The models were verified with permanent sample plots' data. The output of the models were compared with the real basal area evolutions. All of them were quite precise, with errors around 6 and 8 percent.

The practical application consisted in the construction of new yield tables for this species. An inovative change in the functioning of the tables was proposed. I consider that an improvement of the typical variable silvicultural table (3rd generation) and in the particular silviculture table (4th generation) has been achieved. These tables should be considered as provisional ones, because they include preliminary volume functions. The improvement of these functions are beyond the objectives of this thesis.

INDICE

TABLA DE ABREVIATURAS	i
INDICE DE FIGURAS	ii
INDICE DE TABLAS	v
PROLOGO	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. SITUACIÓN DE PINO RADIATA EN EL PAÍS VASCO	3
1.2. OBJETIVOS	7
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	9
2. CALIDAD DE ESTACIÓN	11
2.1. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ESTACIÓN	11
2.1.1. Estimación del Índice de Estación	12
2.1.1.1. <i>Método del Intercepto de Crecimiento (IC)</i>	14
2.1.2. Curvas de Altura Dominante	16
2.1.2.1. <i>Curvas Anamórficas de Calidad de Estación</i>	18
2.1.2.2. <i>Curvas Polimórficas de Calidad de Estación</i>	18
2.1.3. Curvas de IE y Curvas de Altura Dominante	20
2.1.4. Fuentes de Datos	20
2.1.5. Antecedentes	22
2.1.5.1. <i>Sistemas de Curvas Altura Dominante-Edad</i>	23
2.1.5.2. <i>Referencias en España</i>	26
2.1.6. <i>Finalidad del Estudio de la Calidad de Estación</i>	29
2.2. PATRONES DE CRECIMIENTO EN ALTURA DOMINANTE	31
2.2.1. Materiales y Métodos	32
2.2.1.1. <i>Fuente y Análisis de los Datos</i>	32
2.2.1.2. <i>Los Modelos de Crecimiento</i>	32
2.2.1.3. <i>Validación</i>	35
2.2.2. Resultados y Discusión	36
2.2.2.1. <i>Variación y Representatividad de la Muestra</i>	38
2.2.2.2. <i>Patrones de Crecimiento por Calidad de Estación</i>	40
2.2.2.3. <i>Anamorfismo vs. polimorfismo</i>	49
2.2.2.4. <i>Calibración de los Modelos</i>	55
2.2.2.5. <i>Validación</i>	56
2.3. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTACIÓN. Modelos del Intercepto de Crecimiento	60
2.3.1. Material	62
2.3.2. Métodos	63
2.3.2.1. <i>Verificación</i>	65
2.3.2.2. <i>Validación</i>	66
2.3.3. Resultados	66
2.3.3.1. <i>Evaluación Temprana</i>	66
2.3.3.2. <i>Evaluación Tardía</i>	69
2.3.4. Discusión	71
2.3.5. Verificación y Validación	73
2.3.6. Curvas y Tabla de Índice de Estación	74
2.4. SISTEMAS DE CURVAS DE ALTURA DOMINANTE-EDAD	77
2.4.1. Materiales y Métodos	77
2.4.1.1. <i>Fuente de Datos</i>	77
2.4.1.2. <i>Curvas Altura-Edad</i>	79
2.4.1.3. <i>Validación</i>	80
2.4.1.4. <i>Comparación con Anteriores Curvas de Calidad de Estación</i>	81
2.4.2. Resultados y Discusión	81
2.4.2.1. <i>Validación</i>	83
2.4.2.2. <i>Comparación con Anteriores Curvas de Calidad de Estación</i>	84

3. CRECIMIENTO A NIVEL DE RODAL	88
3.1. INTRODUCCIÓN	88
3.2. CONCEPTOS SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL RODAL	88
3.3. MODELIZACIÓN	91
3.4. MODELOS A NIVEL DE RODAL: CRECIMIENTO EN ÁREA BASAL	93
3.4.1. Modelos Empíricos	97
3.4.2. Modelos Biológicos	100
3.5. LA APROXIMACIÓN A LA TEORÍA DEL ESPACIO DE LOS ESTADOS	103
3.6. ÍNDICES DE DENSIDAD (ID)	105
3.6.1. Índice de Densidad del Rodal (IDR)	107
3.6.2. Factor de Espaciamiento (FE)	108
3.6.3. Densidad Relativa (DR)	109
3.6.4. Vínculos entre Variables e Índices	109
3.7. CRECIMIENTO DE RODALES SIN INTERVENCIÓN	114
3.8. ANTECEDENTES EN ESPAÑA	114
3.9. MATERIALES Y MÉTODOS	120
3.9.1. Fuente de Datos	120
3.9.2. Vínculos entre las variables de Estado e Índices de Densidad del Rodal	120
3.9.3. Crecimiento de Rodales Sin Intervenciones	121
3.9.4. Crecimiento de Rodales Intervenido	124
3.9.5. Verificación	127
3.10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	128
3.10.1. Índice de Densidad del Rodal (IDR)	128
3.10.2. Vínculos entre las variables de Estado e Índices de Densidad del Rodal	130
3.10.3. Crecimiento de Rodales sin Intervención	136
3.10.4. Crecimiento de Rodales Intervenido	142
4. CONCLUSIONES	149
5. BIBLIOGRAFÍA	153
ANEXO I. TABLAS DE PRODUCCIÓN: APLICACIÓN PRÁCTICA	159
I. INTRODUCCIÓN A LAS TABLAS DE PRODUCCIÓN PROVISORIAS DE <i>Pinus radiata</i>	159
I.1. Procedimiento	163
I.1.1. Tabla de Producción de Selvicultura Variable (Mejora de la 3 ^{ra} generación)	163
I.1.2. Tabla de Producción a la Carta (4 ^{ta} generación)	164
ANEXO II. DATOS DE LAS PARCELAS PERMANENTES	171

TABLA DE ABREVIATURAS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
<i>D_g</i>	Diámetro cuadrático medio	cm
<i>DR</i>	Densidad Relativa (Curtis). Índice de Densidad	No aplica
<i>e</i>	Espaciamiento medio	m
<i>EAM</i>	Error Absoluto Medio	Según variable
<i>EAM%</i>	EAM relativo	%
<i>EEE</i>	Error Estándar de la Estimación	Según variable
<i>EM</i>	Error o sesgo de la muestra	Según variable
<i>EM%</i>	EM relativo	%
<i>F</i>	Factor de proporcionalidad (Andenmatten <i>et al.</i> 1997)	No aplica
<i>FE</i>	Factor de Espaciamiento (Hart-Becking). Índice de Densidad	%
<i>FH</i>	Factor de Altura (Andenmatten <i>et al.</i> , 1997)	No aplica
<i>G</i>	Área basal o basimétrica	m ² /ha
<i>h</i>	Altura del árbol dominante	m
<i>H_m</i>	Altura media	m
<i>H_o</i>	Altura dominante promedio del rodal	m
<i>IC</i>	Intercepto del Crecimiento	m
<i>IDR</i>	Índice de Densidad del Rodal (Reineke, 1933). Índice de Densidad	Pies/ha
<i>IE</i>	Índice de Estación o de Sitio	m
<i>IE₂₅</i>	IE a la edad base de 25 años	m
<i>N</i>	Número de pies por hectárea	Pies/ha
<i>t</i>	Edad	Años
<i>est</i>	Valor estimado de la variable	Según variable
<i>obs</i>	Valor observado de la variable	Según variable

INDICE DE FIGURAS

- Fig.1.1: Ubicación del País Vasco dentro de España y de la provincia de Guipúzcoa dentro de la Comunidad Autónoma.
- Fig.2.1: Método tradicional con un intercepto de cinco años por encima del 1,3 metros.
- Fig.2.2: Visión general de las curvas de crecimiento reales de los árboles muestra (trazo discontinuo) y los ajustes para cada parcela a través de la función 1.
- Fig.2.3: Ajuste de una función recíproca entre el parámetro A y el IE_{25} (valores promedios por parcela).
- Fig.2.4: Ajuste de la ecuación de la recta entre el parámetro k y el IE_{25} . La línea discontinua indica el valor promedio del parámetro.
- Fig.2.5: Ajuste de una función entre el parámetro c y el IE_{25} . La línea discontinua indica el valor promedio del parámetro.
- Fig.2.6: Ajuste lineal entre los parámetros $c - A$ de la función 2.1.
- Fig.2.7: Ajuste lineal entre los parámetros $k - c$ de la función 2.1.
- Fig.2.8: Ajuste lineal entre los parámetros $k - A$ de la función 2.1.
- Fig.2.9: Vista general de las curvas de Incremento Corriente Anual (ICA) en altura dominante para las parcelas estudiadas.
- Fig.2.10: Valores de Alturas dominantes observados y estimados por la función Bertalanffy-Richards de siete parámetros.
- Fig.2.11: Valores de Alturas dominantes observados y estimados por la función Bertalanffy-Richards de cinco parámetros.
- Fig.2.12: Valores de Alturas dominantes observados y estimados por la función Bertalanffy-Richards de cuatro parámetros.
- Fig.2.13: Comparación de las curvas anamórficas y polimórficas para los IE_{25} de 20, 24 y 28 metros.
- Fig.2.14: Diferencias en las alturas dominantes estimadas entre un sistema anamórfico y otro polimórfico.
- Fig.2.15: Relación ente los valores de los parámetros $k - A$ de la función 2.9.
- Fig.2.16: Cuatro confrontaciones gráficas entre las series reales de crecimiento (obs.) y las curvas anamórficas (Ana) y polimórficas (Poli) correspondientes. B47, S20, B5, S14 son las denominaciones de las parcelas.
- Fig.2.17: Evaluación temprana: ajustes dela función 2.24 para las edades de 5, 7 y 9 años.
- Fig.2.18: Evaluación temprana: dispersión de los residuos para los ajustes de las edades 5 y 9 años.
- Fig.2.19: Evaluación temprana: dispersión de los valores de los parámetros vs. las edades y las líneas ajustadas a cada una.
- Fig.2.20: Evaluación tardía: ajustes dela función 2.15 para las edades de 11, 20, 31 y 40 años.
- Fig.2.21: Evaluación tardía: dispersión de los residuos para los ajustes de las edades 20 y 31 años.
- Fig.2.22: Evaluación tardía: dispersión de los valores de los parámetros vs. las edades y las líneas ajustadas a cada una.

- Fig.2.23: Comparación del IE_{25} observado en cuatro parcelas permanentes (curva de crecimiento en altura dominante en línea continua) con los IE_{25} estimados para los tres momentos de medición.
- Fig.2.24: Curvas de IE_{25} para la evaluación temprana y tardía de la calidad de estación.
- Fig.2.25: Vista general de cinco curvas anamórficas de altura dominante-edad ajustadas (línea discontinua) con los grupos de datos provenientes de las parcelas permanentes y los análisis troncales.
- Fig.2.26: Superposición de cinco curvas anamórficas con los datos provenientes del Inventario Forestal Nacional.
- Fig.2.27: Datos observados y estimados de las alturas dominantes en las parcelas permanentes.
- Fig.2.28: Comparación de las curvas de Espinel *et al.* (1997) (línea discontinua) con las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas).
- Fig.2.29: Comparación de las curvas de Madrigal *et al.* (1975) (línea discontinua) con las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas).
- Fig.2.30: Proyecciones de las curvas de Espinel *et al.* (1997) (línea discontinua) y de las curvas anamórficas ajustadas (línea continua) a partir de las mismas alturas dominantes a los diez años y para tres calidades de estación.
- Fig.2.31: Proyecciones de las curvas de Madrigal *et al.* (1975) (línea discontinua) y de las curvas anamórficas ajustadas (línea continua) a partir de las mismas alturas dominantes a los diez años y para tres calidades de estación.
- Fig. 1: Cuatro regímenes de manejo empleando un Diagrama de Manejo de la Densidad – en función del IDR – para plantaciones de *Pinus ponderosa* en Patagonia, Argentina. Raleo=Clara. Fuente: Gonda & Cortés (1999).
- Fig.2: Evoluciones de DR y FE en la figura (a) y DR y FH en la figura (b).
- Fig.3.1: Diagrama de flujo del proceso de simulación del crecimiento de un rodal sin intervenciones.
- Fig.3.2: Datos $N-D_g$ provenientes de 601 parcelas del *IFN* (círculo), 38 parcelas permanentes con remedaciones (cruz) y las tablas de producción normales de Echeverría (1942) (triángulo). La línea representa la máxima densidad con la pendiente hallada de $-1,57$.
- Fig.3.3: Relación entre los valores de PG observados y estimados por la función 3.9.
- Fig.3.4: Relación entre los valores de DR observados y estimados por la función 3.10.
- Fig.3.5: Relación entre los valores de DR observados y estimados por la función 3.11.
- Fig.3.6: Evolución y dispersión de dos relaciones entre los índices DR y FH , una directa (DR/FH) en la figura (a) y la otra logarítmica ($\ln DR/\ln FH$) en la figura (b).
- Fig.3.7: Simulación del descenso del número de árboles por mortalidad natural como consecuencia de la competencia y para cuatro calidades de estación.
- Fig.3.8: Simulación del crecimiento en área basal del rodal, para cuatro calidades de estación.
- Fig.3.9: Evolución entre el área basal y la altura dominante para las cuatro calidades de estación estudiadas.
- Fig.3.10: Superposición de las cuatro curvas de crecimiento simuladas en área basal para rodales sin tratamientos y las series de crecimientos acumulados de las parcelas permanentes.
- Fig.3.11: Datos de las áreas basales observadas y estimadas por el modelos de predicción I, para cada parcela permanente.

- Fig.3.12: Datos de las áreas basales observadas y estimadas por el modelos de predicción II, para cada parcela permanente.
- Fig.3.13: Proyección de las áreas basales por la función 3.16 para diferentes áreas basales de partida (4, 9, 15 y 21 m²/ha).
- Fig.3.14: Proyección de las áreas basales por la función 3.18 para diferentes áreas basales de partida (8, 15 y 23 m²/ha).
- Fig.3.15: Proyección de las áreas basales por la función 3.13 para diferentes densidades iniciales (1.000, 2.000 y 3.000 árb/ha).

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1: Superficies ocupadas por *Pinus radiata* en España – fuente *I.F.N.* y Gobierno Vasco, 1996 -.
- Tabla 1.2: Superficies arboladas en hectáreas y su relación con la de *Pinus radiata* en el País Vasco (fuente *I.F.N.* Y Gobierno Vasco).
- Tabla 1.3: Estadísticas principales de la superficie repoblada, la producción y el consumo de *Pinus radiata* en un trienio.
- Tabla 2.1: Parámetros y estadísticos de los ajustes individuales de la función 2.1 y los correspondiente IE_{25} . PNº: parcela número; ANº: árbol número.
- Tabla 2.2: Parámetros y estadísticos de los ajustes por parcela de la función 2.1 y los correspondientes IE_{25} .
- Tabla 2.3: Análisis de la varianza (*ANAVA*) del IE_{25} dentro y entre parcelas.
- Tabla 2.4: Test de los rangos múltiples. Las equis (X) alineadas indican similar calidad de estación.
- Tabla 2.5: Matriz de correlaciones entre los parámetros obtenidos de los ajustes de la función 2.1.
- Tabla 2.6: Edades de culminación y los valores absolutos de los Incrementos Corrientes Anuales (ICA) en altura dominante en cada parcela.
- Tabla 2.7: Alturas dominantes que se predicen a los 40 años con las curvas polimórficas.
- Tabla 2.8: Errores medios absolutos obtenidos al confrontar las series reales de crecimiento (Madrigal *et al.* (1975)) con las funciones calibradas 2.9 y 2.10.
- Tabla 2.9: Grupos de datos altura dominante – IE_{25} para cada edad particular, empleados para los ajustes.
- Tabla 2.10: Evaluación temprana: parámetros de los ajustes de la función 2.24 aplicada a cada edad y sus estadísticos.
- Tabla 2.11: Evaluación tardía: parámetros de los ajustes de la función 2.15 aplicada a cada edad y sus estadísticos.
- Tabla 2.12: Errores absolutos y relativos de la verificación.
- Tabla 2.13: Tabla para la estimación temprana y tardía del IE_{25} para *Pinus radiata*.
- Tabla 2.14: Estadísticas globales de las parcelas permanentes para cada año de medición. D_g : diámetro promedio cuadrático.
- Tabla 2.15: Parámetros de los ajustes de la función 2.31 para dos grupos de datos distintos.
- Tabla 2.16: Estadísticos productos de la confrontación entre las alturas medidas y las estimadas por ambos sistemas de curvas.
- Tabla 2.17: Diferencias porcentuales entre las estimaciones de los IE_{25} empleando las diferentes curvas altura dominante – edad existentes.
- Tabla 1: Variables que integran tres índices de densidad del rodal: *IDR*, Índice de Densidad del Rodal; *FE*, Factor de Espaciamiento y *DR*, Densidad Relativa.
- Tabla 3.1: Resultados de la simulación para rodales no tratados creciendo en cuatro calidades de estación. Para la proyección de la *DR* se empleó la función 3.10.
- Tabla 3.2: Parámetros obtenidos del ajuste de la función 3.2 a las cuatro curvas de crecimiento en área basal de los rodales sin intervención de claras.

- Tabla 3.3: Parámetros y estadísticos de los ajustes de la función 3.2 del crecimiento del área basal, para aquellas parcelas permanentes medidas tres veces. Parámetro $c = 3,45899$.
- Tabla 3.4: Estadísticos resultantes de la predicción del área basal al final de período, empleando las mediciones de las parcelas permanentes y la función 3.16 como predictora.
- Tabla 3.5: Estadísticos resultantes de la predicción del área basal al final de período, empleando las mediciones de las parcelas permanentes y la función 3.18 como predictora.
- Tabla 3.6: Estadísticos resultantes de aplicar las funciones de transición 3.12 y 3.13. La primera columna de cada función corresponde al empleo de la altura dominante final observada, mientras que la segunda corresponde al empleo de la correspondiente estimada por una función.

PROLOGO

No es una tesis amigable. Posiblemente para la gran mayoría de sus lectores este no sea un texto atractivo, quizás por el tema, tal vez por el estilo de la redacción o por la cantidad de detalles que aparecen. Muchos al leer esta tesis se sentirán como recorriendo un árbol, frondoso y que a veces parece por la cantidad de ramificaciones, que ha crecido aislado. Pero la realidad es que hubo un ápice común a todas ellas, el Objetivo General, el que se alcanza en las páginas finales y que espero trascienda a esta tesis.

Pero hubo un motivo que me ha llevado a esta tesis algo barroca. Después de leer muchos trabajos y pretender resolver los problemas que se me iban presentando, difícilmente encontraba ciertos detalles que constituirían la llave para lograrlo. De manera que todo aquello que considero he logrado resolver, lo he tratado de volcar con el mayor detalle posible. He preferido profundizar en ello que en extensas hojas refiriéndome a la historia y características del lugar de estudio.

Pero de lo que estoy seguro es que para aquellos que decidan incursionar en estos mismos problemas, encontrarán aquí lo que difícilmente encuentren en la mayoría de los trabajos. Y seguramente ello les permitirá ampliar y superar lo aquí presentado.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha manifestado una necesidad de adaptar las técnicas de predicción del crecimiento y producción a escala o nivel de rodal. Ello se ha traducido en intentos por cambiar los esquemas tradicionales y rígidos propios de las tablas de producción, por sistemas o simuladores que flexibilizan la toma de decisiones selvícolas.

A pesar de ello, tales sistemas todavía trabajan con algunos de sus componentes al estilo tradicional. Así por ejemplo, algunos estudios referidos a los modelos de predicción comienzan con el supuesto de anamorfismo de las curvas de calidad de estación y en muchas situaciones los componentes o subsistemas -relaciones fundamentales- no son debidamente validados. Algunos simuladores se publican sin informar sobre las funciones que los componen, o emplean funciones que violan una o varias de las propiedades -consistencia y composición- que deben poseer las mismas y hasta los principios selvícolas sobre los que deben trabajar. En estos últimos casos el conflicto puede ser más grande que en una tabla numérica, puesto que las alternativas de tratamientos de claras que posee el técnico a través del simulador son ilimitadas y los errores se tornan impredecibles.

Esta tesis está enfocada a ajustar los componentes principales de un modelo para la predicción del crecimiento y la producción de rodales de *Pinus radiata* que se localizan en la provincia de Guipúzcoa, País Vasco, España (Fig. 1.1). Se ha originado a partir de un proyecto de investigación existente entre la Diputación Foral de Guipúzcoa y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid y del que es Director el Dr. Ingeniero de Montes Antonio Prieto Rodríguez. La finalidad del acuerdo es proveer al propietario y al gestor de una serie de herramientas que les ayude en la toma de decisiones selvícolas, económicas y financieras en cada momento de la vida de la masa.

En la tesis se aborda el modelado del crecimiento intentando justificar los comportamientos de las distintas variables del rodal y validando cada componente, dentro de las limitaciones impuestas por la base de datos disponible. A través de la revisión de la literatura recopilada se intenta discutir sobre la metodología empleada hasta la fecha y proponer sobre la base de ello un sistema de predicción que, primordialmente sea consistente, tanto desde el punto de vista matemático como biológico, y además, de exactitud probada.

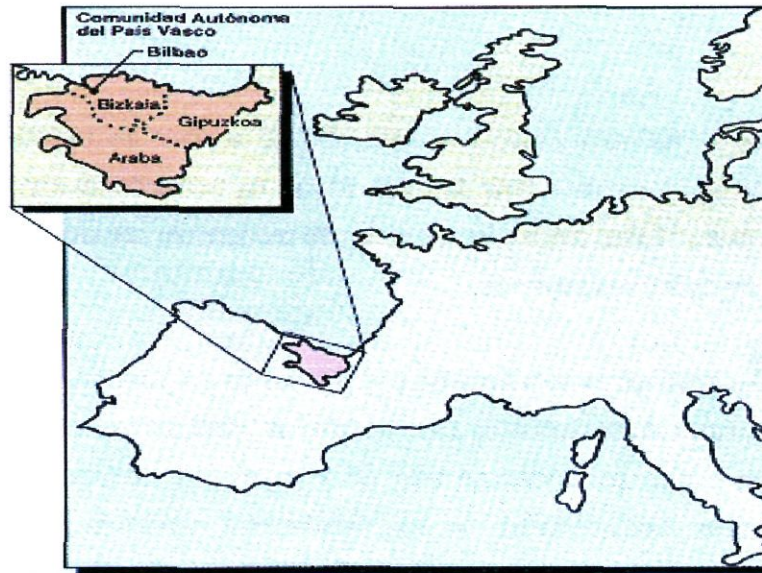


Figura 1.1: *Ubicación del País Vasco dentro de España y de la Provincia de Guipúzcoa dentro de la Comunidad Autónoma.*

Por lo tanto al modelar el crecimiento hubieron varios aspectos sumamente importantes que se han cuidado:

- a) El cumplimiento de principios básicos como el de producción final común para un rodal creciendo en una misma estación e independiente de la densidad inicial. Esta ley biológica no es cumplida por muchos modelos de crecimiento; ya sea que se utilicen funciones de transición locales o globales; al no cumplirse dicha ley, la producción final de un rodal en una estación dada, dependerá de la densidad de partida.
- b) La compatibilidad y propiedades de los mismos. Ambos conceptos se refieren a la coherencia y eficiencia del modelo. La compatibilidad es la que debe existir entre las formas integrales y diferenciales de la función. Mientras que las propiedades más importantes que el modelo debe cumplir se refieren a que cuando el tiempo transcurrido es nulo, el estado final es igual al inicial y a que desde un estado inicial dado se arribará a un mismo estado final, sin importar las etapas de predicción que se demanden.

Sin pretender abarcar todos los sistemas de predicción del crecimiento en área basal, se ha incursionado en dos sistemas bien diferentes, de los cuales uno se desarrolló con dos variantes. Como parte de la evaluación y selección se analizó la precisión y las cualidades, arriba mencionadas, que poseen.

1.1. SITUACIÓN DE PINO RADIATA EN EL PAÍS VASCO

La Comunidad Autónoma del País Vasco o *Euskadi* está situado en el norte de España, en el litoral del golfo de Vizcaya. Posee un superficie de 726.100 ha, y su capital es Vitoria-Gasteiz. Consta de tres provincias, Álava con 304.700 ha, Vizcaya con 221.700 ha y Guipúzcoa que ocupa 199.700 ha (Espasa, 1985).

La mayor parte del territorio se halla ocupada por los montes Vascos, que forman una zona de transición entre la cordillera Cantábrica al oeste y los Pirineos al este.

El nordeste presenta un clima de tipo atlántico, con precipitaciones regulares e intensas. En las regiones montañosas del interior el clima se hace más continental, con temperaturas extremas.

La labor repobladora en los montes vascos ha pasado desde un 20 % en los comienzos del siglo XX a cerca del 60% de la superficie cubierta de árboles. En las provincias de Vizcaya y Guipúzcoa, cerca del 80% de estas tierras forestales pertenecen a propietarios privados. De todo ello *Pinus radiata* es la especie mayoritaria y por lo tanto es la especie representativa del mercado del sector forestal para la producción de madera en el País Vasco (Otazúa, 1998).

De acuerdo con el II Inventario Forestal Nacional la superficie ocupada por *Pinus radiata* en España es de cerca de 240.000 ha (Tabla 1.1), que la convierte en la tercera especie productora de madera del país. En el País Vasco, su superficie es de aproximadamente 150 mil hectáreas, distribuidas en sus Provincias de la siguiente manera: Álava 15.500 ha, Guipúzcoa 55.000 ha y Vizcaya 80.000 ha, con un volumen en pie de 26,7 millones de metros cúbicos.

Tabla 1.1: Superficies ocupadas por *Pinus radiata* en España (Fuente Inventario Forestal Nacional y Gobierno Vasco, 1996).

ZONA GEOGRAFICA	SUPERFICIE (ha)
País Vasco	150.199
Álava	15.678
Guipúzcoa	54.795
Vizcaya	79.726
Cantabria	14.962
Asturias	26.027
Galicia	44.967
La Coruña	18.271
Lugo	10.599
Orense	12.897
Pontevedra	3.200
Canarias	3.733
Las Palmas	1.309
S. C. Tenerife	2.424

Del Tabla 1.2 se desprende que aproximadamente la mitad de la superficie de la Comunidad es arbolada, mientras que un 38.5% se encuentra ocupada por *Pinus radiata*.

Tabla 1.2: Superficies arboladas en hectáreas y su relación con las de *Pinus radiata*, en el País Vasco (Fuente I.F.N. y Gobierno Vasco, 1996).

AÑO 1996	ÁLAVA	VIZCAYA	GUIPÚZCOA	TOTAL
	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
<i>Pinus radiata</i>	15.678 [11%]	79.726 [62%]	54.795 [46%]	150.199 [38,5%]
Total arbolado	143.503 [47%]	128.245 [58%]	118.251 [59%]	389.999 [54%]
Superficie total	304.700	221.700	199.700	726.100

El carácter productivo del monte del País Vasco fundamenta la existencia de una importante industria forestal formada por un centenar de industrias de aserrío, que en su mayoría se han modernizado en los últimos diez años (Ascasibar, 1997).

El minifundismo forestal existente provoca que, en general, los propietarios realicen una selvicultura poco intensiva debido a una falta de relación con la industria, así como a una ausencia de información sobre los tratamientos a seguir y las producciones que se obtendrán con su aplicación (Prieto *et al.*, 1998). Como ejemplo de ello se cita que en 1998 de los 1.922 permisos de corta dados por el Servicio Forestal de Guipúzcoa, solamente 22 poseían entre 10 y 20 ha y 11 más de 20 ha, y como contrapartida 1.527 poseían menos de dos hectáreas, el resto se distribuía en superficies de dos a diez hectáreas (Ascasibar, 1998-comunicación personal).

Además, si hasta hace pocos años se intentaba aplicar una gestión orientada hacia la obtención de unos productos destinados a trituración, hoy en día parece que está tomando fuerza otro tipo de manejo, dirigido a la consecución de maderas con destino a sierra, con productos intermedios que se destinan a trituración (Chauchard *et al.*, 1999a). La situación resumida obliga a los investigadores a trabajar en el perfeccionamiento de las herramientas de predicción, como lo son los modelos de crecimiento y producción.

Existe una relativa diversidad en la forma de manejo de *Pinus radiata* en el País Vasco. Esta diversidad dificulta la adopción generalizada de una selvicultura estándar para esta especie. Paralelamente la diversificación que han alcanzado los usos de la madera de esta especie ha ido provocando una revalorización de su precio y un alargamiento de su turno de corta. Así en un corto período de tiempo, se ha ido pasando de un turno de 25-30 años con destino preferentemente a la industria de trituración a otro de 30-35 años para obtener madera de sierra (Cantero *et al.*, 1995).

A pesar del cambio en el destino de la masa principal de los pinares, el sector de pasta y papel (trituration) es muy importante. Su actividad está directamente ligada a la situación a escala mundial del sector, tendiendo hacia una progresiva agrupación en grandes grupos empresariales. Estos grupos juegan un papel vital dentro de la cadena forestal, al ser los mayores consumidores de las maderas de menores diámetros, vitales para una correcta gestión del monte, aunque su implicación económica para el propietario haya perdido importancia en relación a otros productos que se obtienen al final del turno, como es la madera para sierra (Mesa Intersectorial de la Madera de Euskadi, 1997a).

La superficie poblada por *Pinus radiata* en el País Vasco se distribuye entre unos 25.000 propietarios, y da lugar a un empleo de unos 8.000 puestos de trabajo en las labores de repoblación, aprovechamiento, cuidados e industrias de primera transformación (Prieto *et al.*, 1998).

La decisión de producir madera de sierra, chapa, o de optimizar la cantidad de madera de industria implica, para la mayor parte de las masas y especialmente para las que han sido plantadas a gran densidad, la necesidad de comenzar a clarear en un plazo de tiempo relativamente breve tras su plantación. Sin embargo, el propietario duda frecuentemente si debe realizar estas cortas intermedias, sobre todo en las edades más juveniles de las masas, tanto por la dificultad de comercializar los productos que proporcionan (al ser éstos de pequeñas dimensiones), como por el hecho de falta de indicaciones técnicas para ejecutarlas.

Las operaciones selvícolas que se que se realizan en las masas de *Pinus radiata*, consisten básicamente en (Mesa Intersectorial de la Madera de Euskadi, 1997b):

- Repoblación (año 0): preparación del terreno mediante el retiro de los restos de las cortas y el desbroce a fuego. Apertura de hoyos de 40 x 40 x 40 cm y la plantación a raíz desnuda de plantas de una savia. Se suele usar un marco de 2 x 2,5 m (2.000 pies/ha) o de 2,5 x 2,5 m (1.600 pies/ha).
- Limpias (3 ó 4 primeros años): se elimina la vegetación leñosa que va a competir con la repoblación.
- Primera clara y poda baja (10 – 12 años).
- Segunda clara y poda alta (17 – 19 años).
- Tercera clara (24 – 27 años).
- Corta final (30 – 35 años): la densidad en la corta final es de unos 300 pies/ha obteniéndose unos volúmenes de 230 a 270 m³/ha.

Otazúa (1998) en un análisis de inversión de una plantación de *Pinus radiata* creciendo en una calidad media, define el siguiente régimen selvícola:

Introducción

- Primera clara: año 13 pasando de 900 a 600 pies/ha 27 m3/ha.
- Segunda clara: año 18 pasando a 450 pies/ha 37 m3/ha.
- Tercera clara: año 23 pasando a 325 pies/ha 42 m3/ha.
- Cuarta clara: año 28 pasando a 262 pies/ha 39 m3/ha.
- Corta final: año 35. 389 m3/ha.

Dando una producción total de 534 m3/ha.

Se debe destacar que en muchos montes se realizan menos intervenciones de las aquí reseñadas, a causa de su elevado coste.

Cantero (1998) realiza un análisis de las perspectivas de los pinares de radiata del País Vasco y señala que en los últimos años se ha producido un envejecimiento general de los mismos, debido a la acumulación de bosques con edades superiores a los 30 años y por una merma de los rodales con edades comprendidas entre 6 y 20 años. En virtud de ello pronostica que si se mantiene el actual ritmo de corta, se va a acentuar el descenso de las existencias maderables. Señala, de acuerdo a datos estadísticos, que 37.500 ha están ocupadas por pinares de más de 30 años representando aproximadamente el 25% de la superficie total de la especie.

En el Tabla 1.3 se puede observar la evolución entre 1995 y 1997 de la superficie repoblada, la producción y el consumo. Allí se aprecia que hay oscilaciones de algunos parámetros. En el año 1996 se dio un salto en la superficie repoblada, que con la misma intensidad bajo al año siguiente. La producción de los montes públicos muestra un marcado descenso año tras año, aunque la producción total se mantiene estable.

Tabla 1.3: *Estadísticas principales de la superficie repoblada, la producción y el consumo de Pinus radiata en un trienio.*

SUPERFICIE REPOBLADA [ha]	1995	1996	1997
Montes privados	2.112	3.140	2.047
Montes públicos	165	359	400
PRODUCCIÓN [m³]	1995	1996	1997
Montes privados	1.302.011	1.286.907	1.443.922
Montes públicos	240.816	132.329	22.973
CONSUMO [Tm]	1995	1996	1997
Madera sierra	1.151.324	1.102.053	1.250.000
Madera trituración	1.119.601	1.043.062	1.064.750

Con el tiempo va creciendo la resistencia en el País Vasco a que se repueble con especies exóticas, ello está llevando que las plantaciones de *Pinus radiata* en los montes públicos vaya en disminución y

se circunscriba a las tierras de baja calidad de estación, mientras que las plantaciones en buenas estaciones se continúan realizando en tierras privadas (Dorrnsoro, 1999).

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis consiste en el desarrollo de una metodología que permita construir la estructura principal de un modelo que, con un conocido y aceptable margen de certeza, prediga el crecimiento y la producción de las plantaciones de *Pinus radiata* (D.) Don en la Provincia de Guipúzcoa.

Los objetivos específicos planteados son los siguientes:

Relacionados con el estudio de la Calidad de Estación:

- i. Realizar una revisión sobre la metodología aplicada a la evaluación de la calidad de estación empleando la altura dominante como variable predictora de la productividad. Además de un análisis de los estudios realizados en España, con especial énfasis en *Pinus radiata*.
- ii. Caracterización de los patrones de crecimiento en altura dominante de *Pinus radiata* en diferentes calidades de estación en la Provincia de Guipúzcoa.
- iii. Determinación del grado de polimorfismo entre las diferentes calidades de estación y su relación con el Índice de Estación (*IE*).
- iv. Desarrollo de un sistema eficiente para la estimación temprana y tardía del *IE*, a los fines de clasificar la estación.
- v. Desarrollo de una familia de curvas altura dominante-edad confiables, a través de las cuales se deriven las funciones de transición del crecimiento en altura que serán empleadas posteriormente en los sistemas de predicción del crecimiento del rodal.
- vi. Comparación del sistema desarrollado con las curvas altura dominante-edad realizadas hasta la fecha para la misma especie.

Relacionados con el crecimiento en área basal:

- vii. Caracterización de los comportamientos de varios Índices de Densidad y de las hipótesis que los sustentan.

- viii. Estudio del vínculo entre los Índices de Densidad y su empleo para la simulación del crecimiento de rodales con y sin intervención de claras.
- ix. Desarrollo de uno o varios métodos de predicción del crecimiento, que sean consistentes con las propiedades matemáticas que deben poseer las funciones de transición y con leyes biológicas fundamentales.

Relacionados con la Aplicación Práctica de los Resultados Obtenidos:

- x. Realización de una aplicación práctica del modelo desarrollado, que permita la predicción del crecimiento y la producción bajo diferentes regímenes silvícolas.

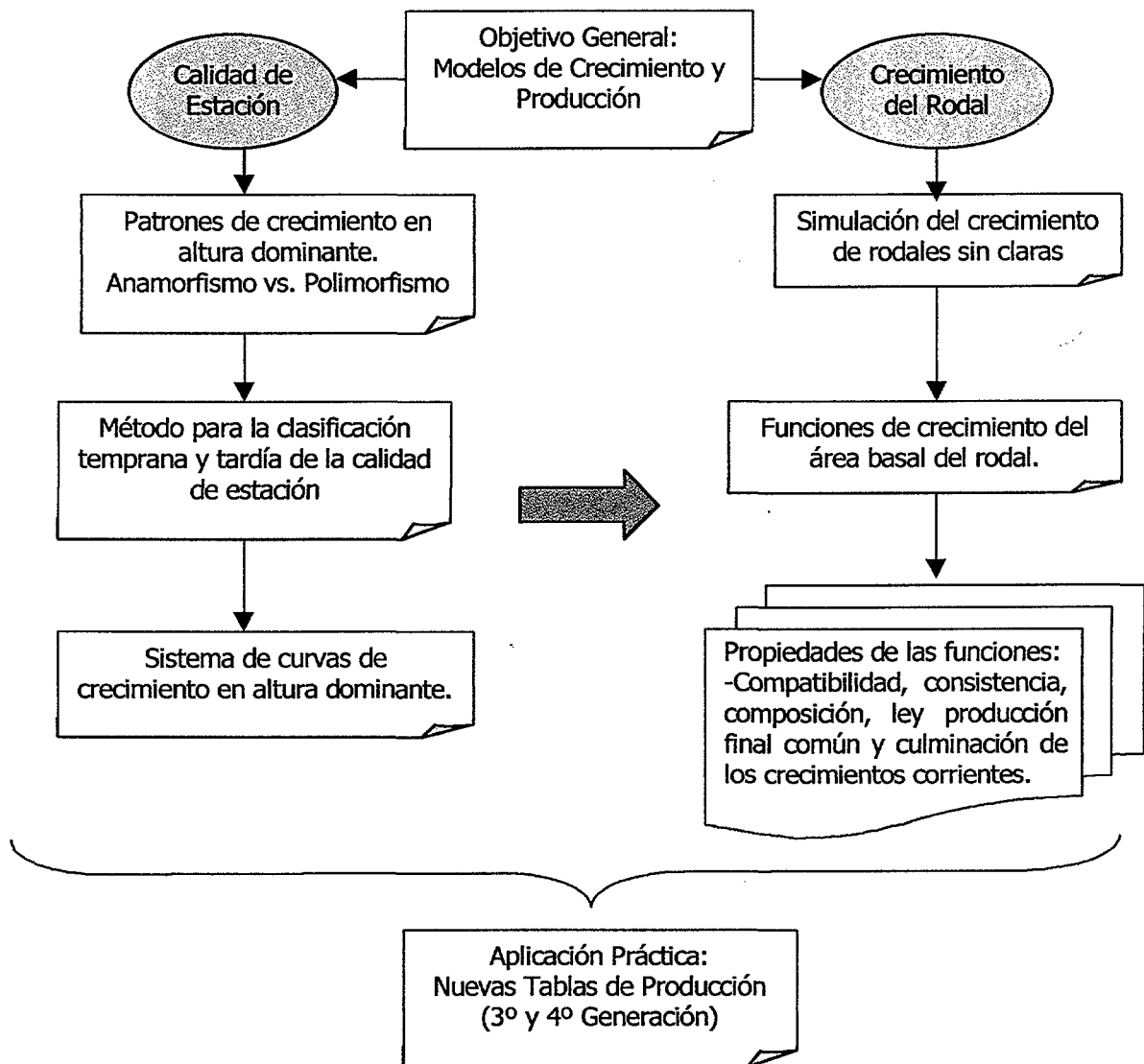


Figura 1.2: Diagrama de flujo de los objetivos de la tesis.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Se comienza por la revisión de los estudios realizados sobre calidad de estación, con atención a los desarrollados para la especie en España; deduciéndose que no se han tratado aspectos tan importantes como: la estimación temprana de la calidad de estación y la caracterización de los patrones de crecimiento en altura dominante, estudio este último que debería constituir un paso previo para el desarrollo del correspondiente sistema de curvas.

Al respecto, si bien abundante literatura confirma el polimorfismo en los patrones de crecimiento en altura, aún así continúan desarrollándose las tradicionales curvas proporcionales de altura dominante-edad, sin que previamente se demuestre que los crecimientos poseen estos patrones.

La tesis continúa con el desarrollo de funciones de crecimiento del rodal entero. Las teorías y experiencias sugieren que una producción final constante -y por ende de una asíntota de rendimiento común- existe para cada estación, dentro de un amplio rango de densidades iniciales en rodales coetáneos. Estas teorías han sido confirmadas para varios cultivos anuales y para varias especies forestales (Amaral, 1978). En el presente estudio estas teorías se han aplicado para el crecimiento en área basal de *Pinus radiata* en la Provincia de Guipúzcoa, País Vasco, España.

Además de la presente introducción general y de acuerdo a los objetivos enunciados arriba, se han considerado los temas correspondientes a:

Capítulo 2: Calidad de Estación.

Capítulo 3: Crecimiento a Nivel de Rodal.

Capítulo 4: Conclusiones.

Capítulo 5: Bibliografía.

Capítulo 6: Aplicación Práctica.

El capítulo segundo se ha subdividido en cuatro apartados debido a su extensión. Para la redacción de los mismos se ha seguido una modalidad de independencia entre cada uno. Esta modalidad, seguida en algunas tesis, implica que cada apartado se desarrolla con los materiales y métodos empleados, los resultados obtenidos y discusiones realizadas para alcanzar determinados objetivos específicos. En los apartados se realiza: una introducción al estudio de la calidad de estación, el estudio de los patrones de crecimiento en altura dominante, el desarrollo de una metodología para la estimación del Índice de Estación (Sitio), y finalmente se construyen dos sistemas de curvas de altura dominante - edad.

El capítulo tercero trata sobre los desarrollos de los modelos de crecimiento para la especie, a la escala de rodal entero. Este proceso, que se suele denominar modelización, se realiza con diferentes metodologías y empleando la variable área basimétrica o basal. Se ha prestado particular atención a que las funciones de crecimiento seleccionadas cumplan con ciertas propiedades matemáticas y biológicas e hipótesis de crecimiento del rodal. Propiedades e hipótesis que raramente se discuten en los estudios sobre crecimiento y producción y muchas veces no son cumplidas por los modelos obtenidos de dichos estudios.

En el capítulo cuarto se entregan las conclusiones de la investigación sobre la calidad de estación y el crecimiento en área basal.

En el capítulo quinto se presenta la bibliografía citada en los capítulos de Introducción, Calidad de Estación y Crecimiento a Nivel de Rodal.

En el capítulo sexto, que se presente en el anexo I, se realiza el esfuerzo de traducir todos los resultados obtenidos y los análisis realizados en una aplicación práctica que tenga relación directa con las necesidades de los Servicios Forestales y de los propietarios y forestales de la región. Esta aplicación consiste en dos tablas de producción, una de selvicultura variable y otra a la carta.

2. CALIDAD DE ESTACIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ESTACIÓN

La habilidad para predecir con exactitud el crecimiento y la producción de bosques y rodales, actuales y futuros, es fundamental para el manejo de los recursos forestales. El punto de partida para el desarrollo de un sistema de predicción del crecimiento y producción es el estudio para la evaluación y clasificación de la calidad de estación.

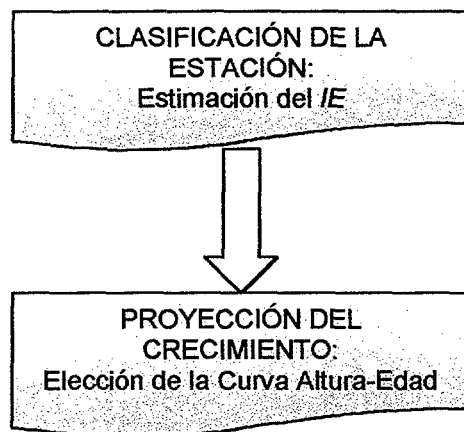
El presente capítulo se concentra en analizar y desarrollar varios sistemas de evaluación de la calidad de estación, con el empleo de la altura dominante del rodal como variable principal de respuesta. De manera que no se extenderá en la introducción a otros métodos, directos e indirectos, que además de no ser aplicados en el presente estudio, ya han sido lo necesariamente detallados por varios autores (Hägglund, 1981; Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Ortega & Montero, 1988; Ortega, 1989; Ibáñez, 1989; Vanclay, 1992, 1994).

La evaluación de la productividad de la estación normalmente implica la realización de medidas sobre el sitio y/o de variables del rodal y el empleo de los valores obtenidos como argumentos en funciones o gráficos, para expresar la productividad de una estación (Hägglund, 1981).

La altura de los árboles dominantes en rodales coetáneos ha sido usada como una medida de la productividad forestal y como una variable *conductora* en muchos modelos de crecimiento y producción forestal. Ello es debido a que es sensitiva a las diferencias ambientales entre las calidades de estación, y a que está fuertemente correlacionada con el crecimiento en volumen del rodal y débilmente correlacionada con la densidad y composición específica (Davis & Johnson, 1987; Wang *et al.*, 1994). El empleo de la altura dominante se traduce en dos herramientas: el *Índice de Estación (IE)* o *de Sitio* (ésta última según la terminología Americana) y las curvas de *altura dominante (H_0)-Edad (t)*.

El *IE* se define como la altura dominante que un rodal alcanza a una determinada edad, que se la suele denominar edad base, típica o de referencia.

El *IE* es una eficaz herramienta que nació para clasificar la calidad de estación, la cual una vez clasificada permitiría establecer el crecimiento en altura dominante del rodal, fuertemente correlacionado con el crecimiento en volumen del mismo.



También es frecuente utilizar el *IE* como una variable predictora en funciones de predicción del crecimiento en área basal o volumen (Sullivan & Clutter, 1972; Clutter *et al.*, 1983; Davis & Johnson, 1987; Burkhart & Gregoire, 1994; Vanclay, 1992,1994; von Gadow & Hui, 1999)

2.1.1. Estimación del Índice de Estación

Las curvas o funciones del *IE* son usadas para estimar la capacidad productiva de la tierra. Es un buen estimador de la calidad de estación sólo si el método apropiado es empleado para rodales representativos de las condiciones originales. Estimaciones obtenidas en rodales inadecuados o a partir de métodos incorrectos probablemente no reflejarán la productividad inherente de la tierra (Thrower, 1989).

Se define como *Índice de Estación (IE)* a la altura dominante que se alcanza a una edad de referencia en un rodal coetáneo y adecuadamente poblado. Dicha altura se puede referir a la de un árbol o a la altura promedio de una proporción de árboles dominantes y codominantes del rodal.

En patrones de crecimientos polimórficos no disjuntos cobra vital importancia la elección de la edad base para evitar errores en la clasificación de la calidad de estación. Al respecto Ortega & Montero (1988) realizan una didáctica explicación sobre el mismo.

Estos mismos autores citan que en condiciones normales de crecimiento, lo habitual es escoger la edad base próxima a la mitad del turno, al finalizar el turno, o al finalizar el crecimiento en altura de la especie. La elección de la edad base próxima al turno o a la edad de ralentización del crecimiento en altura tiene la ventaja de que no se van a producir cambios en la posición de las curvas. La fijación de esta edad próxima a la mitad del turno tiene como ventaja el poder estimar con precisión el *IE* en masas jóvenes.

Según Castilla & Prieto (1992) la edad base que se suele tomar es la mitad del turno para especies de crecimiento lento, o las 2/3 partes del turno para especies de crecimiento rápido. En los estudios recogidos sobre *Pinus radiata* realizados en España, Madrigal *et al.* (1975) la fijan en 15 años, mientras que Castilla & Prieto (1992) y Espinel *et al.* (1997), fijan la edad base en los 20 años. Si bien no se ha encontrado referencia se supone que se ha tomado en cuenta un turno de 30 años. Hoy día es una realidad que los turnos de *Pinus radiata* se están alargando, pudiendo esperar que lleguen a los 35-40 años (Cantero *et al.*, 1995; Sánchez *et al.*, 1997a; Sánchez *et al.*, 1997b).

Rodríguez *et al.* (1993) y Álvarez *et al.* (1999), escogieron la misma edad base de 20 años para *Pinus pinaster* en Galicia.

Virtualmente cualquier edad puede ser usada como edad base. Esta es arbitraria y es elegida por conveniencia y no por significación biológica (Thrower, 1989).

Dentro de la arbitrariedad de la elección de la edad base, se debe tener en cuenta por un lado que la precisión de cualquier método para la estimación del *IE* es mejor a medida que se aproxima a la misma. Esto significa que si se elige una edad más o menos temprana se podrá obtener una mejor exactitud al momento de clasificar la estación de un rodal joven. Por otro lado cuanto más próximo se esté del turno, se mejorará la relación del *IE* con la producción en volumen, principalmente porque las calidades se habrán manifestado y diferenciado más claramente. Sobre la base de estas consideraciones y a la realidad del retraso del turno de cosecha se ha optado por considerar los 25 años como edad base.

A los efectos del presente estudio se define entonces como *Índice de Estación*: a la altura dominante que se alcanza a una edad de referencia de 25 años en un rodal coetáneo y adecuadamente poblado.

El número de árboles dominantes y codominantes por hectárea considerado originalmente para la estimación de la altura promedio dominante fue de 100 árboles más gruesos por hectárea. Pero diversos errores de interpretación -por ejemplo, algunos de los árboles más gruesos estaban partidos por el viento o nieve y de todas formas fueron considerados entre los 100 medidos- obligó a reducir la cifra a los 75 árboles dominantes y codominantes.

En la clasificación de la estación llama la atención que aun no haya sido abordado en el País la evaluación temprana de la calidad de estación. Evaluar la estación en masas juveniles es particularmente complicado y a la vez importante. Empleando la altura dominante como indicadora de la calidad de estación, el principal problema en su clasificación es originado por la

pequeña amplitud de las alturas registradas entre las mejores y peores estaciones. A esto se le suma que algunas especies manifiestan un marcado polimorfismo a edades tempranas, por lo que si la estación es clasificada por un sistema anamórfico de curvas altura-edad, la estimación del *IE* presentará serios sesgos.

El poder clasificar certeramente la estación de una masa juvenil otorga una importante ventaja para la planificación y predicción del rendimiento de las claras y del régimen total. Ello, por lo tanto, tiene directa influencia en los cálculos económicos que se realicen, transformándose en una importante variable de decisión para propietarios y profesionales que trabajan en selvicultura y valoración de montes.

Las diferentes técnicas de estimación del *IE* tienen una base similar, que consiste en relacionar de alguna manera el crecimiento en altura con dicho *IE*. Una de las técnicas más novedosas, principalmente porque trata de solucionar el problema de la evaluación temprana de la calidad de sitio, es el llamado *Método del Intercepto de Crecimiento o de Intercepción (IC)*. A partir de éste se ha desarrollado una variante para *Pinus radiata*, que se ha aplicado tanto para la evaluación temprana (hasta los 10-12 años de edad) del *IE* del rodal como para la tardía (edades por encima de los 10-12 años). La variante del método original conjuga el concepto dado por el método del intercepto de crecimiento y el de las tradicionales curvas de índice de estación.

2.1.1.1. Método del Intercepto de Crecimiento (IC)

También conocido como método de intercepción o del intercepto de altura, consiste en usar una porción seleccionada del crecimiento temprano de altura para estimar el *IE*. El *IC* fue desarrollado para especies donde el crecimiento anual en altura puede ser identificado a través de sus internodios o entrenudos¹. Es un método preciso y fácil para la estimación del *IE* en rodales jóvenes con muchas ventajas sobre las curvas de *IE* tradicionales (Thrower, 1990).

El *IC* es comúnmente definido a través del largo total o promedio de los cinco primeros entrenudos por encima de los 1,3 metros de altura (altura normal). El concepto de emplear sólo un período específico del crecimiento temprano en altura como indicador de la calidad de estación fue usado originalmente en Estados Unidos en la década de 1930. A partir de ello ha ido evolucionando y se han introducido variantes como, por ejemplo, hacer variar la altura base o el número de entrenudos (años) considerados a partir de dicha altura base.

¹ a los fines de este estudio se lo considera como a la distancia entre dos zonas nodales

El *IC* es más útil para la evaluación de la calidad de estación en aquellos rodales donde los árboles no son lo suficientemente altos o viejos como para que puedan aplicarse las curvas de *IE* tradicionales.

Las ventajas y desventajas principales del método se han resumido en las siguientes:

Ventajas:

- ▶ Puede ser usado en rodales demasiado jóvenes como para emplear las curvas convencionales de *IE*, dando estimaciones más precisas.
- ▶ Elimina la necesidad de estimar la edad y la altura total; ambas variables pueden constituir una fuente de error, principalmente cuando se trabaja en bosques naturales.
- ▶ El *IC* puede ser medido rápida y fácilmente.
- ▶ La supresión temprana es evitada al medir por encima de una altura base predeterminada.

Desventajas:

- ▶ Los patrones de crecimiento temprano en altura pueden no reflejar el patrón de crecimiento tardío; ello enfocado a cuando se quiere aplicar en áreas nuevas.
- ▶ Variaciones climáticas de corto plazo que afectan el crecimiento en altura pueden influenciar la estimación del *IE*.

Ambas desventajas están relacionadas de alguna manera y justamente para evitar ello se recomienda no medir o relacionar un intercepto de un corto período de tiempo (Ej. 1 a 3 años).

La diferencia fundamental con las curvas tradicionales de *IE*, como se expresó, es que se puede prescindir de la edad del rodal para la estimación del *IE*. Ello es posible a través del uso de una función que relaciona el intercepto de crecimiento con el *IE*. Esta función es usualmente lineal de la forma:

$$IE = a + b \cdot IC + \varepsilon \quad (1)$$

Donde: *IE*: índice de estación; *IC*: intercepto de crecimiento; a,b: parámetros; ε : error aleatorio.

Entonces simplemente midiendo el largo de cinco entrenudos por encima de la altura normal (Fig. 2.1), en un número determinado de árboles dominantes y luego promediándolos, se entra a la función (1) para estimar el *IE* del rodal.

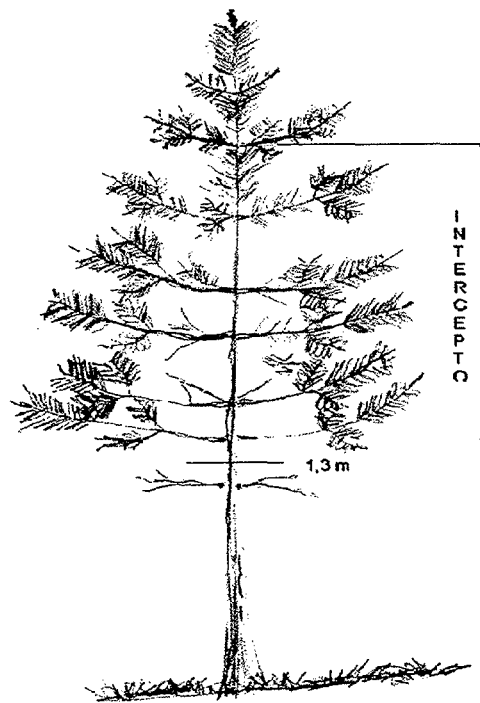


Figura 2.1: Método tradicional con un intercepto de cinco años por encima del 1,3 metros.

Si bien el método nació y se desarrolló para especies con entrenudos anuales (monocíclicas), en la última década evolucionó una variante que permitiría aplicarlo a especies policíclicas (Nigh, 1996), como es el caso de *Pinus radiata* en el País Vasco. Estas aplicaciones hasta la fecha se han registrado en Estados Unidos y Canadá para sus especies nativas. En realidad, la variante requiere el uso de la variable edad (a diferencia del método tradicional) y con ello se estaría evolucionando, aunque los autores no citen esta analogía, hacia las típicas curvas de *IE* pero con un desarrollo polimórfico y ajustando funciones lineales simples.

En la presente tesis se desarrolló una variante para *Pinus radiata* que crece en la provincia de Guipúzcoa, País Vasco-España.

2.1.2. Curvas de Altura Dominante

Las curvas *altura dominante-edad* constituyen una familia de curvas que abarcan el espectro de crecimiento de una especie. Son empleadas para predecir el crecimiento en altura de árboles dominantes y codominantes en rodales coetáneos de un *IE* o clase de calidad de estación dada.

El procedimiento habitual es emplear el *IE* para estimar la calidad de estación donde está o estará creciendo el rodal y luego con él seleccionar la curva de crecimiento altura-edad que actuará como conductora de la predicción del crecimiento y producción del rodal.

Varios tipos de modelos o curvas de altura han sido desarrollados para predecir la altura dominante a partir del *IE* y la edad. Aunque estos modelos difieren en términos de funciones seleccionadas y coeficientes ajustados, el principio de la predicción es usualmente similar (Wang *et al.*, 1994). A través de los años las formas de las curvas de altura dominante han evolucionado desde el anamorfismo hasta el polimorfismo llegando a desarrollarse curvas específicas para cada estación (e.g. Ibáñez, 1989; Thrower & Goudie, 1992); con un incremento en la complejidad y número de modelos y una reducción en el tamaño del área para el cual el modelo es aplicable (Wang *et al.*, 1994).

Sin pretender desmerecer la autoría de nadie y a los fines de facilitar la referencia de los innumerables modelos de crecimiento que se han desarrollado, se unificará la misma de acuerdo a los antecedentes disponibles (Richards, 1959, Zeide, 1989, Zeide, 1993). A modo de ejemplo se cita que la generalización realizada por Richards (1959) del modelo propuesto por von Bertalanffy en 1939, se lo citará como Bertalanffy-Richards y bajo este nombre se citarán todas las variantes que sean englobadas, como la expresiones conocidas como monomolecular, de Mitscherlich o la de Gompertz, incluyendo además los modelos reparametrizados.

Las generalizaciones son las siguientes:

Korf-Schumacher	$\text{Log}H_o = a + b \cdot \frac{1}{t^c}$
-----------------	---

Hossfeld-Prodan	$H_o = \frac{t^2}{a + b \cdot t + c \cdot t^2}$
-----------------	---

Bertalanffy-Richards	$H_o = A \cdot [1 - e^{(-k \cdot t)}]$
----------------------	--

Donde:

H_o : altura dominante.

t : edad o tiempo.

A, a, b, c, k : parámetros de ajuste.

2.1.2.1. Curvas Anamórficas de Calidad de Estación

Las curvas anamórficas constituyen una familia de curvas altura dominante-edad, proporcionales entre sí y que difieren por un cambio de escala en el eje de la altura (eje Y). Entre las principales razones de su gran desarrollo están su facilidad de construcción y la factibilidad de poder desarrollarlas a partir de datos provenientes de parcelas temporales. La característica limitante de estas familias es que sus curvas tienen todas las mismas formas o patrones de crecimiento. De aquí que cuando la especie tiene crecimientos polimórficos no puedan ser usadas para estimar el *IE* en forma precisa. Las curvas anamórficas construidas con datos de parcelas temporales usualmente subestiman el *IE* antes de la edad de referencia y lo sobrestiman a edades posteriores (Thrower, 1989).

Tres asunciones son inherentes a las curvas anamórficas:

- a. La muestra debe representar adecuadamente los rangos de estaciones en cada clase de edad.
- b. Los efectos sobre la altura dominante de las diferencias entre las estaciones, son relativamente los mismos para todas las edades.
- c. El patrón de crecimiento en altura en buenas estaciones es el mismo que en las estaciones pobres.

Han sido los primeros sistemas de curvas altura dominante-edad y a pesar de las limitaciones expuestas, su uso se ha extendido hasta nuestros días, demostrando que siguen poseyendo virtudes para que el crecimiento en altura, por ellas estimado, mantenga una aceptable correlación con la producción del rodal.

Una de las ventajas de las curvas anamórficas, además de la simplicidad de uso, es que permiten estimar en forma consistente e invariante el *IE*.

2.1.2.2. Curvas Polimórficas de Calidad de Estación

Las curvas polimórficas muestran diferentes formas para diferentes estaciones. Algunas especies muestran marcado polimorfismo en los patrones del crecimiento en altura, mientras que otras muestran sólo una pequeña diferencia entre los patrones de diferentes estaciones. El crecimiento en altura usualmente culmina antes en buenas estaciones respecto de estaciones más pobres (Thrower, 1989; Gadow & Hui, 1999).

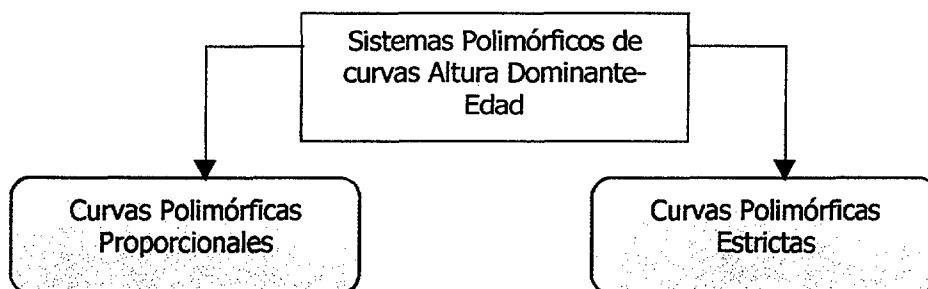
Variaciones en los patrones de crecimiento en altura han sido observadas para varias especies, entre rodales diferentes de una misma calidad de estación (Wang *et al.*, 1994). Por otro lado

abundante evidencia de patrones polimórficos del crecimiento en altura de árboles indican la necesidad de desarrollar métodos más precisos para la construcción de las curvas de calidad de estación respecto de las típicas curvas anamórficas (Carmean, 1972).

Hay un amplio acuerdo en que la forma de la curva de altura dominante está significativamente correlacionada con la calidad de estación; que las curvas polimórficas producen estimadores no sesgados para todas las edades y calidades de estación y que ellas reducen en definitiva los errores en las estimaciones. Las curvas polimórficas son preferidas a las anamórficas para rodales jóvenes y especialmente para las mejores calidades de estación (Amaral, 1978).

Para la construcción de curvas polimórficas es necesario contar con series de crecimientos; éstas se pueden obtener de parcelas permanentes o de análisis troncales de crecimiento de árboles apeados. Por esta razón construir un sistema polimórfico de curvas altura-edad es más costoso que desarrollar un sistema anamórfico.

Hay varios caminos para construir un sistema polimórfico de curvas altura-edad. Ampliando la clasificación de Clutter *et al.* (1983), los sistemas polimórficos se pueden clasificar en:



Curvas Polimórficas Proporcionales: son curvas que se diferencian entre sí en un cambio de escala en el eje de la edad (eje X). Tienen una proporcionalidad variable en el eje de la edad merced a tener todas una asíntota común. El parámetro local es aquel relacionado con la tasa de crecimiento, mientras que los restantes se mantienen constantes.

Curvas Polimórficas Estrictas: son curvas particulares para cada *IE* o calidad de estación de acuerdo a como se clasifiquen las estaciones. Ello implica que no existirá proporcionalidad alguna entre las curvas merced a que las funciones poseerán más de un parámetro local. Estos sistemas son más exactos en cuanto a que entregan patrones de crecimientos particulares que se amoldan mejor a los observados para cada estación, pero su manejo se torna complejo y suelen aparecer ciertas diferencias de aproximación (Ej. el *IE* estimado para el rodal y el obtenido por la curva de crecimiento no son exactamente iguales).

Thrower (1989) comparó un sistema de curvas anamórficas para *Picea glauca* elaboradas por el Ministerio Forestal de Canadá con un sistema polimórfico construido a partir de análisis troncales. Tanto las series de crecimientos provenientes de parcelas permanentes como de los análisis troncales mostraron una mejor adaptación de las curvas polimórficas. Se cuantificó el error en la estimación del *IE* y se encontró la tendencia a subestimar el *IE* por debajo de la edad base y una sobreestimación por encima de ésta. Similares tendencias fueron encontradas para otras especies y regiones de Estados Unidos (Thrower, 1989).

2.1.3. Curvas de *IE* y Curvas de Altura Dominante

El *IE* es un índice o indicador de la calidad de estación donde está creciendo un rodal, pero por si solo no dice nada sobre el crecimiento de la especie. Para eso se requiere una curva de crecimiento en altura asociada a dicho *IE*. Muchas veces se confunden los conceptos por el simple hecho que en los sistemas de curvas anamórficas de crecimiento, la misma función es empleada para estimar el *IE* y para expresar el crecimiento en altura. Pero debe tenerse presente que en los sistemas polimórficos estrictos no es posible emplear la misma función para ambas predicciones.

En este sentido, se suelen denominar como sinónimos las curvas de *IE* con las curvas de altura dominante-edad, simplemente porque al expresarlas gráficamente se emplean las mismas variables. Pero las primeras se corresponden estrictamente con curvas, cada una de una edad determinada, contenidas en un par de ejes que representan la altura dominante (X) y el *IE* (Y); mientras que en las segundas cada curva responde a un *IE* determinado y están contenidas entre un eje de edad (X) y otro de altura dominante (Y). Si bien, como se expuso, ambos gráficos pueden ser originados de las mismas funciones, sus utilidades como tales son diferentes.

2.1.4. Fuentes de Datos

De acuerdo a Clutter *et al.* (1983), las ecuaciones o curvas de calidad de estación son derivadas de tres fuentes de datos:

1. Mediciones de la altura y edad del rodal en parcelas temporales.
2. Mediciones de la altura y edad a través del tiempo con árboles o parcelas permanentes.
3. Reconstrucción de los patrones de desarrollo de la altura-edad a partir del análisis troncal de árboles individuales dominantes.

El empleo de parcelas temporales provee los datos más baratos para el desarrollo de curvas de calidad de estación, pero el uso de tales datos involucra la suposición que todo el rango de estaciones está bien representado en todas las clases de edad en la muestra.

La medición de árboles o parcelas permanentes ofrecen los mejores datos para la construcción de curvas de calidad de estación (Clutter *et al.*, 1983). Es un método particularmente caro por la instalación y mantenimiento de las muestras permanente y en especial porque los datos recién están disponibles después de un largo período de tiempo.

La realización de análisis de crecimientos en árboles apeados representaría una situación intermedia, ya que es un método que puede considerarse de un alto costo, pero las series de crecimientos se obtienen inmediatamente.

Con las tres fuentes de datos pueden construirse las familias de curvas anamórficas y polimórficas. De todas maneras, emplear series de crecimientos reales para la construcción de curvas anamórficas (como si fueran parcelas temporales) es desaprovechar información a menos que se demuestre que los patrones de crecimientos son proporcionales o próximos a ello.

Una fuente de datos alternativa, que puede englobarse dentro de la tercera, la constituye el método de intercepción, citado anteriormente, que emplea el largo de un determinado número de entrenudos, para aquellas especies de diferenciación anual, como ocurre y se aplica a muchas coníferas. Al involucrar la medición del crecimiento en árboles individuales esta alternativa es parte de la tercera fuente de datos.

Se ha discutido mucho acerca de cual es la fuente de datos más adecuada para los estudios de calidad de estación. Los datos de tipo longitudinal obtenidos por análisis troncales o parcelas permanentes, por un lado favorecen la caracterización de los patrones de crecimientos, pero por el lado estadístico se obtienen errores correlacionados. En cambio los datos de tipo transversal, provenientes de parcelas temporales o series parciales de crecimientos favorecen la independencia estadística de los errores, pero se complica la caracterización de los patrones de crecimientos.

Posiblemente una combinación de ambos tipos de datos otorguen los resultados más sólidos para caracterizar el crecimiento. Generalmente la correlación entre individuos no es demasiado importante y puede ignorarse (García, 1994b).

Para el presente estudio se emplearon series parciales de crecimiento provenientes de parcelas permanentes y series completas de crecimientos obtenidas de análisis troncales de un grupo limitado de árboles muestra dominantes.

2.1.5. Antecedentes

Posiblemente el análisis de troncos para generar series reales de crecimientos sea la fuente de datos más extensamente empleada, dado que, como se dijo, permite obtener series reales de crecimiento en forma casi inmediata. A pesar de ello Dahms (1963) hace un cuestionamiento al mismo. Muestra que las variaciones en los patrones individuales hacen variar en el tiempo el ranking de árboles más grandes y que no necesariamente representan el crecimiento en altura del rodal. La mortalidad de los árboles grandes es además citado como un factor de alteración; pero es importante aclarar que Dahms trabajó con *Pinus contorta*, una especie particular donde los patrones de crecimientos de la masa dominante son afectados por la densidad.

Posteriormente Curtis (1964) hace una revisión de los métodos de análisis de troncos hasta la época, para la construcción de curvas altura-edad. En dicha revisión comienza a cuestionar la eficiencia de los sistemas anamórficos para la estimación de la calidad de estación y propone el empleo de análisis troncales para el desarrollo de sistemas polimórficos.

Cuando se realizan las curvas de crecimiento altura-edad a partir de análisis troncales se suele generar cierta incertidumbre para ubicar el ápice para las diferentes edades del árbol. Carmean (1972) propone un método analítico para estimar la altura total a diferentes edades cuando se realizan análisis de crecimientos individuales, que inmediatamente después es modificado a propuesta de Lenhart (1972). Los métodos apuntan a estimar la ubicación del ápice de la planta, a una edad pasada, cuando el mismo se localizaría entre dos cortes realizados en el árbol muestra.

Dyer & Bailey (1987) realizan un test de seis métodos para estimar la altura total a diferentes edades cuando se realizan análisis troncales. Para ello emplearon 28 árboles de *Pinus taeda* cuyas altura se conocía anualmente. Concluyeron que el método de Carmean (1972) fue el más preciso.

El análisis de troncos permite el uso de rodales maduros para ganar información sobre el crecimiento de árboles jóvenes en una estación particular, donde tal información no estaría disponible por otro método. Pero ello trae consigo la incertidumbre si los árboles dominantes seleccionados lo han sido también a edades tempranas. Hoyer & Herman (1989) desarrollaron una guía para detectar supresión temprana a través del estudio del crecimiento en diámetro. Recientemente Magnussen & Penner (1996) plantean que emplear rodales maduros para reconstruir el crecimiento juvenil puede generar errores de subestimación de la altura dominante y presentan un método que soluciona parcialmente el problema.

En términos generales el análisis troncal ha merecido mayor atención que las parcelas permanentes, pero simplemente porque es poco usual que se cuente con esta última fuente de datos, ya que básicamente la estructura de los datos es la misma. La ventaja de los datos provenientes de las parcelas permanentes es que conceptualmente son las únicas que entregan series reales de crecimientos de la altura dominante, promedio de un número de árboles dominantes y codominantes.

2.1.5.1. Sistemas de Curvas Altura Dominante-Edad

Se puede considerar que en la década del 60 se comienza a cuestionar la utilidad de los sistemas anamórficos de curvas para clasificar la potencialidad productiva y estimar el crecimiento en altura de una estación. Este cuestionamiento, como se expuso, surge con el incremento del uso de los análisis troncales para analizar los patrones de crecimientos dentro y entre estaciones. Aun así hoy día se continúan desarrollando y utilizando.

Ya Curtis en 1964 cuestiona los sistemas anamórficos para la evaluación de la calidad de estación.

Beck (1971) ajusta el modelo de Bertalanffy-Richards de tres parámetros para estudiar el crecimiento en altura dominante de *Pinus strobus*. Empleó 126 árboles muestra analizados a través de la medición de los entrenudos. Estudió los efectos sobre los patrones de crecimientos de las diferentes calidades de estación e incorporó al análisis los factores topográficos como causales de la calidad de la estación. No halló mejora en la estimación de la calidad de estación con la incorporación de factores topográficos respecto de emplear solamente la altura dominante. También determinó un crecimiento polimórfico de la altura, que al compararlo con un sistema anamórfico resultó en una importante subestimación de la calidad de estación a edades inferiores a la base y una sobre-estimación a edades superiores. Ya se resalta el gran sesgo de emplear curvas anamórficas cuando se pretende estimar la calidad de estación a edades tempranas.

Carmean (1972) emplea más de 500 análisis troncales en el estudio del crecimiento en altura dominante de varias especies de *Quercus spp.* Primero selecciona una función que exprese confiablemente el crecimiento en altura y luego estudia la influencia de la calidad de estación sobre los patrones de crecimientos. Encuentra un considerable polimorfismo, no sólo entre la estaciones, sino también entre individuos de una misma estación.

Curtis *et al.* (1974) desarrollaron curvas de calidad de estación (altura dominante-edad) para *Pseudotsuga menziesii* a partir de 52 análisis troncales. Aplicaron dos modelos, uno empírico (Hossfeld-Prodan) y otro biológico (Bertalanffy-Richards), los que confrontaron con las curvas reales de crecimiento en altura. Observaron que la precisión de ambos variaba según la porción de la curva que se analizaba; concluyeron que el crecimiento es polimórfico y vislumbraron al

comparar con curvas anamórficas que se producía una subestimación del *IE* en rodales jóvenes y una sobrestimación en los maduros.

Bailey & Clutter (1974) marcaron un precedente importante para la elaboración de curvas polimórficas de calidad de estación invariantes de la edad base elegida. Toman como ejemplo para el desarrollo matemático la función de Korf-Schumacher y realizan una aplicación práctica con *Pinus radiata*. El sistema es actualmente usado y extendido a otras funciones de crecimiento.

Amaral (1978) ajusta varias funciones a 64 árboles muestras de *Pinus taeda* del sur de Brasil. Determina la existencia de variación en los patrones de crecimiento en altura con el cambio de calidad de estación.

Monserud (1984) trabajando con *Pseudotsuga menziesii* desarrolla curvas de calidad de estación empleando 45 análisis troncales y encuentra que los crecimientos en altura difieren entre grupos de hábitat. Emplea la función de Bertalanffy-Richards para obtener una curva promedio de crecimiento por parcela de estudio. Es uno de los pocos trabajos en los que la citada función no se ha comportado con suficiente flexibilidad para expresar los patrones de crecimiento en altura (ver más adelante Strub & Sprinz, 1987).

Duplat & Tran Ha (1986) desarrollan detalladamente el ajuste de una familia de curvas anamórficas de calidad de estación para varias especies europeas, empleando datos provenientes de parcelas permanentes.

Strub & Sprinz (1987) confrontan para varias especies de pinos norteamericanos curvas anamórficas generadas por el modelo de Korf-Schumacher y polimórficas por el de Bertalanffy-Richards contra una función lineal múltiple segmentada. Según su evaluación las dos primeras funciones no se comportaron con suficiente flexibilidad para reflejar los diferentes patrones de crecimientos respecto de la función segmentada. Cabe la aclaración de que los autores buscaban una función que describa con gran detalle los patrones de crecimientos individuales, precisión que raramente se pretende en los estudios de calidad de estación.

Monserud (1987) expresa la sorpresa y desilusión por el fracaso de las variables edáficas para explicar la variación de la calidad de estación de *Pseudotsuga menziesii* y citan resultados de Monserud y Rehfeldt (1987) donde demuestran que el genotipo logra explicar mejor la variación de la calidad de estación que los factores del ambiente. Este pequeño párrafo citando la influencia genética en la explicación de las variaciones del crecimiento resalta la poca incursión en este campo (se excluyen en general los avanzados estudios a nivel de mejoramiento genético de plantaciones).

Thrower & Goudie (1992) desarrollan curvas altura-edad y de *IE* para *Pseudotsuga menziesii* a partir de 262 análisis troncales. Ajustan la función de Bertalanffy-Richards de 5 parámetros y confrontan la familia de curvas ajustada contra dos sistemas desarrollados para otra región, uno anamórfico y otro polimórfico. Encuentran pequeñas diferencias al compararlo con el sistema polimórfico e importantes diferencias al hacerlo contra el anamórfico.

Payandeh & Wang (1994) desarrollan un modelo no lineal de 5 parámetros para establecer la curvas de calidad de estación de *Picea glauca* y *Populus tremuloides*. Para ello emplean 144 análisis troncales. Aceptando el polimorfismo del crecimiento sus estudios se centran en desarrollar un modelo polimórfico que sea consistente entre el crecimiento en altura y la estimación del *IE*.

Wang *et al.* (1994) aplican el modelo de Bertalanffy-Richards para desarrollar curvas polimórficas de calidad de estación para *Picea glauca*, que tengan en cuenta los factores causales de la calidad. Emplean análisis troncales de 82 parcelas. A pesar de encontrar diferencias entre los patrones de los diferentes rodales, no encuentran diferencias significativas en los mismos cuando comparan unidades biogeodimáticas, régimen de nutrientes, humedad y aireación del suelo y finalmente con las asociaciones vegetales acompañantes.

García (1995) ajusta el modelo de Bertalanffy-Richards para construir curvas polimórficas de proporcionalidad variable para *Eucalyptus sp.* en Chile. Los datos provinieron de parcelas permanentes y como resultado de los ajustes el modelo final queda con un valor de altura asintótica que posiblemente no sea alcanzable en la realidad. Este es un tema particularmente interesante, pues a veces los modelos polimórficos de asíntota común son desechados por arrojar valores asintóticos no alcanzables biológicamente, sin analizar si el comportamiento es biológicamente aceptable dentro del rango de crecimiento de la especie.

En especial García ha desarrollado toda una metodología cuya base es la teoría de los estados de crecimientos y plantea la predicción de los mismos a partir de ecuaciones diferenciales estocásticas. Tanto en sus trabajos con *Pinus radiata* en Nueva Zelanda como con *Eucalyptus sp.* en Chile privilegia la función de Bertalanffy-Richards siguiendo la metodología propuesta por Bailey & Clutter (1974) para ajustar una familia de curvas altura-edad polimórficas con asíntota común. Con estas curvas es posible realizar la estimación del *IE* y seleccionar la curva de crecimiento en altura y posteriormente emplear su ecuación diferencial para la predicción del incremento en altura. La forma implícita es la siguiente:

$$\frac{dH}{dt} = f [H(t); \phi; \varepsilon(t)]$$

Donde: dH/dt : incremento en altura; $H(t)$: altura a la edad t ; ϕ : vector de los parámetros del modelo; ε : proceso aleatorio que representa el error de la estimación.

Amaro *et al.* (1998) emplean varios modelos para ajustar por el método de ecuaciones de diferencias un sistema polimórfico para *Eucalyptus sp.* en Portugal. Los datos provinieron de parcelas permanentes. Enfatizan el empleo de la validación cuando algunas asunciones de la regresión parecerían ser violadas.

Knowe *et al.* (1998) comienzan estudiando los patrones de crecimiento para plantaciones de *Populus deltoides* en Estados Unidos, ensayando los modelos de Korf-Schumacher y Bertalanffy-Richards. Luego estudian el efecto genético sobre la variación del crecimiento en altura.

Andenmatten & Letournou (1998), emplean 52 análisis troncales de *Pinus ponderosa* para desarrollar curvas anamórficas de *IE* y de crecimiento en altura. Encuentran grandes errores para su empleo en la evaluación temprana del *IE* (hasta los 10 años).

2.1.5.2. Referencias en España

En España, de acuerdo a la revisión realizada, no se han encontrado estudios en los que se hayan analizado la influencia de la calidad de estación sobre los patrones de crecimiento en altura. Si bien se han empleado las tres fuentes de datos citadas anteriormente, la confrontación de los sistemas anamórficos y polimórficos se realiza gráficamente, método tradicionalmente empleado y que continúa siendo una herramienta muy válida, pero que por sí solo a veces no es suficiente si se quieren conocer los probables sesgos o errores en la estimación de la calidad de estación.

Echeverría (1942) desarrolla las primeras curvas de calidad de estación para *Pinus radiata* en España. Por procedimientos gráficos relaciona las alturas medias de la masa con la edad, para períodos de tres años y a partir de los siete. Construye cinco clases de calidades de estación que las emplea para desarrollar sendas tablas de producción normal.

Pita (1965) construye un sistema anamórfico de curvas provisionales de calidad de estación para *Pinus nigra*, empleando como variable de respuesta la altura media de la masa, la cual posteriormente es relacionada mediante una función lineal con la altura dominante. Para los ajustes emplea la función de Hossfeld-Prodan y las curvas son de alcance nacional. Gómez (1996) en un intento de regionalizar dichas curvas emplea datos provenientes de 27 parcelas permanentes y 40 temporales. Se ensayan los modelos de Hossfeld-Prodan y Korf-Schumacher

para desarrollar tanto sistemas anamórficos como polimórficos. La selección del modelo y sistema se realiza mediante la confrontación gráfica de cada sistema contra los datos observados. Se escoge finalmente un sistema anamórfico por bandas o clases independientes de calidad de estación en las que se dividió el rango de datos altura-edad.

Madrigal *et al.* (1975) aplican la función de Hossfeld-Prodan para el desarrollo de curvas de calidad de estación para *Pinus radiata* en el País Vasco. Emplean 53 parcelas temporales y análisis troncales. Se establecen tres clases de calidades caracterizadas por las alturas dominantes de 13, 17 y 21 m a la edad base de 15 años.

Ibáñez (1989), analiza la aplicación de un amplio espectro metodológico para la evaluación directa de la calidad de estación para los hayedos (*Fagus sylvatica*) de La Rioja. Incorpora el método de predicción de los parámetros (ver Clutter *et al.*, 1983) para ajustar la función altura-edad y un método para la estimación del IE aproximado al que se desarrolla en esta tesis, que combina el método del intercepto de crecimiento y el de las curvas de IE. Selecciona, de entre todos los modelos y métodos probados, la función de Bertalanffy-Richards reparametrizada por el citado método. Sigue el sistema tradicional de dividir en fajas de clases de calidad de estación el espectro de datos de altura dominante-edad, ajustando una curva particular para cada clase. Si bien el sistema se podría clasificar como polimórfico, mantiene cierto condicionamiento al separar las curvas de crecimiento de los árboles por clases arbitrarias y supuestamente proporcionales de clases de calidad. No aclara si los árboles cambiaban de clase a través de la vida y como se trataba en estos casos.

Erviti (1991) emplea datos provenientes de parcelas permanentes como fuente principal para el ajuste de un sistema anamórfico y otro polimórfico para *Pinus sylvestris*. Como resultado recomienda usar análisis troncales para ajustar las curvas a edades inferiores a los 25 años (evaluación temprana). Emplea el modelo de Bertalanffy-Richards para realizar ajustes individuales por parcela para analizar la bondad de los sistemas y prioriza la ventaja de obtener valores asintóticos de altura dominante particulares para las diferentes calidades, por lo que concluye con una recomendación del sistema anamórfico. Como verificación (autovalidación) realiza una confrontación gráfica de la familia de curvas vs. las curvas reales.

Castilla & Prieto (1992) emplean el modelo de Gauss modificado para expresar la potencialidad productiva de *Pinus radiata* en el País Vasco.

$$H_0 = b_0 \cdot (1 - \exp[-(t - b_1)/b_2])$$

Donde: b_0 , b_1 : parámetros dependientes del IE ; b_2 : parámetro global; H_0 : altura dominante del rodal (100 pies más gruesos/ha); t : edad.

Además emplean en forma original una variante del método de predicción de los parámetros del modelo, que consiste en relacionar dos parámetros del modelo entre sí. Las relaciones entre los parámetros y el IE presentados son los siguientes:

$$b_0 = b_3 \cdot IE^{b_4}$$

$$b_1 = b_5 - \ln\left(1 - \frac{IE}{b_0}\right)$$

Con este sistema es posible generar un sistema continuo de curvas polimórficas de altura dominante-edad; cuya característica diferencial es que permite estimar valores asintóticos particulares para cada estación como en un sistema anamórfico y además parámetros locales para cada estación del coeficiente relacionado con la tasa de crecimiento del modelo, como lo realiza un sistema polimórfico de asíntota común.

Rodríguez *et al.* (1993) realizan una revisión de las curvas de calidad de estación realizadas para *Pinus pinaster* en Galicia. Se emplean 373 árboles muestra dominantes apeados en 98 parcelas temporales y permanentes instalados en toda Galicia. Si bien realizan ajustes individuales para cada árbol, finalizan ajustando un sistema anamórfico de curvas desaprovechando la gran cantidad de datos para investigar el comportamiento de los patrones de crecimiento en altura, para las regiones y estaciones estudiadas dentro de la Comunidad. El modelo ensayado es el de Bertalanffy-Richards, en el cual relacionan la asíntota con el IE , obteniendo un modelo de cuatro parámetros de la siguiente manera:

$$H_0 = a \cdot IE^b \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{1}{e^{c \cdot t}}\right]\right)^d$$

Donde: H_0 : altura dominante; a, b, c, d : parámetros; IE : índice de estación a los 20 años; t : edad.

Estiman que para alturas dominantes superiores a los 10 m los errores serán inferiores al 10%, pero para alturas inferiores a ésta esperan que sean muy elevados (hasta 25% y más) por lo que recomiendan no usarlo para la evaluación temprana.

Recientemente Álvarez *et al.* (1999) siguiendo con los estudios de crecimiento de *Pinus pinaster* en Galicia ratifican el modelo de Bertalanffy-Richards anamórfico reparametrizado, presentado anteriormente por Rodríguez *et al.* (1993). Si bien las precisiones de los ajustes fueron buenas ($R^2=95\%$), no se cita en el trabajo que se hayan indagado sobre las mejores relaciones entre el parámetro asintótico indexado y el *IE*, perdiendo la posibilidad de obtener mejores ajustes.

Espinel *et al.* (1997) presentan un simulador para *Pinus radiata* en el País Vasco el cual trabaja con tres clases de calidad. Desarrollan sistemas de curvas altura-edad anamórficos particulares a cada clase. Las clases emularon la división realizada por Madrigal *et al.* (1975) para la especie, pero emplearon la función de Korf-Schumacher para ajustar una curva particular a cada una. Como validación realizaron la comparación de los resultados de la predicción del simulador (incluyendo la altura dominante a diferentes edades) con las tablas de producción publicadas por Madrigal *et al.* (1975) y Castilla & Prieto (1992); pero no se han encontrado registros que las citadas tablas empleadas como base comparativa hayan tenido su correspondiente validación.

En apartados anteriores se resaltó la importancia de poder clasificar aceptablemente la estación en masas juveniles, dadas las implicancias predictivas y económicas que ello conlleva.

En algunos estudios españoles se señala el inconveniente que representa utilizar las curvas de altura dominante-edad que ajustaron a rodales juveniles (Ibáñez, 1989; Erviti, 1991), pero en ninguno se aborda el problema con el fin de solucionarlo.

En el citado trabajo de Ibáñez (1989) con *Fagus Sylvatica*, se ha encontrado la aplicación de una aproximación al método de intercepción, pero sin que el mismo sea referenciado como tal y a la ventaja que representa su utilización para la evaluación temprana de la calidad de estación.

2.1.6. Finalidad del Estudio de la Calidad de Estación

El estudio de la calidad de estación de *Pinus radiata* en la provincia de Guipúzcoa se ha organizado en tres apartados.

A la luz de la revisión de los antecedentes surgió como una necesidad realizar la caracterización, como primera medida, de los patrones de crecimiento de la altura dominante en las diferentes calidades de estación.

Dado que las curvas de crecimiento en altura dominante son las conductoras de la predicción del modelo de crecimiento, conocer su comportamiento en las diferentes estaciones evitará posibles

sesgos posteriores en la estimación de la potencialidad productiva de un rodal y de su crecimiento esperado.

Un apartado se dedicó a la clasificación de la calidad de estación, con énfasis en la evaluación temprana, aspecto no estudiado aun y sumamente importante para la planificación selvícola y de la producción de los rodales juveniles. El método es innovador y permitirá clasificar la estación de un rodal de *Pinus radiata* a través de estimar el Índice de Estación, con el cual se podrá escoger la curva de crecimiento en altura dominante adecuada para la simulación del crecimiento.

Finalmente se desarrollan dos sistemas de curvas de altura dominante-edad, que se confrontarán con las curvas publicadas a la fecha, señalando los errores que se pueden cometer si no se estudia primero la influencia de la estación sobre el crecimiento.

2.2. PATRONES DE CRECIMIENTO EN ALTURA DOMINANTE

Son varios los estudios de crecimiento y rendimiento de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don realizados en España: Echeverría, 1942; Madrigal *et al.*, 1975; Castilla & Prieto, 1992; Cantero *et al.*, 1995; Prieto *et al.*, 1996b, 1998; Espinel *et al.*, 1997. Casi todos ellos han considerado como el sistema conductor de la predicción, directa o indirectamente, el crecimiento en altura dominante. Pero sumado a la escasa atención que recibieron la validación de los modelos, ninguno de ellos ha caracterizado los patrones de crecimiento en altura dominante de esta especie en España en relación con las diferentes calidades de estación.

Cuando se hace referencia a una curva de calidad de estación, ella es simplemente una curva de crecimiento en altura para una entidad genética dada, bajo un grupo de condiciones ambientales. Así se puede esperar encontrar tanta formas diferentes de curvas como combinaciones de árboles y condiciones ambientales existan (Beck, 1971).

Existe un gran acuerdo respecto a que la forma de las curvas de crecimiento en altura dominante están significativamente relacionadas con la calidad de estación (Amaral, 1978). Abundante evidencia sobre el polimorfismo de los patrones de crecimiento en altura dominante de los árboles indica la necesidad de desarrollar métodos más exactos para la construcción de las curvas de crecimiento respecto de las típicas curvas anamórficas (Carmean, 1972).

Thrower & Goudie (1992) citan que curvas anamórficas de crecimiento en altura dominante para *Pseudotsuga menziesii*, realizadas por el Ministerio Forestal de British Columbia, Canadá, fueron contrastadas con datos provenientes de análisis troncales y parcelas permanentes. Como resultado de ello concluyeron que las proyecciones del crecimiento en altura y las estimaciones de los índices de estación fueron sesgados, especialmente después de la edad de referencia. Este problema es típico de curvas desarrolladas usando datos de parcelas temporales y funciones anamórficas. Ello puede estar originado a partir de asumir una relación constante proporcional entre las curvas de crecimientos de todos las estaciones y condiciones del rodal (Amaral, 1978).

A través de este estudio se pretende caracterizar los patrones de crecimiento de la altura dominante a partir de series de crecimientos obtenidas de análisis troncales de árboles apeados. Se intentará explicar si la calidad de estación tiene influencia sobre estos patrones y ello será clave para el posterior desarrollo de las curvas de calidad de estación, ya que se deberá establecer si el crecimiento es anamórfico o polimórfico.

2.2.1. Materiales y Métodos

2.2.1.1. Fuente y Análisis de los Datos

La base del estudio proviene de árboles apeados, que luego de seccionados fueron medidos para establecer sus incrementos en altura a diferentes edades. Estos árboles pertenecieron al estrato dominante y fueron seleccionados en siete de las 38 parcelas permanentes instaladas a lo largo y ancho de la provincia de Guipúzcoa, País Vasco-España. Estas siete parcelas se seleccionaron intentando cubrir el rango de alturas dominantes, estimadas para la provincia a través de las citadas parcelas permanentes y las parcelas del Inventario Forestal Nacional². Los tamaños de las parcelas no fueron uniformes, variando entre los 1.500 y los 2.200 metros cuadrados.

En cada parcela se apearon dos árboles dominantes cuyas alturas estimadas se aproximaban a la del promedio de los 75 árboles/ha más altos de la misma. Una vez apeados se seccionaron según la calidad de estación; para calidades altas y medias se seccionó a: 0,3; 0,8; 1,3; 1,8 y luego cada 1,5 metros hasta el ápice, mientras que para las calidades pobres después del corte de 1,8 metros se trozó cada metro.

Los árboles se procesaron para períodos de 3 años. Para la ubicación de la altura del ápice, cuando el mismo quedaba entre dos cortes, se empleó el método gráfico, realizando previamente una prueba usando los métodos analíticos de Carmean (1972) y la variante de Lenhart (1972).

2.2.2.2. Los Modelos de Crecimiento

Como primer paso se listaron y representaron en una misma gráfica las curvas altura-edad de cada árbol, correspondientes a una misma parcela. Para la selección del modelo se emplearon los pares de datos de árboles individuales con el fin de considerar la variabilidad entre las distintas curvas de crecimiento y mejorar la evaluación de la flexibilidad.

Se ensayaron seis modelos de crecimiento que intentan representar la gran variedad de los propuestos para este tipo de estudios. Ellos son, con las denominaciones de los autores con las que a algunos se los suelen reconocer (Zeide, 1989, Zeide, 1993, Calvo *et al.*, 1994), los siguientes:

$$h = b_0 [1 - e(-b_1 \cdot t)]^{b_2} + \varepsilon \quad \text{Bertalanffy-Richards} \quad (1)$$

² Estas alturas del *I.F.N.* se tomaron como orientadoras ya que se corresponden con las promedios de los 100 árboles/ha más gruesos.

$$h = b_0 [1 - e(-b_1 \cdot t)] + \varepsilon \quad \text{Monomolecular-Mitscherlich} \quad (2)$$

$$h = \frac{t^2}{b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2} + \varepsilon \quad \text{Hossfeld-Prodan} \quad (3)$$

$$h = \frac{b_0 [1 - e(-b_1 \cdot t)]}{1 - b_2} + \varepsilon \quad \text{Chauchard} \quad (4)$$

$$\log h = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{t^{b_2}} + \varepsilon \quad \text{Korf-Schumacher} \quad (5)$$

$$h = b_0 + b_1 \cdot \frac{1}{t^{b_2}} + \varepsilon \quad \text{Recíproco} \quad (6)$$

Donde: h : altura total al tiempo t ; t : edad; b_0, b_1, \dots : parámetros; ε : error aleatorio.

Las estimaciones de los parámetros para cada modelo fueron hallados según el procedimiento iterativo de Marquadt de regresión no lineal (Draper & Smith, 1981), a excepción de la función (3) que se ajustó por el procedimiento de regresión lineal múltiple. El programa estadístico empleado para tales fines fue el Statgraphics Plus v. 3.0.

Para la evaluación y comparación de los ajustes se emplearon los estadísticos: el Coeficiente de Determinación (R^2) y Coeficiente de Determinación ajustado ($R^2(aj)$) para evaluar las funciones con más de dos parámetros y el Error Estándar de la Estimación (EEE); además se evaluó la aptitud del modelo a través del Análisis de los Residuales ($ANARE$) y la bondad gráfica del ajuste - gráfico de los datos observados y los estimados por la función-.

En el caso de funciones con más de dos parámetros se usa un R^2 ajustado, que se compensa por el incremento automático que produce el aumento de los parámetros en el coeficiente.

Una vez que se seleccionó el modelo, el mismo se lo volvió a ajustar para cada parcela, ahora empleando los pares de datos de ambos árboles dominantes apeados. Esta nueva curva, ajustada con ambos árboles de la parcela, representaría el crecimiento promedio de la misma y por ende de la estación donde están creciendo.

Para el estudio de la variabilidad de la calidad de estación dentro y entre parcelas, se realizó un Análisis de la Varianza ($ANAVA$); para ello se empleó la variable *Índice de Estación* (IE_{25}), definiéndola para el presente estudio como la altura dominante que se alcanza a la edad de referencia de 25 años³.

³ La elección de la edad base se discute en la Introducción a la Tesis.

En el estudio de la influencia de la calidad de estación en los patrones de crecimiento en altura se estimaron los IE_{25} para cada árbol y parcela y se los confrontó con los parámetros del modelo. En primer lugar se analizaron gráficamente la dispersión de los valores de los distintos parámetros vs. los IE_{25} y posteriormente se ensayaron varios modelos lineales para tratar de explicar con los mismos la variación de los parámetros.

Una vez establecidas las relaciones entre los parámetros y la calidad de estación, se procedió a reemplazar en la función seleccionada originalmente aquellos parámetros que fueron indexados⁴ por las correspondientes funciones. Con esta función reparametrizada se hizo ajustar de nuevo el modelo, ahora con todos los datos disponibles de los árboles muestra. Con este procedimiento se terminan de ajustar los parámetros finales del modelo ampliado y se obtienen los estadísticos necesarios para evaluar la precisión global del ajuste.

Con la finalidad de evaluar el grado de polimorfismo de las curvas de crecimiento se compararon las curvas polimórficas con las correspondientes curvas anamórficas. Se considera que cuanto más se aparte el crecimiento real del comportamiento anamórfico o proporcional, mayor será el grado de polimorfismo.

Para realizar la confrontación se aprovechó la reparametrización de la función de crecimiento seleccionada. Las curvas polimórficas se obtuvieron indexando dos o tres parámetros de la función, mientras que en la anamórfica se indexó solamente el parámetro asintótico. Las curvas polimórficas fueron comparadas con la anamórfica superponiéndolas a través de seleccionar para ambas el mismo IE_{25} .

La confrontación entre los sistemas anamórficos y polimórficos se realizó de varias maneras:

- ▶ Evaluando la precisión a través de los estadísticos de los ajustes por regresión de las funciones indexadas.
- ▶ Comparación gráfica de las curvas promedios de cada parcela vs. la curva anamórfica. La curva anamórfica se seleccionó a través del IE_{25} de la parcela.
- ▶ Comparación analítica a través de la diferencias medias absoluta y relativa, que se calcularon de la siguiente manera:

$$E.A.M. = \sum_{i=1}^n \frac{|H_e - H_o|}{n}$$

⁴ Relacionados con el Índice de Estación a través de alguna función.

$$E.A.M.\% = \frac{EAM}{H_m} \cdot 100$$

Donde:

EAM: error absoluto medio.

He: altura estimada por la función a una edad dada.

Ho: altura observada a la misma edad.

N: número de observaciones.

EAM%: EAM relativo.

Hm: altura media entre todas las observaciones.

► Cálculo de las diferencias porcentuales para distintas edades. Para ello se estimaron las alturas por ambas funciones, entre las edades 5 a 40 años y para períodos de cinco años y luego se hallaron las diferencias entre dichas estimaciones de la siguiente manera:

$$DiffH\% = \frac{H_a - H_p}{H_p} \cdot 100$$

Donde:

DiffH%: Diferencia porcentual entre las estimaciones de las alturas dominantes a una edad *i*.

Ha: Altura dominante estimada por la curva anamórfica.

Hp: Altura dominante estimada por la curva polimórfica.

Estas diferencias fueron graficadas en función de la edad.

2.2.1.3. Validación

Para la validación de los patrones de crecimiento en altura dominante de *Pinus radiata*, se emplearon series reales de crecimientos provenientes de análisis troncales realizados en las provincias de Vizcaya y Guipúzcoa por Madrigal *et al.* (1975). La confrontación se realizó entre la curva estimada por la función ajustada y las series promedios reales de la parcela. Esta serie promedio se obtuvo a partir de promediar en cada edad de medición, los datos de los dos árboles muestra dominantes. De los numerosos árboles y parcelas disponibles se usaron solamente los datos provenientes de 13 parcelas, seis de Vizcaya y siete de Guipúzcoa, debido a que éstas fueron las únicas que llegaron o sobrepasaron la edad base de 25 años.

La validación ha constado de dos partes, una analítica y otra gráfica. La analítica consistió en calcular las diferencias o errores absolutos medios (*EAM*) entre los 5 y 25 años; las diferencias entre las alturas observadas y estimadas se han calculado para períodos de cinco años. La validación gráfica se basó en superponer las curvas reales de crecimiento vs. las estimadas y analizar visualmente los comportamientos.

Se hace la aclaración de que, a pesar del limitado tamaño de la muestra para la construcción de los modelos, se decidió no aumentar el mismo con los árboles usados en la validación. La razón es que éstos poseen mediciones para períodos de cinco años, comenzando desde los cinco años, el cual se consideró muy excesivo para el detalle que se necesitaba. Por otro lado constituyen un valiosísimo material necesario para cumplir con una etapa tan importante como es la validación.

2.2.2. Resultados y Discusión

A través de los análisis troncales no se apreciaron signos de supresión temprana en el crecimiento en altura; la edad al tocón era coincidente o difería en un año con el registro de la plantación. Las edades a las que se alcanzó la altura de 1,3 metros oscilaron entre los dos y cuatro años. A partir de estos resultados se decidió emplear la edad al tocón para el cálculo del crecimiento en altura.

Todos los modelos dieron buenos ajustes individuales, con valores de R^2 superiores al 90% y *EEE* en la mayoría de los ajustes inferiores al metro. De ellos, los modelos (1) y (3) sobresalieron en sus estadísticos y bondades de ajustes. Los ajustes de ambos modelos han sido muy satisfactorios (R^2 superiores al 98 %) y las curvas mostraron una muy buena adaptación a los patrones de crecimientos individuales (Fig. 2.1), demostrando con todo ello una buena precisión y flexibilidad.

De entre estas dos funciones se prefirió la (1) de Bertalanffy-Richards por pertenecer al tipo de funciones biológicas, permitiendo una más adecuada interpretación del comportamiento de los parámetros con variables relacionadas con el crecimiento como lo es el IE_{25} . Además es una de las funciones preferidas para la interpretación del crecimiento, principalmente por su gran flexibilidad (Lundgren & Dolid, 1970; Beck, 1971; Carmean, 1972; Curtis *et al.*, 1974; Amaral, 1978; García, 1984, 1987, 1994, 1995; Monserud, 1984; Ibáñez, 1989; Chauchard, 1991; Thrower & Goudie, 1992; Payandeh & Wang, 1994; Wang *et al.*, 1994; Rojo, 1994).

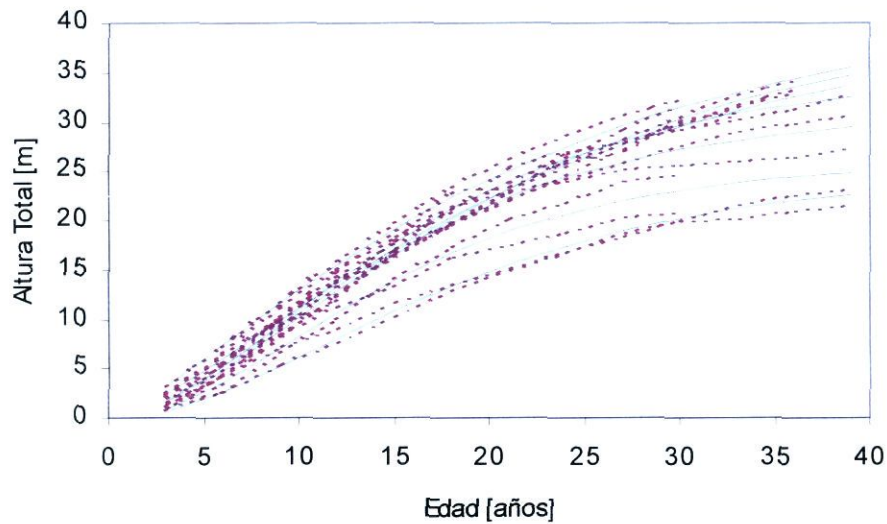


Figura 2.1: *Visión general de las curvas de crecimiento reales de los árboles muestra -trazo discontinuo- y los ajustes promedios para cada parcela a través de la función 1.*

La función (1) se vuelve a escribir de la forma empleada usualmente (Richards, 1959):

$$H_o = A \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]^c + \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde:

A: parámetro que representa la altura asintótica o simplemente la asíntota de la función.

k: parámetro asociado con la tasa de crecimiento de la función.

c: parámetro que influye en la ubicación del punto de inflexión de la función.

Las variables ya fueron definidas anteriormente. Un mayor análisis del significado de los parámetros serán presentadas más adelante.

Esta función, con adecuados valores de los parámetros, representa una curva asimétrica sigmoide que parte del origen y se aproxima a alguna altura asintótica *A*, cuando la edad *t* tiende al infinito (Beck, 1971). Los ajustes de la función 2.1, como se expuso, han sido muy satisfactorios, tanto a nivel individual como en cada parcela. Los coeficientes de determinación de los ajustes individuales superaron en todos los casos el 99% de explicación, lo que demuestra las aptitudes de la función; los errores estándar alcanzan valores máximos de un metro, pero con un promedio de 0,5 m (Tabla 2.1). En los ajustes por parcela, obviamente la variabilidad aumenta, aunque de todas maneras los estadísticos son muy buenos; una sola parcela presentó un R^2 del 97%, mientras que para las restantes se alcanzaron explicaciones del 99% (Tabla 2.2).

Tabla 2.1: *Parámetros y estadísticos de los ajustes individuales de la función 2.1 y los correspondientes IE_{25} . PN^o: parcela número; AN^o: árbol número.*

PN ^o	AN ^o	IE_{25} [m]		PARAMETROS			R^2 [%]	E.E.E. [m]
		Obs.	Est.	A	k	c		
20	237	26,6	27,2	41,473	0,0662067	1,9908	99,8	0,47
	273	26,2	26,4	40,228	0,06066	1,6945	99,7	0,64
14	210	19,4	19,6	23,5058	0,0990621	2,09049	99,3	0,59
	102	22,5	22,8	28,1927	0,109249	3,1698	99,9	0,32
19	50	27,1	26,8	35,7836	0,0828762	2,13883	99,8	0,52
	53	26,7	27,0	34,4877	0,087437	2,052579	99,9	0,38
31	137	24,6	24,9	34,0278	0,07020	1,6385	99,7	0,58
	27	24,4	24,8	29,5179	0,109825	2,59893	99,7	0,55
100	07	27,5	26,8	37,2129	0,0682585	1,63972	99,8	0,40
	02	26,0	25,9	43,4396	0,0482523	1,45708	99,8	0,53
101	05	17,5	17,8	28,6466	0,0525181	1,52175	99,6	0,44
	01	17	17,4	26,100	0,06883	2,0565	99,8	0,30
15	848	27,4	27,2	45,8122	0,0422875	1,21805	99,0	0,99
	847	29,5	30,6	40,1646	0,0671395	1,32288	99,8	0,48

Tabla 2.2: *Parámetros y estadísticos de los ajustes por parcela de la función 2.1 y los correspondientes IE_{25} .*

PN ^o	IE_{25} [m]		PARAMETROS			R^2 [%]	E.E.E. [m]
	Obs.	Est.	A	k	c		
19	26,9	27,0	35,1325	0,0849	2,07625	99,7	0,55
14	21,0	21,2	26,1418	0,10041	2,49777	97,2	1,29
20	26,4	26,8	41,138	0,06266	1,82654	99,6	0,67
31	24,5	24,9	31,4679	0,08901	2,04155	99,4	0,76
100	26,8	26,3	40,1704	0,05664	1,52041	99,6	0,67
101	17,3	17,9	24,9235	0,08228	2,40	99,2	0,67
15	28,4	28,3	42,0024	0,0552	1,36528	98,7	1,12

2.2.2.1. Variación y Representatividad de la Muestra

A través del ANAVA se analizaron las variabilidades del IE_{25} dentro de cada parcela y entre las parcelas (Tabla 2.3). El valor de *F* obtenido entre los cuadrados medios resultó superior al valor tabular indicando que existen diferencias significativas entre las diferentes parcelas. La raíz del

cuadrado medio del error (variabilidad interna) fue de 1,28 metros, lo que representa un coeficiente de variación de 5,3%; mientras que la raíz del cuadrado medio correspondiente a las parcelas (entre parcelas) fue de 3,90 metros. Ello señala una homogeneidad más que aceptable de la variabilidad interna.

Tabla 2.3: *Análisis de la Varianza (ANAVA), del IE_{25} dentro y entre parcelas.*

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrado Medio (CM)	Valor F
Entre parcelas	6	190,374	31,729	26,32**
Dentro parcelas	7	8,44	1,20571	
Total	13	198,814		

**Valor F: altamente significativo.

A través del Test de los Rangos Múltiples (Tabla 2.4: Comparación de medias) se establece que tres de las parcelas desarrollan en estaciones similares, PN^o 19, 20 y 100, hecho que se puede inferir observando los valores similares de IE_{25} (Tablas 2.1, 2.2, 2.4). Otras dos parcelas se superponen a este grupo, la PN^o15 en un nivel superior y la PN^o31 en un nivel inferior; las restantes dos parcelas pertenecerían a dos calidades inferiores de estación (PN^o 101 y 14).

Tabla 2.4: *Test de los rangos múltiples. Las equis (X) alineadas indican similar calidad de estación.*

PN^o	Nº MUESTRAS	IE_{25} medio [m]	GRUPOS HOMOGÉNEOS
101	2	17,25	X
14	2	20,95	X
31	2	24,50	X
20	2	26,40	XX
100	2	26,75	XX
19	2	26,90	XX
15	2	28,45	X

El restringido número de muestras (14 árboles en siete parcelas) sumado a la repeticiones de similares calidades de estaciones (IE_{25} 26-27 m), limitó las bondades del estudio. Pero a pesar de ello se logró una buena distribución de calidades de estación. En términos generales se puede afirmar que se lograron cuatro grupos de calidades de estación, que abarcan en gran medida el rango de crecimiento de *Pinus radiata* en la provincia, aunque no tengan, quizás, el número apropiado de repeticiones (Tabla 2.4). Con estos datos se pasó a estudiar las relaciones entre los patrones de crecimiento y las calidades de estación.

2.2.2.2. Patrones de Crecimiento por Calidad de Estación

Los patrones del crecimiento en altura son expresados por el efecto combinado de los coeficientes o parámetros A , k & c de la función. La influencia de la calidad de estación sobre ellos ha sido variable según los diferentes estudios llevados a cabo por otros autores (Lundgren & Dolid, 1970; Beck, 1971; García, 1984, Monserud, 1984, Thrower & Goudie, 1992). Además estos están íntimamente ligados y un valor alto o bajo de determinado coeficiente puede ser compensado por el valor de otro (Carmean, 1972).

Confrontados gráficamente los valores de los parámetros versus los IE_{25} , se han encontrado algunas interesantes tendencias de las nubes de puntos.

Relación entre el IE_{25} y el Parámetro A

Este parámetro representa la asíntota de la función, es decir la altura asíntótica a la que se acercaría la función cuando la edad tiende a infinito. Este es el parámetro que ha mostrado la tendencia más clara con el IE_{25} . El ANAVA da un valor de $F= 10,60^*$, señalando que existen diferencias significativas entre los valores de los parámetros obtenidos en las distintas parcelas. La variación dentro de las parcelas es muy aceptable con un coeficiente de variación de 8,5%.

Estas diferencias se pueden explicar satisfactoriamente con un modelo lineal recíproco, que es el siguiente:

$$A = \frac{1}{0,0723538 - 0,00171022 \cdot IE_{25}} \quad (2.2)$$

$$R^2: 90\%$$

El modelo logra explicar el 90% de la variación del parámetro. En la Fig. 2.3 se puede observar la buena adaptación del modelo 2.2 ajustado a los datos.

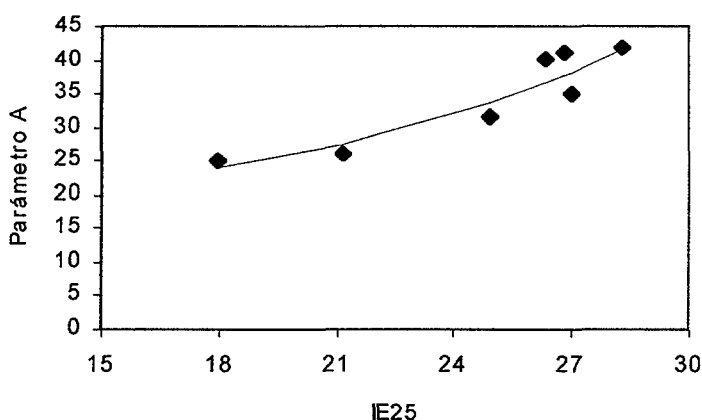


Figura 2.3: Ajuste de una función recíproca entre el parámetro A y el IE_{25} -valores promedios por parcela-.

Relación entre el IE_{25} y el Parámetro k

El parámetro k está relacionado con alguna tasa de crecimiento de la función. Algunos autores (Vázquez, 1989; Amaro *et al.*, 1998) se la asignan a aquella con la que se aproxima a la asíntota; efectivamente, se ha encontrado que su valor se corresponde con la tasa de crecimiento relativa con la que se alcanza aproximadamente el 99% del valor asintótico A . En términos generales, a mayor valor de k , mayor es la tasa de crecimiento inicial y más rápidamente la curva se aproxima al valor asintótico.

En este caso el correspondiente *ANAVA* indicó que no existirían diferencias significativas entre los diferentes valores del parámetro de las parcelas. El valor de F es 3,42 n.s..

En el análisis gráfico de los valores de los parámetros versus los IE_{25} , se ha notado que el valor del parámetro de la parcela ubicada en la peor estación tiene un comportamiento bien diferencial al resto, tanto que si se elimina se lograría identificar una leve tendencia (Fig. 2.4). Además la variabilidad interna, es decir el rango del parámetro de las parcela, se mostró bastante alta con un coeficiente de variación del 20%. Por otro lado esto podría estar indicando que si se aumentara el número de muestras la citada leve tendencia podría desaparecer.

Eliminando el citado dato de la PN^o 101, el mejor ajuste se obtuvo con la función lineal de la recta, que logra explicar el 63% de la variación del parámetro y un coeficiente de correlación de -0,80 que señala la relación lineal inversa entre el parámetro y el IE_{25} .

$$k = 0,23199 - 0,0061049.IE_{25} \quad (2.3)$$

R^2 : 63%

EEE: 0,01293

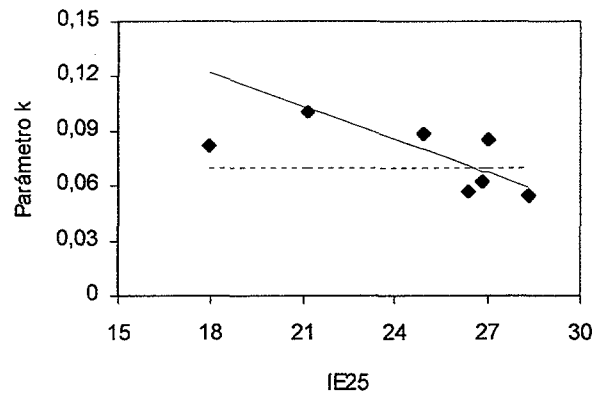


Figura 2.4: Ajuste de la ecuación de la recta entre el parámetro k y el IE_{25} . La línea discontinua indica el valor promedio del parámetro.

Relación entre el IE_{25} y el Parámetro c

El parámetro c tiene influencia en el posicionamiento del punto de inflexión. En términos generales a menor valor del parámetro, anterior es el punto de inflexión de la función. En este sentido el parámetro k también está influenciando este fenómeno, ya que a igual valor de c , cuanto mayor es el valor del parámetro k , anterior es el punto de inflexión (siempre y cuando el parámetro A se mantenga también constante).

El ANAVA señala la ausencia de diferencias significativas entre los valores del parámetro de las parcelas, con un valor de $F=2.13$ n.s. y un coeficiente de variación interna del 22,3%. A pesar de ello, analizado el gráfico de dispersión entre ambas variables se logró vislumbrar una leve tendencia. El comportamiento de este parámetro sería similar al que posee el parámetro k , inversamente relacionado con el IE_{25} .

De la misma forma que con el parámetro k el valor de parámetro c proveniente de la PN°101, que se corresponde con la peor calidad de estación, tiene un comportamiento que provoca una tendencia no lineal entre las variables (Fig. 2.5). Considerando la muestra completa, con un polinomio de segundo grado se logró explicar el 64% de la variación del parámetro.

$$c = -2,63258 + 0,520538.IE_{25} - 0,0132999.IE_{25}^2 \quad (2.4)$$

R^2 : 64%

EEE: 0,252197

Eliminando el citado dato es posible ajustar una recta con una explicación del 67% de la variación del parámetro. Pero aquí también es válida la consideración realizada para el parámetro k , respecto a que un aumento de la cantidad de datos podría provocar que desaparezca la actual tendencia y confirma los resultados del ANAVA, sobre que no existen diferencias significativas entre los valores de los parámetros de las diferentes estaciones.

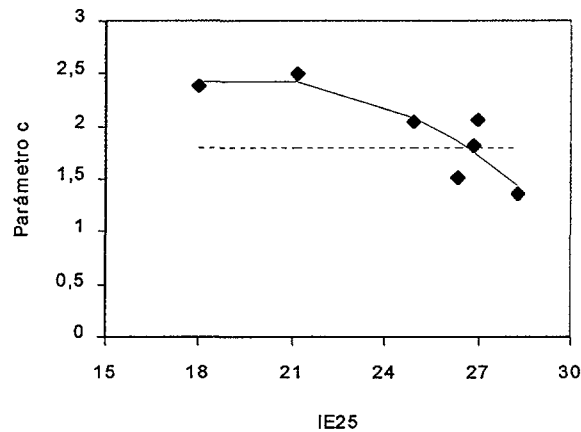


Figura 2.5: Ajuste de una función entre el parámetro c y el IE_{25} . La línea discontinua representa el valor promedio del parámetro.

Relación entre los Parámetros

Por otro lado, se investigó la correlación entre los parámetros del modelo. En los antecedentes registrados no se ha encontrado que se haya abordado el tema, salvo por Castilla & Prieto (1992), que emplearon la correlación entre parámetros en una función no lineal de altura-edad, sin hacer comentarios al respecto.

Por medio de la matriz de correlaciones se encontraron interesantes relaciones (Tabla 2.5).

Tabla 2.5: Matriz de correlaciones entre los parámetros obtenidos en los ajustes de la función 2.1.

VARIABLES	A	c	k	IE ₂₅
A	1,0	-0,93	-0,87	0,92
C	-0,93	1,0	0,91	-0,83
k	-0,87	0,91	1,0	-0,62
IE ₂₅	0,91	-0,83	-0,62	1,0

En la matriz puede encontrarse una fuerte relación lineal entre los parámetros k - c ($r=0,91$) y una muy aceptable relación entre A - k ($r=-0,67$) y A - c ($r=-0,62$).

Al volcar en un gráfico los pares de datos, confrontando de a dos parámetros por vez, se puede observar que todos tienen tendencias lineales (Fig. 2.6, 2.7, 2.8). Los ajustes de estas tendencias se presentan a continuación.

Parámetros c-A

$$c = 3,85694 - 0,0550713.A \tag{2.5}$$

R^2 : 86,2%

r : - 0,93

EEE: 0,171345

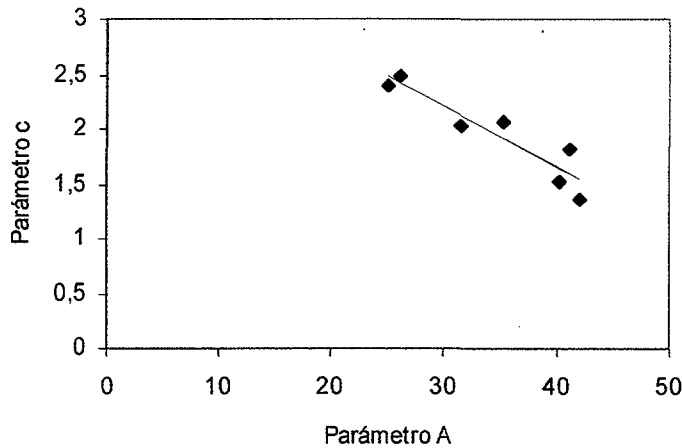


Figura 2.6: Ajuste lineal entre los parámetros c - A de la función 2.1.

Parámetros k-c

$$k = 0,00123038 + 0,0380624 \cdot c \quad (2.6)$$

R^2 : 82,8%

r: 0,91

EEE: 0,00802

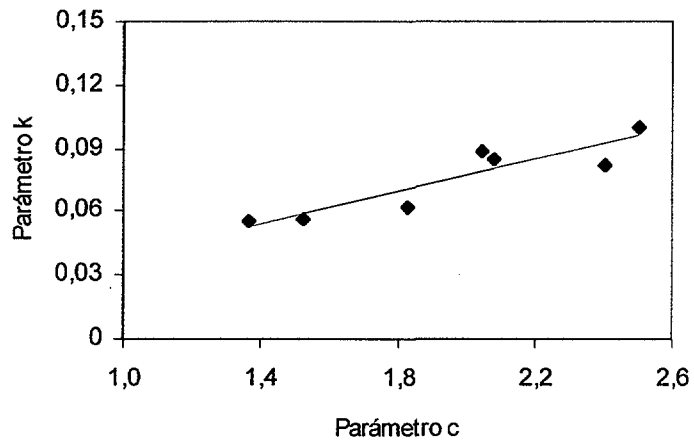


Figura 2.7: Ajuste lineal entre los parámetros k-c de la función 2.1.

Parámetros k-A

$$k = 0,149862 - 0,00214917 \cdot A \quad (2.7)$$

R^2 : 75,0%

r: - 0,87

EEE: 0,00965918

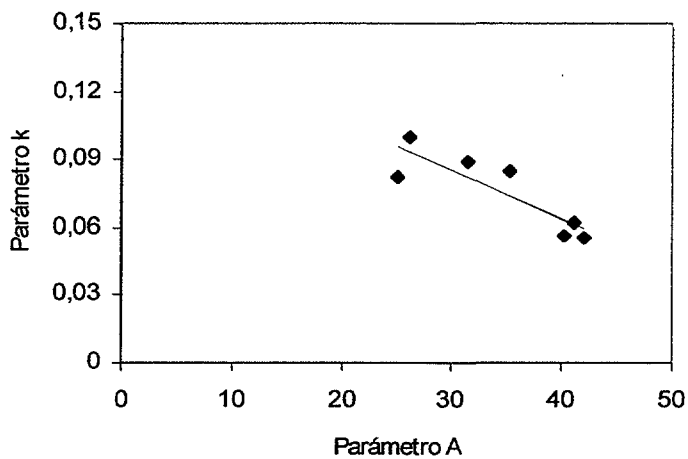


Figura 2.8: Ajuste lineal entre los parámetros k-A de la función 2.1.

Estas relaciones, arriba expuestas y que se discutirán más adelante, pueden ser muy importantes al momento de desarrollar un sistema polimórfico de altura-edad.

Todo indicaría que los tres parámetros del modelo de Bertalanffy-Richards están influenciados, directa o indirectamente, por la calidad de estación expresada a través del IE_{25} . Ello reforzaría la idea de un cierto polimorfismo para el crecimiento en altura de *Pinus radiata* en la provincia de Guipúzcoa.

En relación directa con el IE_{25} , el parámetro A fue el que mostró la relación más clara. Ella también ya ha sido establecida por otros autores para otras especies (Lundgren & Dolid, 1970; Beck, 1971; Thrower & Goudie, 1992). Un análisis similar del comportamiento paramétrico también fue realizado por CONAF (1980) en el desarrollo de curvas de calidad de estación para *Pinus radiata* en Chile. Trabajando con la función de Bertalanffy-Richards, se relacionó sus parámetros con el IE . Los comportamientos citados allí fueron diferentes a los encontrados para Guipúzcoa; el parámetro k estaba positivamente correlacionado con el IE_{25} , pero lo más llamativo fue que al parámetro A lo encontraron inversamente correlacionado con el IE_{25} , algo inusual si se considera los antecedentes en contrario que obran.

Los parámetros k & c mostraron relaciones más débiles con el IE_{25} . En ambos casos los valores obtenidos en la parcela de peor calidad de estación (PNº101) rompieron una tendencia lineal descendente con el IE_{25} , actuando como datos anormales o simplemente informando que no existe una dependencia muy fuerte entre las variables. De todas maneras con el IE_{25} se ha logrado explicar casi el 65% de la variación de ambos parámetros. Y ello asume una mayor importancia para la predicción considerando que si adoptamos un valor promedio de los parámetros, como suele hacerse cuando no se encuentra una relación clara, este promedio solamente estará explicando el 35% de la variación de los parámetros; que constituye justamente, el porcentaje que no han logrado explicar los modelos lineales 2.2 y 2.3. Además observando las Fig. 2.4 y 2.5 se podrá apreciar el riesgo de sesgo que corren las estimaciones del valor del parámetro al adoptar un valor promedio, si efectivamente se confirman las tendencias de los parámetros. En un sistema anamórfico, ambos parámetros actúan como constantes, por lo que de adoptar un modelo proporcional se incurriría en estos sesgos. Por otro lado si se confirma la ausencia de tendencia de los parámetros, el modelo anamórfico sería no sesgado.

Indirectamente los parámetros k & c se estarían relacionando con el IE_{25} al presentar un correlación inversa lineal con el parámetro A (funciones 2.5 y 2.7) y a la vez una correlación positiva lineal entre ellos (función 2.6). Todo ello ratifica el descenso de los valores de ambos parámetros con la mejora en la calidad de estación.

La relación de estos parámetros con la calidad de estación presenta sus peculiaridades. Por un lado el parámetro c que desciende con la mejora de la calidad de estación no hace más que confirmar el principio de la culminación más temprana del incremento corriente anual (ICA) a medida que mejora la estación. Este fenómeno ya fue señalado por varios autores (Beck, 1971; Carmean, 1972; Klepac, 1983). Por otro lado, el comportamiento del parámetro k es lo que ha roto con los resultados tradicionales al descender con la mejora de la calidad de estación. Tradicionalmente este parámetro, relacionado con la tasa de crecimiento de la función, se lo ha asociado positivamente con la calidad de estación (excepto en los sistemas anamórficos en los que permanece constante). Es lógico pensar que la tasa de crecimiento sea superior en los mejores sitios, pero aquí parece ocurrir lo contrario y es justamente en este análisis donde la interrelación y compensación entre los parámetros juega un rol importante en la búsqueda de una explicación a este fenómeno. Para comprender esto se presenta en la Tabla 2.6 las edades de culminación y valores absolutos de los ICA estimados en las parcelas. Efectivamente allí se puede observar que el rango de edades de culminación de los ICA es de 5 años y a veces no respetando la supuesta mejor calidad de estación (IE_{25} mayor).

Estos resultados estarían indicando en términos generales una culminación temprana y similar para todas las estaciones y además resalta la compensación que los valores de los parámetros provocan en dichas culminaciones. Si, en cambio, el parámetro K estuviera positivamente correlacionado con la calidad de estación, los momentos de culminación de los ICA entre las diferentes estaciones se separarían más claramente.

Tabla 2.6: *Edades de culminación y los valores absolutos de los incrementos corrientes anuales (ICA) en altura dominante en cada parcela.*

PARCELA	IE_{25} [m]	EDAD [años]	$I.C.A.$ máximo [m/año]
101	17,3	11	0,964
14	21,0	9	1,220
31	24,5	8	1,390
20	26,4	10	1,338
100	26,8	7	1,301
19	26,9	9	1,469
15	28,5	6	1,432

Los ICA de las parcelas se separan en dos grupos a partir de los 20 años y así continúan hasta edades avanzadas (Fig. 2.9).

Estas culminaciones tempranas originan tasas de crecimiento en altura elevadas a estas edades juveniles para todas las estaciones, encontrando un rápido descenso de las mismas hasta los 12 años aproximadamente. Durante este período las mayores tasas de crecimientos correspondieron a las peores calidades de estación y la más baja a la mejor, encontrándose el resto en una faja intermedia sin ninguna relación con la calidad de estación. Esto está directamente relacionado con las variaciones de los parámetros encontradas.

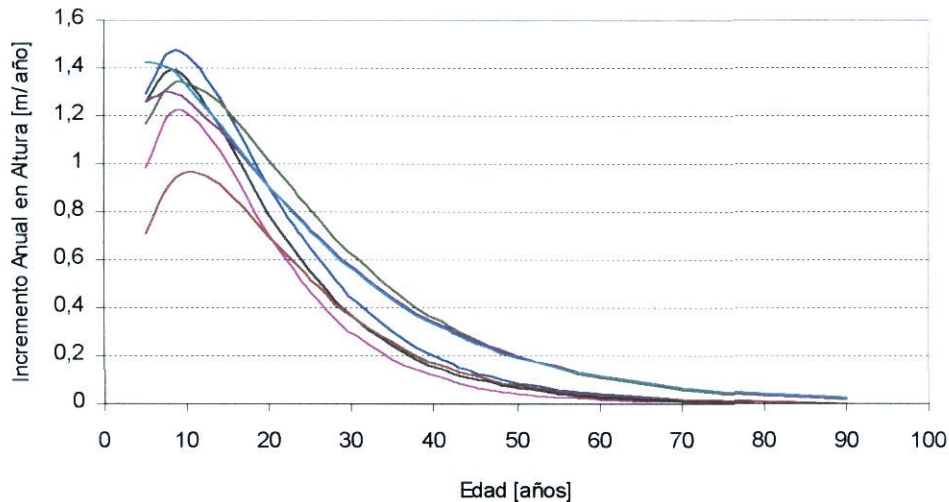


Figura 2.9: Vista general de las curvas de Incremento Corriente Anual (ICA) en altura dominante para las parcela estudiadas.

Para algunos autores un motivo para la elección de un modelo ha sido el valor *natural* que se obtenga del parámetro asintótico producto del ajuste, es decir que dicho valor sea biológicamente aceptable. En el presente estudio tal criterio se ha desechado, amén que tanto en los ajustes individuales como en los promedios por parcelas se hayan obtenido valores de alturas asintóticas *factibles* de ser alcanzadas por las plantaciones de *Pinus radiata* en la provincia. Se ha considerado que la altura asintótica es un valor al que se tiende, quizás a edades no biológicas (la asíntota la función se aproxima cuando el tiempo tiende al infinito) y que lo importante es que dentro del rango de estudio o interés las funciones se comporten lógicamente. El interés para este estudio ha sido expresar los patrones de crecimiento hasta la edad de 40 años, edad que posiblemente constituya el turno máximo de la especie. En este sentido se puede observar en la Tabla 2.7 los valores *naturales* de las alturas dominantes que, a dicha edad, predicen las funciones.

Tabla 2.7: Alturas dominantes que se predicen a los 40 años con las curvas polimórficas.

PNº	IE ₂₅ [m]	H40 [m/40 años]
19	26,9	32,7
14	21,0	25,0
20	26,4	35,2
31	24,5	29,7
100	26,8	34,0
101	17,3	22,8
15	28,5	35,8

2.2.2.3. Anamorfismo vs. polimorfismo

Establecidas las relaciones entre los parámetros y el IE_{25} se comenzó a estudiar el grado de polimorfismo del crecimiento en altura dominante de *Pinus radiata*, y con ello confirmar las hipótesis planteadas con dichas relaciones. Para ello se procedió a ajustar el modelo general 2.1 pero reemplazando uno, dos y los tres parámetros originales por las relaciones encontradas entre ellos y el IE_{25} (indexar el parámetro). Ello permite obtener tres modelos reparametrizados distintos, de los cuales uno es anamórfico y los restantes dos polimórficos estrictos. Ellos se presentan a continuación:

OPCIÓN A: modelo Bertalanffy-Richards de siete parámetros. Se indexan los tres parámetros de la función 2.1 empleando las relaciones locales 2.2, 2.3 y 2.4. Es un modelo polimórfico estricto.

$$H_o = \left(\frac{1}{0,0689 - 0,00151 \cdot IE_{25}} \right) \cdot (1 - \exp^{-(0,1164 - 0,00118 \cdot IE_{25}) \cdot t})^{-4,147 + 0,619 \cdot IE_{25} - 0,0144 \cdot IE_{25}^2} \quad (2.8)$$

$R^2(aj)$: 99,0 %.

EEE: 0,98 metros.

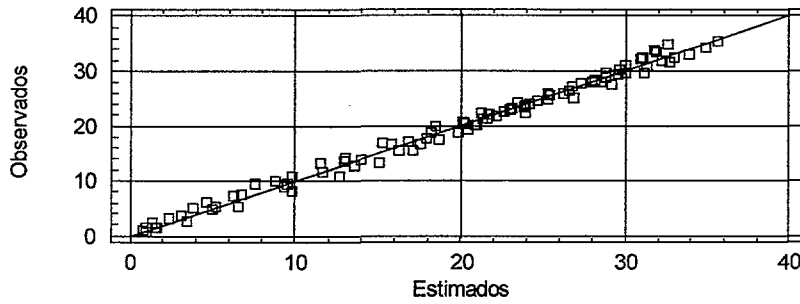


Figura 2.10: valores de alturas dominantes observados y estimados por el modelo Bertalanffy-Richards de siete parámetros.

El modelo 2.8 muestra que a pesar de la similitud de los valores de sus parámetros con los de las funciones independientes 2.2, 2.3 y 2.4, hay diferencias en todos ellos que han logrado optimizar la predicción (Fig. 2.10), logrando una precisión del 99%.

OPCIÓN B: modelo Bertalanffy-Richards de cinco parámetros. Se indexan los parámetros A & k de la función general, mientras que el parámetro c se mantiene constante (global). Se emplean para tal fin las funciones 2.2 y 2.3. El modelo es también polimórfico estricto.

$$H_o = \left(\frac{1}{0,0576 - 0,001136 \cdot IE_{25}} \right) \cdot (1 - \exp^{-(0,0464 + 0,00098 \cdot IE_{25}) \cdot t})^{1,80266} \quad (2.9)$$

$R^2(a_j)$: 99,6 %.

EEE: 0,661 metros

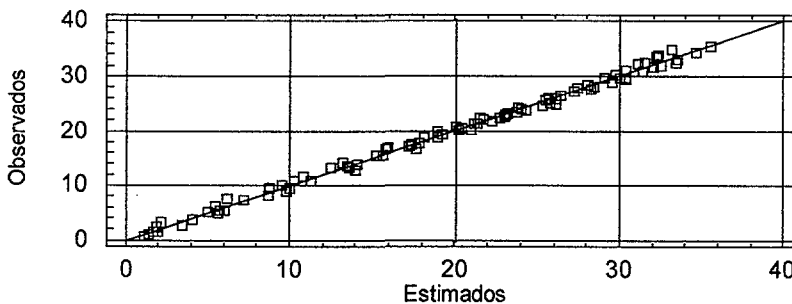


Figura 2.11: valores de alturas dominantes observados y estimados por el modelo Bertalanffy-Richards de cinco parámetros.

OPCIÓN C: modelo Bertalanffy-Richards de cuatro parámetros. Se indexa solamente el parámetro asintótico A , dejándose el resto constante. Se emplea la función 2.2. El modelo es anamórfico.

$$H_o = \left(\frac{1}{0,06483 - 0,001415 \cdot IE_{25}} \right) \cdot (1 - \exp(-0,071848 \cdot t))^{1,81031} \quad (2.10)$$

$R^2(aj)$: 99,5 %.

EEE: 0,692 metros

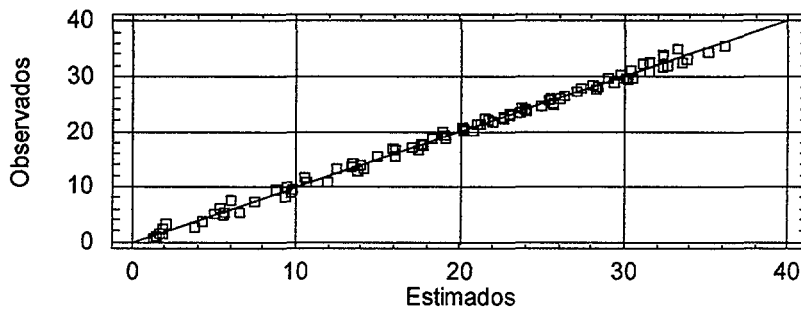
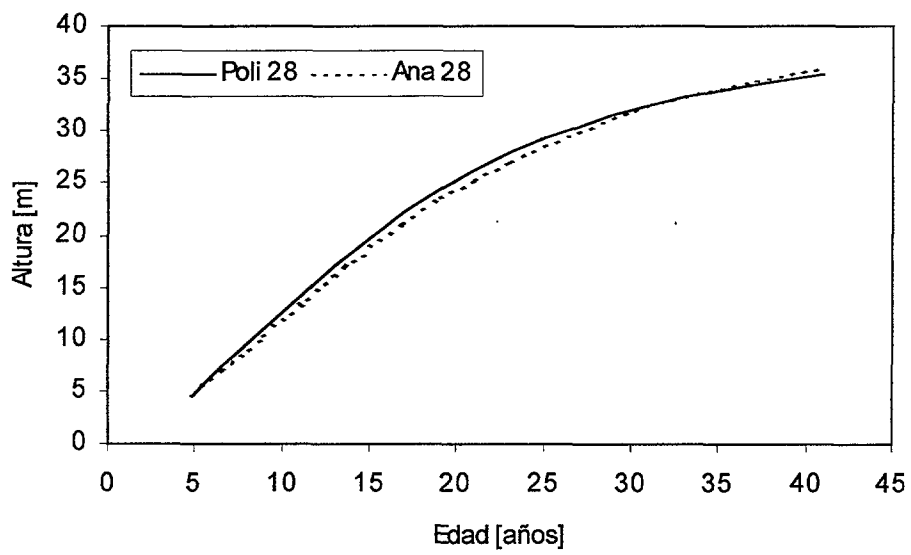
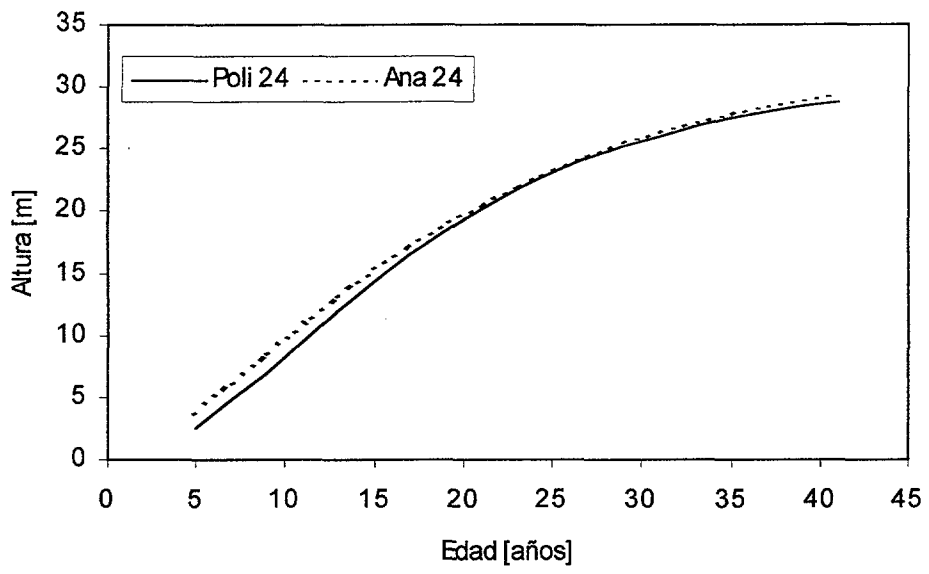


Figura 2.12: valores de alturas dominantes observados y estimados por el modelo Bertalanffy-Richards de cuatro parámetros.

Los resultados de las reparametrizaciones son concluyentes; en primer lugar las tres opciones dieron excelentes ajustes; en segundo lugar, de los tres, el polimórfico con siete parámetros fue el que arrojó el peor ajuste y finalmente el modelo anamórfico sería tan útil para describir los patrones de crecimiento como el modelo polimórfico más complejo.

Estos resultados enfatizan que el polimorfismo del crecimiento en altura se produce a edades tempranas, confirmando lo notado en la Tabla 2.6 y Fig. 2.9, respecto que no existen diferencias apreciables en las culminaciones de los incrementos corrientes anuales. A partir de estas edades tempranas los crecimientos en las diferentes estaciones son casi proporcionales entre sí. Las figuras también son elocuentes al respecto (Fig. 2.13), se puede apreciar que para tres IE_{25} las diferencias entre las curvas anamórficas y polimórficas son pequeñas. Se hace la salvedad que las mayores diferencias entre las curvas anamórfica y polimórfica ajustadas se producen en la peor estación (IE_{25} 17,3 m) y cuando se extrapola a las mejores calidades de estación.



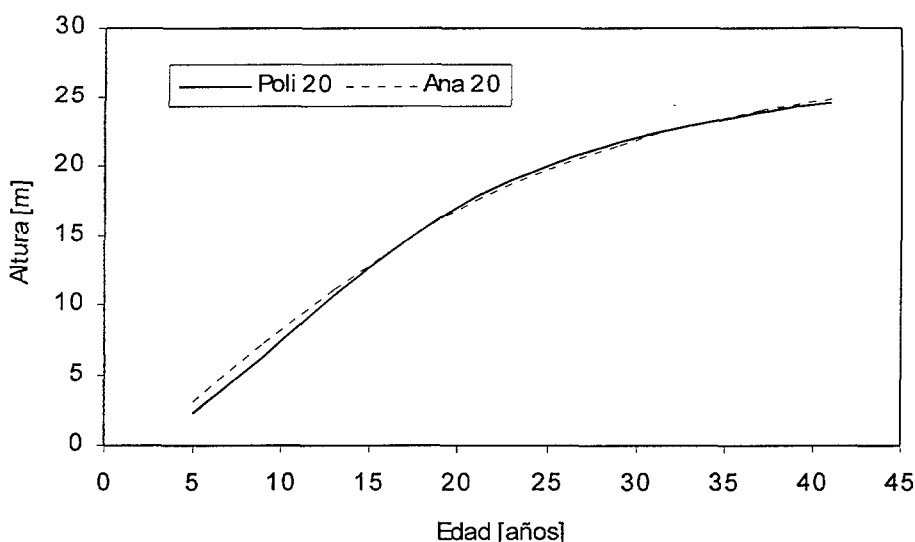


Figura 2.13: Comparación de las curvas anamórficas y polimórfica para los IE₂₅ de 20, 24 y 28 metros.

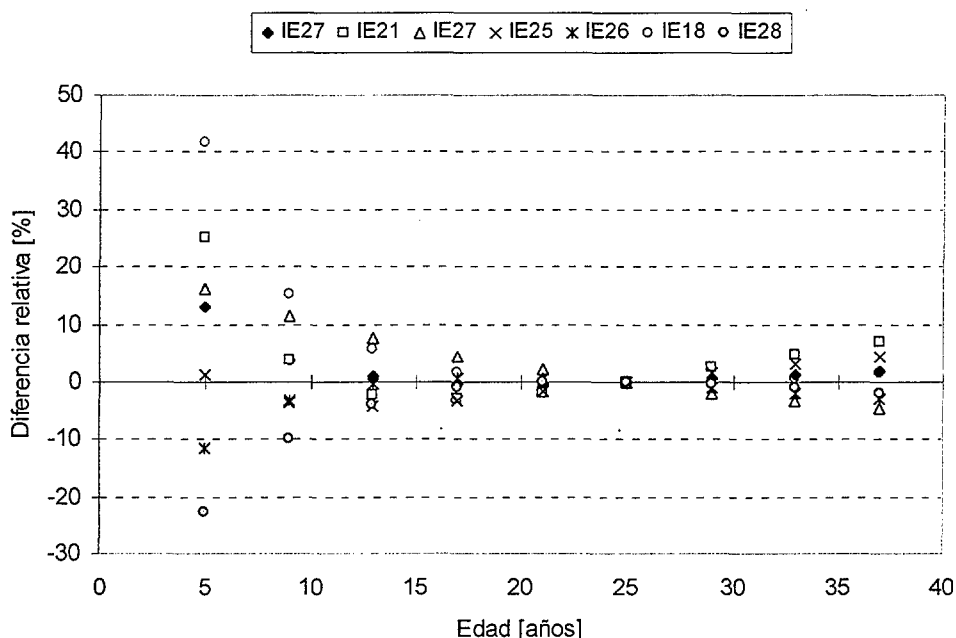


Figura 2.14: Diferencias en las alturas dominantes estimadas entre un sistema anamórfico y otro polimórfico.

Si se analiza la Fig. 2.14 se puede observar la tendencia y magnitud de las diferencias entre las curva promedio de cada parcela y la correspondiente anamórfica. A edades tempranas (hasta los diez años), las diferencias son relativamente altas y éstas no muestran aparentemente asociación con la correspondiente calidad de estación. Las diferencias van disminuyendo con la edad casi simétricamente hasta desaparecer como es lógico a la edad de referencia (25 años). Se puede decir que las estimaciones de la altura dominante son insesgadas y con errores de estimación

menores al 10%, excepto a edades menores a los diez años. El sesgo mayor se presentó con la peor calidad de estación (IE_{25} 18 m), que es una clase en la cual se considera, deben aumentarse el número de muestras para mejorar la estimación.

Es conocida la incapacidad de las curvas anamórficas para predecir alturas (y por ende IE_{25}) a edades tempranas. Ejemplo de ello se aprecia en la Fig. 2.14. Por ello no son recomendables para estimar una altura temprana o el IE_{25} de un rodal juvenil. Pero este error podría ser menor si las funciones se utilizaran para predecir el crecimiento o incremento, es decir la tasa de cambio esperada de la altura. Posiblemente a edades cercanas a los diez años dicho error en el incremento en altura sea aceptable.

Un aspecto importante respecto al comportamiento de los parámetros, es lo que ocurrió con la relación entre el parámetro k y el IE_{25} en el modelo 2.9, se puede observar que cambió la tendencia respecto de la encontrada en la función 2.3. Es decir, se hizo creciente el valor del parámetro asociado a la tasa de crecimiento con la mejora de la calidad de estación. Siguiendo la misma línea de razonamiento, si se analiza la relación entre los parámetros k & A de la función 2.9, encontramos una muy buena correlación positiva entre ambos (Fig. 2.15), y contraria a la hallada en un principio.

$$k = 0,0269 \cdot \ln A - 0,0244 \quad (2.11)$$

$R^2: 99,8 \%$

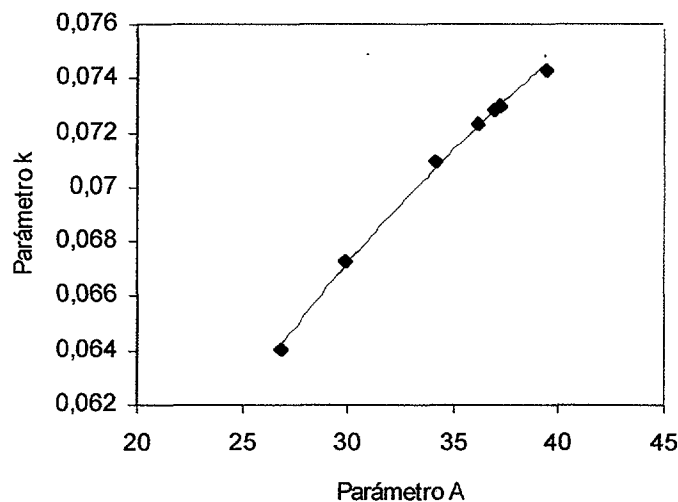


Figura 2.15: Relación entre los valores de los parámetros K - A de la función 2.9.

El estudio de los comportamientos de los parámetros de la función 2.1 señala como hecho importante que, más allá del significado que cada uno posea en la función, existe una fuerte interrelación entre ellos; de manera que un determinado patrón podría expresarse por diferentes combinaciones de los valores de ellos.

2.2.2.4. Calibración de los Modelos

La calibración de los modelos altura-edad debe realizarse cuando uno o varios de sus parámetros son estimados a través de otra función complementaria. Esta dependencia o correlación de funciones genera una inconsistencia típica que consiste en que, una vez estimado el IE_{25} del rodal, el mismo no coincide con la altura predicha por el modelo a la edad base. Esta usualmente pequeña inconsistencia debe ser corregida. El procedimiento comúnmente empleado es una corrección proporcional de la asíntota de la función. Ibáñez (1989) utilizando el modelo de Bertalanffy-Richards de nueve parámetros, buscó la solución a través de ajustar la asíntota con un polinomio de tercer grado entre los valores asíntóticos de la función y los IE_{25} . Álvarez *et al.* (1999) aplicando también la función de Bertalanffy-Richards pero de cuatro parámetros y anamórfica, para solucionar el problema volvió a correlacionar el IE_{25} divergente con el IE_{25} real a través de una función potencial, transformando la función original en una de seis parámetros. Si bien se supone hallada, total o parcialmente, la solución a la inconsistencia, se considera que es posible realizar la corrección proporcional de la asíntota de una manera más simple, asegurando una consistencia perfecta. Esta última es la que se aplicó para el modelo polimórfico estricto de *Pinus radiata*.

Los modelos seleccionados para la validación del crecimiento altura-edad fueron el polimórfico estricto 2.9 y el anamórfico 2.10. La selección se basó en la precisión lograda por ambos y la mayor simplicidad funcional.

Calibración del Modelo Anamórfico (2.10): si bien los modelos anamórficos no deben ser calibrados, al poseer el parámetro asíntótico (A) indexado se realiza el reajuste del modelo a los fines de no requerir el cálculo de dicho parámetro. El procedimiento es el siguiente (Clutter *et al.*, 1983; von Gadow & Hui, 1999):

Sí:

$$H_o = A \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]^c \quad (a)$$

A la edad base se estima el IE_{25} :

$$IE_{25} = A \cdot \left[1 - \exp^{(-k \cdot t_b)} \right]^c \quad (b)$$

Se despeja A de (b):

$$A = \frac{IE_{25}}{\left[1 - \exp^{(-k \cdot t_b)} \right]^c} \quad (c)$$

Reemplazando (c) en (a) y reordenando:

$$H_o = IE_{25} \cdot \left[\frac{1 - \exp^{(-k \cdot t)}}{1 - \exp^{(-k \cdot t_b)}} \right]^c \quad (d)$$

La función (d) explícita queda de la siguiente manera:

$$H_o = IE_{25} \cdot \left[\frac{1 - \exp^{(-0,071848 \cdot t)}}{0,834071781} \right]^{1,81031} \quad (e)$$

También se puede expresar:

$$H_o = 1,3888208 \cdot IE_{25} \cdot \left[1 - \exp^{(-0,071848 \cdot t)} \right]^{1,81031} \quad (2.12)$$

Calibración del Modelo Polimórfico Estricto (2.9): la inconsistencia planteada es típica de los modelos polimórficos estrictos. Los pasos para llegar a la calibración del modelo son los planteados anteriormente, quedando el modelo polimórfico estricto de la siguiente manera:

$$H_o = IE_{25} \cdot \left[\frac{1 - \exp^{-(0,0463761+0,0009867 \cdot IE_{25}) \cdot t}}{1 - \exp^{-(1,1594025+0,0246675 \cdot IE_{25})}} \right]^{1,80266} \quad (2.13)$$

Si se pretende estimar la función de crecimiento particular para un IE_{25} , se calcula el valor del parámetro A , de la misma forma que en (c).

2.2.2.5. Validación

Los resultados se presentan analítica y gráficamente (Tabla 2.8 y Fig. 2.16).

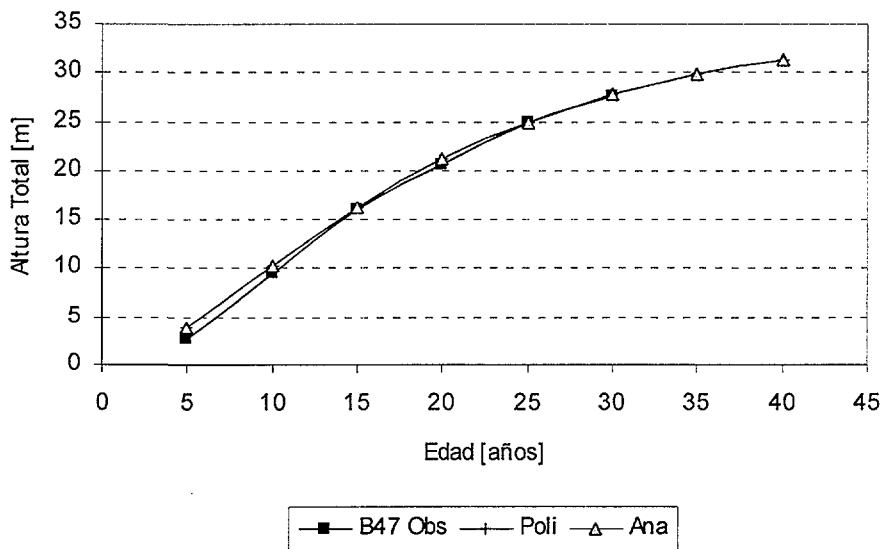
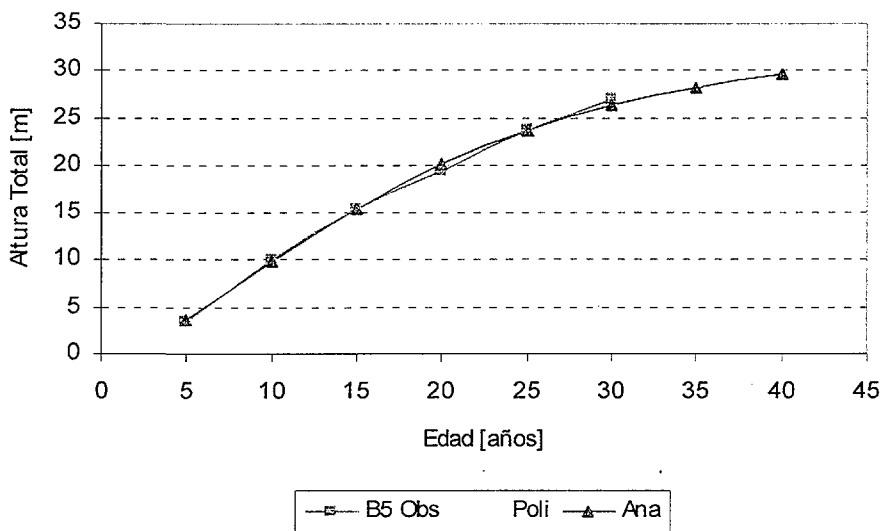
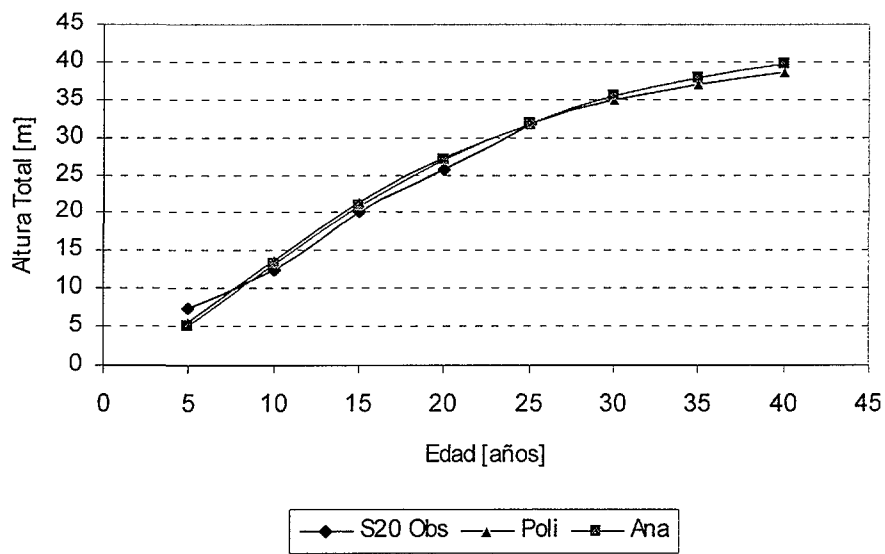
Se emplearon ambos modelos seleccionados para confrontarlos con las series de crecimiento reales obtenidas de Madrigal *et al.* (1975).

Tabla 2.8: Errores medios absolutos obtenidos al confrontar las series reales de crecimientos (Madrigal *et al.*, 1975) con las funciones calibradas 2.9 y 2.10.

Parcela	IE_{25}	ANAMÓRFICO		POLIMÓRFICO	
		<i>E.A.M.</i>	<i>E.A.M. %</i>	<i>E.A.M.</i>	<i>E.A.M. %</i>
	[m]	[m]	[%]	[m]	[%]
B-4	25,0	1,95	11,7	1,91	11,5
B-5	23,7	0,49	2,5	0,45	2,4
B-14	29,9	0,84	3,5	0,83	3,5
B-15	24,9	1,16	6,1	1,20	6,3
B-44	24,2	0,50	2,9	0,46	2,6
B-47	25,0	0,51	2,6	0,48	2,5
S-10	28,7	1,16	5,8	1,38	6,9
S-11	29,1	1,51	7,6	1,74	8,7
S-13	27,8	0,15	0,8	0,28	1,4
S-14	23,6	2,19	14,3	2,08	13,5
S-20	31,8	0,88	3,9	1,32	5,9
S-23	24,5	1,64	9,9	1,58	9,6
S-24	25,9	2,06	12,0	2,08	12,1
Promedio	26,5 m	1,2 m	6,4 %	1,2 m	6,7 %

Los resultados de confrontar los modelos calibrados 2.9 y 2.10 muestran los errores promedios a lo largo de la vida de un árbol o de la porción dominante de un rodal. Solamente tres árboles han obtenido *EAM* que rondan los dos metros y en ocho el *EAM* fue de aproximadamente un metro o menos. En cerca de la mitad de los casos el modelo anamórfico presentó mejores *EAM* y para ambos los valores promedios fueron similares y aceptables (Tabla 2.8).

Desde el punto de vista del análisis de los patrones de crecimiento los gráficos mostrados en la Fig. 2.16 son más elocuentes para ello.



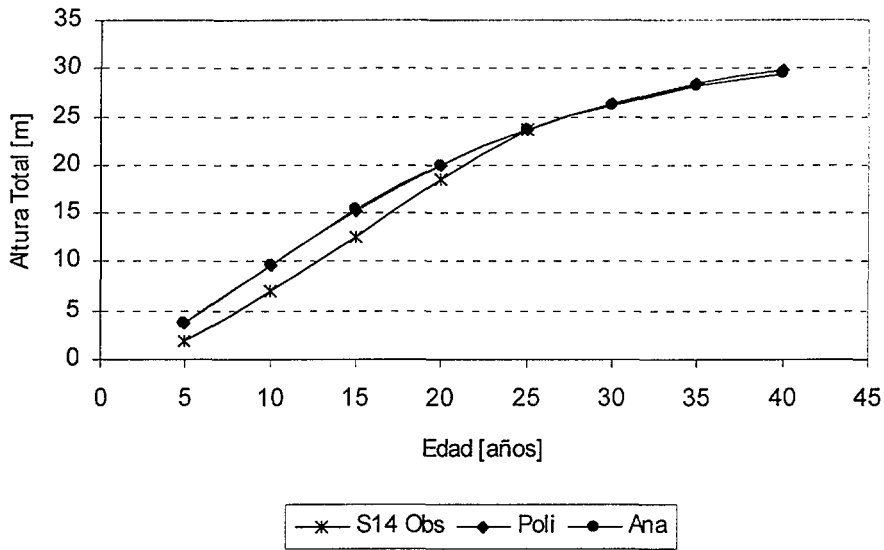


Figura 2.16: Cuatro confrontaciones gráficas entre las series reales de crecimiento (Obs) y las curvas anamórficas (Ana) y polimórficas (Poli) correspondientes. B47, S20, B5, S14 son las denominaciones de las parcelas.

En términos generales los modelos están demostrando una muy buena aptitud para describir los patrones de crecimiento de la altura dominante en las diferentes calidades de estación. Aun en los casos donde se encontraron divergencias (sobre todo a edades tempranas), como puede verse en el ejemplo S-14 presentado (Fig. 2.16), puede apreciarse que la predicción del cambio o incremento de la altura por períodos puede no tener errores significativos. También se ratifica la buena aptitud descriptiva y predictora de los modelos con el ejemplo S-20 que con un IE_{25} de 31,8 m está fuera del rango de estudio. También se señala que al emplear en la validación los árboles provenientes de las parcelas de Vizcaya, se están extrapolando los modelos, y aun así dan lugar a una predicción con exactitud aceptable.

A la luz de los resultados y análisis realizados se puede confirmar el carácter anamórfico del crecimiento en altura de *Pinus radiata* en provincia de Guipúzcoa. No se han detectado diferencias significativas en las curvas anamórficas del modelo 2.12 con las polimórficas estrictas del modelo 2.13, por lo que sería indistinto usar uno u otro, pudiéndose tomar en consideración para la elección de alguno de ellos, la facilidad de manipulación o la necesidad de predecir el crecimiento a edades juveniles.

2.3. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTACIÓN Modelos del Intercepto de Crecimiento

Comenzar con la correcta clasificación de la estación es particularmente importante desde el momento que definirá para una especie su producción potencial. La metodología de clasificación a través del Índice de Estación (*IE*: altura dominante a una edad típica o de referencia) ha sido la más empleada para la planificación y gestión forestal, ya que está fuertemente relacionada, entre otras variables, con el potencial productivo de una estación (Vanclay, 1992; Nigh, 1996). Bajo este aspecto los intentos por clasificar una estación han dividido el problema en dos: la evaluación en rodales jóvenes (evaluación temprana) y la evaluación en rodales en fases más avanzadas (evaluación tardía) (Chauchard *et al.* 2000).

Obtener estimaciones acertadas del *Índice de Estación* rodales jóvenes es a menudo difícil; los sistemas tradicionales de curvas altura dominante - edad fracasan debido a las siguientes circunstancias:

- a edades muy tempranas los árboles aún se encuentran bajo la influencia de la competencia interespecífica y,
- la dispersión de las alturas dominantes a estas edades es aún muy baja, y por ende las diferencias entre las distintas calidades de estación.

Hasta hoy no se ha abordado el problema de la evaluación temprana de la calidad de estación para plantaciones de *Pinus radiata* en el País Vasco. En el caso de la evaluación tardía y con el empleo de la altura dominante, han habido tres estudios publicados. En primer lugar, Madrigal *et al.* (1975) desarrollaron a partir de datos de parcelas temporales tres familias de curvas anamórficas estratificadas en tres clases de calidad e independientes entre sí. Para el ajuste emplearon la función recíproca de Hossfeld-Prodan. Más tarde, Castilla & Prieto (1992) generaron funciones polimórficas estrictas empleando como fuente de datos 38 parcelas permanentes, con dos mediciones. Por otra parte, Espinel *et al.* (1997) estratificaron en las mismas clases de calidad de Madrigal *et al.* (1975), los datos provenientes del 2º Inventario Forestal Nacional y ajustaron la función de Korf-Schumacher independientemente para cada uno de estos estratos de calidad de estación.

Pero, en ninguno de estos trabajos se enfatiza el uso del *IE* como clasificador de la estación, como un paso previo para la elección de la curva de crecimiento en altura dominante. En apariencia se cita como un instrumento de comparación entre calidades y de hecho es una de las finalidades del índice. De la manera en que los autores han resuelto las curvas de calidad, el procedimiento para clasificar la estación de cualquier rodal sería primero ubicar la clase de calidad por la altura y la edad del mismo,

estas clases o bandas de calidad se establecen arbitrariamente; luego por algún procedimiento algo engorroso se debe calibrar la función representativa de la clase para que la misma pase por el punto altura-edad del rodal. Es evidente que el procedimiento es factible de mejorar y simplificar.

En el presente apartado se presenta la metodología y los resultados de aplicar la variante del método de intercepción (*IC*) para la estimación temprana y tardía del *IE*. A la vez este método integra parte de un sistema global de evaluación de la calidad de estación y la predicción del crecimiento en altura de *Pinus radiata* para la provincia de Guipúzcoa.

El método del intercepto de crecimiento o de intercepción (*IC*) se basa en la medición del crecimiento en altura durante una cierta fase de desarrollo del árbol a partir de cierta altura inicial, variable según los diferentes estudios llevados a cabo; y es especialmente útil en masas jóvenes en las que la medición de la altura dominante presenta serias dificultades debido al crecimiento errático en altura de los primeros años de vida, que pueden ser variables según la especie y la competencia, lo que se traduce en errores en la determinación del índice de estación (Ortega y Montero, 1988).

El intercepto de crecimiento tradicionalmente ha sido representado por el crecimiento promedio en altura de los primeros cinco años por encima de la altura normal (1,3 m). Dicho intercepto se lo relaciona con el *IE* por alguna función. La principal ventaja del método es que, para aquellas coníferas monocíclicas (el crecimiento estacional se diferencia claramente entre dos verticilos o zonas nodales), se puede estimar el *IE* solamente usando el intercepto y prescindiendo de la edad. En estas especies la medición del crecimiento en altura con el árbol en pie es una tarea sencilla (Chauchard *et al.*, 2000).

En el método del intercepto el *IE* y el crecimiento en altura se relacionan usualmente por una función en general lineal simple, pero a partir de ello surgen las variantes del método. Así Brown & Stires (1981), trabajando con *Pinus strobus* incorporan como variables no sólo la edad sino otras de carácter ambiental en un intento por mejorar la precisión de los ajustes. Pero es Nigh (1996), el que desarrolló la variante metodológica que permite la aplicación del método a especies en donde los interceptos no se relacionan claramente con la edad o en donde los mismos no se diferencian nítidamente. La variante consiste en relacionar a cada edad, el incremento medio anual en altura del árbol con el *IE* del árbol o rodal. Es decir, prescinde de emplear el incremento periódico anual de un determinado intercepto, para considerar directamente el incremento medio anual obtenido con la altura total. Con ello se obtendrán tantas funciones que relacionen el crecimiento en altura con el *IE*, como edades se estudien. El procedimiento de Nigh permite su aplicación tanto a especies frondosas como coníferas donde existe dificultad en la diferenciación visual del incremento anual en altura.

Si bien el autor no lo cita, esta variante podría generar curvas polimórficas de altura dominante-edad, pero esa no es su finalidad. Además una diferencia fundamental con cualquier sistema de curvas

polimórficas altura-edad, es que de éstas no se puede estimar directamente el IE , sino por tanteos o un método gráfico.

En *Pinus radiata*, si bien sus entrenudos son claros, la especie puede presentar más de un verticilo por año (policiclismo), dificultando la aplicación del método en forma tradicional. En estos casos el estudio se debe realizar a través del análisis del crecimiento de árboles apeados y las funciones estarán relacionadas indefectiblemente con la edad.

Es importante también señalar que Ibáñez (1989) aplicó una metodología similar para el estudio de la calidad de estación de *Fagus sylvatica*. Si bien su enfoque se circunscribió al desarrollo de curvas altura dominante-edad, no hizo referencia a un aspecto importante: la estimación temprana del IE . Salvando esta referencia no se ha encontrado que el IC , en su forma tradicional o variante, haya sido aplicado a las especies forestales de España.

2.3.1. Material

El estudio se circunscribe a la provincia de Guipúzcoa, donde existen datos de una red de 38 parcelas permanentes. En siete parcelas, seleccionadas para cubrir todo el rango de estaciones, se apearon 14 árboles a razón de dos por parcela. La selección se basó en el criterio de la altura dominante de los 75 árboles más gruesos y altos por hectárea, esta modificación se realizó para evitar los errores cometidos en la selección y medición de árboles dominantes dañados. La modificación consiste en promediar la altura de los 75 más altos de entre los 100 más gruesos por hectárea. Las edades de los árboles oscilaron entre los 36 y 40 años.

Respecto a la edad de referencia para establecer el IE_{25} , se estableció en los 25 años. Las razones de su elección ya fueron presentadas en la Introducción general al capítulo.

La selección de los árboles dominantes para el apeo se realizó de manera que las alturas de los mismos fueran lo más próximas posible a la altura media dominante estimada para cada parcela. Los fustes fueron seccionados según la calidad de la estación, para calidades media y alta a: 0,3 m; 0,8 m; 1,3 m; 1,8 m y luego cada 1,5 m; mientras que en las estaciones pobres a partir de 1,8 m, se seccionaron cada metro.

En cada sección se cortó una rodaja, se contó el número de anillos y se midieron los incrementos periódicos. El período de medición de los incrementos radiales fue de tres años. Con estas mediciones se construyó una curva de altura - edad para cada árbol.

2.3.2. Métodos

La principal fuente de información para la aplicación de la metodología propuesta son las curvas altura dominante - edad para cada estación que se ajustaron para el estudio de los patrones de crecimiento en altura. En dicho capítulo se describieron los crecimientos en altura de cada parcela a través de la función de Bertalanffy-Richards:

$$H_0 = A \cdot (1 - \exp^{-k \cdot t})^c \quad (2.14)$$

Donde:

H_0 : altura en metros.

A : parámetro asintótico.

k : parámetro relacionado con la tasa de crecimiento.

t : edad en años.

c : parámetro relacionado con el punto de inflexión.

Al poseer cada parcela ajustes independientes de la función 2.14, se originó un conjunto de funciones polimórficas con las cuales, una vez identificado el IE_{25} que determinaba cada una, se caracterizó el patrón y la tasa de crecimiento en altura para las mismas. Los IE_{25} obtenidos por la función promedio fueron similares al promedio obtenido entre las curvas de crecimientos reales de los dos árboles individuales. Una vez que cada parcela tuvo su correspondiente IE_{25t} se generaron grupos de datos altura- IE_{25} para cada edad particular⁵. Estos grupos se diferenciaron para los análisis en evaluaciones tempranas y tardías. Para la primera se analizaron los grupos comprendidos entre las edades cinco y nueve años y para la segunda entre los 10 y 40 años (Tabla 2.9).

Respecto de la edad empleada para los análisis, se utilizaron las edades al tocón, debido a que no se registraron retrasos en el crecimiento por competencia temprana.

Tabla 2.9: Grupos de datos altura dominante- IE_{25} para cada edad particular, empleados para los ajustes.

Evaluación Temprana

Árbol nº	IE_{25} [m]	ALTURAS [m]				
		5 años	6 años	7 años	8 años	9 años
101	17.9	1.8	2.6	3.4	4.3	5.2
14	21.2	2.6	3.6	4.7	5.9	7.1
31	24.9	3.9	5.2	6.6	7.9	9.3
100	26.3	4.8	6.1	7.4	8.7	9.9
20	26.8	3.7	4.9	6.2	7.5	8.8
19	27.0	3.9	5.2	6.6	8.1	9.6
15	28.3	6.0	7.5	8.9	10.3	11.7

Evaluación Tardía(*)

Árbol nº	IE_{25} [m]	ALTURAS [m]			
		11 años	20 años	31 años	40 años
101	17.9	7.2	14.9	20.5	22.8
14	21.2	9.6	18.2	23.3	25.0
31	24.9	12.0	21.6	27.5	30.0
100	26.3	12.5	22.2	30.1	34.0
20	26.8	11.5	22.6	31.0	35.2
19	27.0	12.5	23.1	30.1	32.7
15	28.3	14.3	24.2	32.0	35.8

(*)Nota: se proporcionan sólo los datos de algunas edades.

Con cada grupo de datos altura- IE_{25} , se ensayaron para cada edad particular, una serie de funciones lineales:

Lineal $IE_{25} = a + b \cdot H_0 + \varepsilon$ (2.15)

Recíproca $IE_{25} = 1 / (a + b \cdot H_0) + \varepsilon$ (2.16)

Recíproca H $IE_{25} = a + b \cdot 1/H_0 + \varepsilon$ (2.17)

Doble recíproca $IE_{25} = 1 / (a + b \cdot 1/H_0) + \varepsilon$ (2.18)

Logarítmica $IE_{25} = a + b \cdot \ln H_0 + \varepsilon$ (2.19)

Exponencial $IE_{25} = \exp(a + b \cdot H_0) + \varepsilon$ (2.20)

Potencial $IE_{25} = a \cdot H_0^b + \varepsilon$ (2.21)

Raíz $IE_{25} = (a + b \cdot H_0)^2 + \varepsilon$ (2.22)

⁵ Nótese que el método tradicional y sus variantes siempre han empleado el incremento periódico medio en altura, pero que en el presente caso se puede reemplazar directamente con la altura y se evita un paso en el procedimiento.

$$\text{Raíz H} \quad IE_{25} = a + b \cdot H_0^{0,5} + \varepsilon \quad (2.23)$$

$$\text{Exponencial-recíproca} \quad IE_{25} = \exp(a + b \cdot 1/H_0) + \varepsilon \quad (2.24)$$

Donde:

IE_{25} : índice de estación.

H_0 : altura.

a, b : coeficientes de ajuste.

ε : error aleatorio.

Lr : logaritmo de base e.

De esta manera se obtuvieron tantas funciones o modelos ajustados como edades se analizaron. La evaluación de los ajustes de los modelos se fue realizando edad por edad e intentando que la función seleccionada fuera la misma para todas ellas. El ajustar una misma función para todas las edades, permite relacionar posteriormente sus parámetros con las edades a través de alguna función.

Entonces, una vez seleccionadas las funciones para cada evaluación (temprana y tardía) se estudió el comportamiento de sus parámetros con la edad, con el fin de encontrar otra función que relacione a ambos.

Finalmente, se reemplazaron los parámetros originales por dichas funciones dependientes de la edad y se hizo ajustar el modelo reparametrizado empleando la técnica de regresión no lineal. Con ello se optimizaron los valores de los parámetros y se obtuvieron los estadísticos que permitieron realizar la evaluación global de la precisión de los modelos.

Los ajustes fueron evaluados por el coeficiente de determinación (R^2 y R^2 (aj)), el análisis de residuales (ANARE), el análisis de la varianza (test-F), la prueba de Student para los coeficientes (test-t), el error estándar de la estimación (EEE) y la bondad gráfica del ajuste, empleando el paquete estadístico Statgraphics plus v. 3.0.

2.3.2.1. Verificación

Se realizó una verificación de las estimaciones con los mismos datos de crecimientos que se emplearon para este desarrollo del método. La verificación consistió en estimar con las funciones ajustadas los IE_{25} de tres en tres años a partir de los seis años de edad, utilizando como variable independiente la altura total, promedio entre los dos árboles de cada parcela y para dichas edades. Posteriormente, se obtuvo el promedio de todas estas estimaciones de IE_{25} para cada parcela y se comparó en forma absoluta y relativa con el IE_{25} observado.

2.3.2.2. Validación

La validación se realizó empleando los datos de altura-edad provenientes de las parcelas permanentes. Para la misma se seleccionaron aquellas parcelas que a lo largo de los 13 años del período de medición habían pasado por la edad de los 25 años (edad de referencia). Con el fin de vislumbrar la estabilidad y la exactitud de las estimaciones del IE_{25} en estas parcelas, se calculó para sus dos o tres mediciones los correspondientes IE_{25} y se comparó con los registrados a través de las mediciones. Esta validación es estrictamente gráfica.

2.3.3. Resultados

A pesar del limitado número de muestras se considera que los resultados han sido altamente satisfactorios, tanto para la evaluación temprana como para la tardía. Las tendencias de los pares de datos H_0-IE_{25} de edades tempranas han seguido una tendencia no lineal, mientras que para los provenientes de edades tardías lo han hecho linealmente. También se han conseguido buenos resultados en la correlación de los parámetros con la edad; ello deja la opción de poder emplear una sola función para la estimación del IE_{25} de un árbol o de un rodal.

2.3.3.1. Evaluación Temprana

Los modelos 2.17, 2.18 y 2.24 fueron los que mejores ajustes dieron. Dado que los estadísticos eran muy cercanos entre sí, R^2 superiores al 90%, se seleccionó el modelo 2.24 debido a la bondad gráfica de su ajuste. Los parámetros de ajustes del modelo 2.24 para cada edad y sus correspondientes estadísticos se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10: *Evaluación Temprana: Parámetros de los ajustes de la función 2.24 aplicada a cada edad y sus estadísticos.*

Edad	Parámetros		R^2 [%]	EEE	Test-F
	a	b			
5	3,56578 **	-1,24748 **	94,5	0,042	86 ++
6	3,61193 **	-1,89448 **	94,5	0,042	85 ++
7	3,65721 **	-2,67474 **	94,4	0,043	85 ++
8	3,70137 **	-3,57737 **	94,4	0,043	84 ++
9	3,74414 **	-4,58821 **	94,4	0,043	85 ++

Nota: (**) significativos al 99% con la prueba de t ; (++) significativos al 99%.

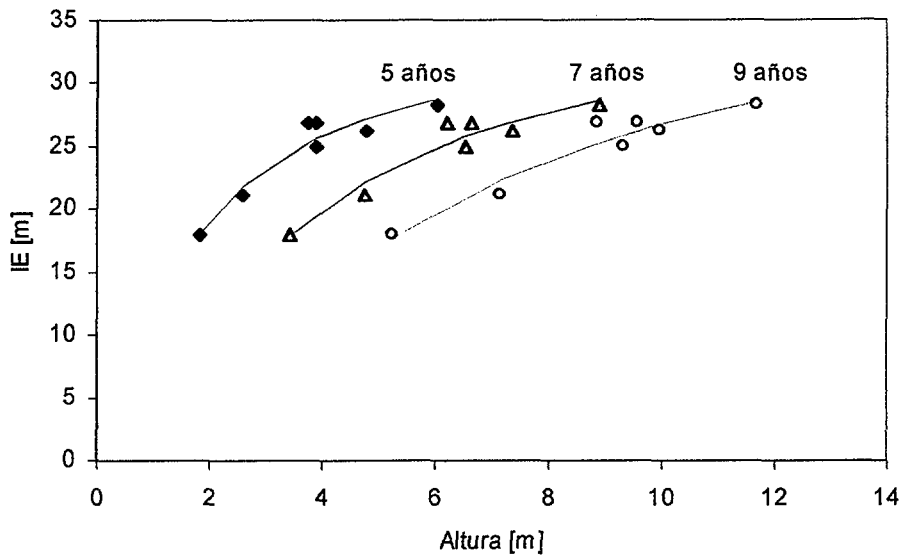


Figura 2.17: Evaluación Temprana: ajustes de la función 2.24 para las edades de 5, 7 y 9 años.

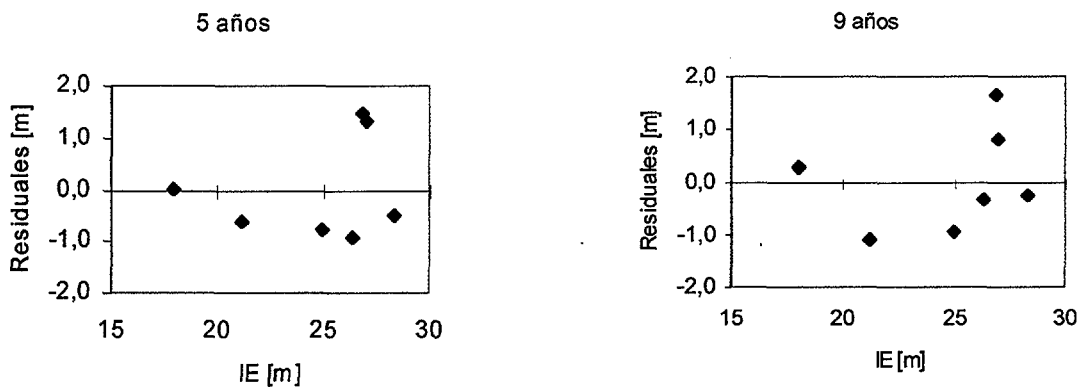


Figura 2.18: Evaluación Temprana: dispersión de los residuos para los ajustes de las edades de 5 y 9 años.

La bondad de los ajustes se puede apreciar en la Fig. 2.17, en el se observa la tendencia no lineal de los puntos y su buena representación por la función 2.24. En la Fig. 2.18, se representan, para la evaluación temprana, los residuales de la función 2.24 para los grupos de datos correspondientes a 5 y 9 años.

Las tendencias de los parámetros a y b han sido muy claras y se han podido correlacionar muy bien con sendos modelos lineales. Los resultados son los siguientes:

Parámetro a:

$$Pa = 3,34377 + 0,044616 \cdot t \quad (2.25)$$

R^2 : 99,9% EEE : 0,00122 test-F: 13.382++

EEa : 0,00275427** EEb : 0,000385675**

Donde:

Pa : valor del parámetro a.

t : edad.

EEa y EEb : errores estándar de los parámetros a y b .

** : significativos al 99% de la prueba de t -Student.

++ : significativamente diferentes de cero al 99%.

Parámetro b (ajustado en términos absolutos):

$$Pb = (-0,163206 + 0,25652 \cdot t)^2 \quad (2.26)$$

R^2 : 99,9% test-F: 58.844++

EEa : 0,00755189** EEb : 0,00105748**

En la Fig. 2.19, se recoge para la evaluación temprana la dispersión de los pares de datos de los parámetros a y b con la edad y su ajuste lineal.

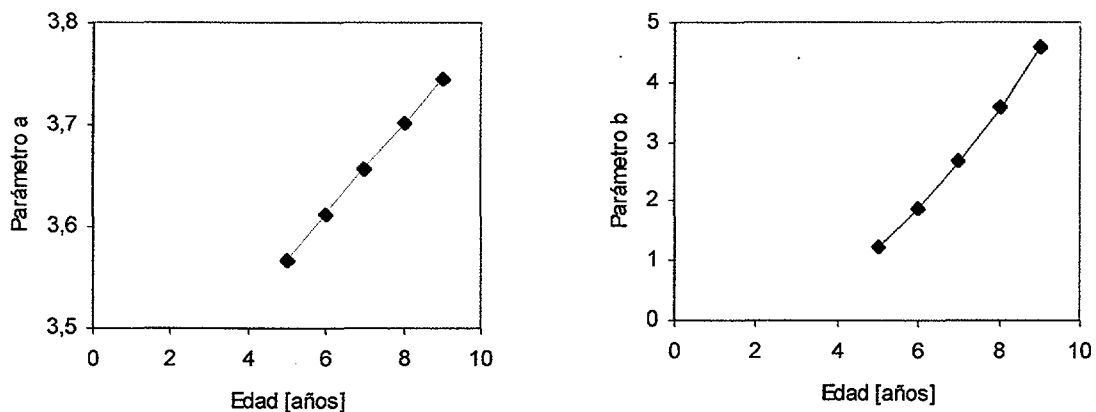


Figura 2.19: *Evaluación Temprana: dispersión de los valores de los parámetros vs. las edades y las líneas ajustadas para cada una.*

Reemplazando los parámetros de la función 2.24 por las respectivas funciones, se obtiene la función reparametrizada para la evaluación temprana del IE_{25} , el cual queda como sigue:

$$E_{25} = \exp(3,34058 + 0,0450801 \cdot \delta - (-0,169556 + 0,257453 \cdot \delta)^2 \cdot 1/Ho) \quad (2.27)$$

Y los estadísticos del ajuste fueron los siguientes:

$$R^2 \text{ (aj): } 93,9\% \quad \text{EEE: } 0,0382$$

2.3.3.2. Evaluación Tardía

Para la evaluación tardía el modelo 2.15 de la recta se ha ajustado con muy buena precisión a los pares de datos IE_{25} -altura dominante, para cada edad observada. Los valores de R^2 han sido superiores al 92% , pero se puede observar que la precisión de los ajustes mejoran con la aproximación a la edad de los 25 años (Tabla 2.11). Efectivamente los valores de R^2 y EEE son mayores y menores, respectivamente, en las proximidades de esta edad, alcanzando como es lógico una correlación perfecta a dicha edad.

Tabla 2.11: *Evaluación Tardía: Parámetros de los ajustes de la función 2.15 aplicada a cada edad y sus estadísticos.*

Edad	Parámetros		R^2 [%]	EEE	Test-F
	<i>a</i>	<i>b</i>			
11	7,06344 **	1,54505 **	92,7	1,108	63++
14	4,10499 **	1,37154 **	95,3	0,884	102++
17	1,97831 **	1,246735 **	97,4	0,661	187++
20	0,635326 **	1,146035 **	99,0	0,414	484++
23	0,00682 **	1,057565 **	99,9	0,152	3597++
25(base)	-0,0758752**	1,003044**	99,9	0,038	59440++
28	0,180934**	0,927321**	99,5	0,275	1100++
31	0,740778**	0,859365**	98,5	0,499	332++
34	1,45598**	0,799685**	97,1	0,693	169++
37	2,22072**	0,748268**	95,6	0,858	109++
40	2,96899**	0,704578**	94,1	0,997	79++

Nota: (**) significativos al 99% con la prueba de *t*. (++) significativos al 99%.

En la Fig. 2.20, se aprecia el buen ajuste de la función 2.15 a los datos observados de las edades de 11, 20, 31 y 40 años. Por su parte, en la Fig. 2.21, se representan, para la evaluación tardía, los residuales del ajuste de la función 2.15 para las edades de 11, 20, 31 y 40 años.

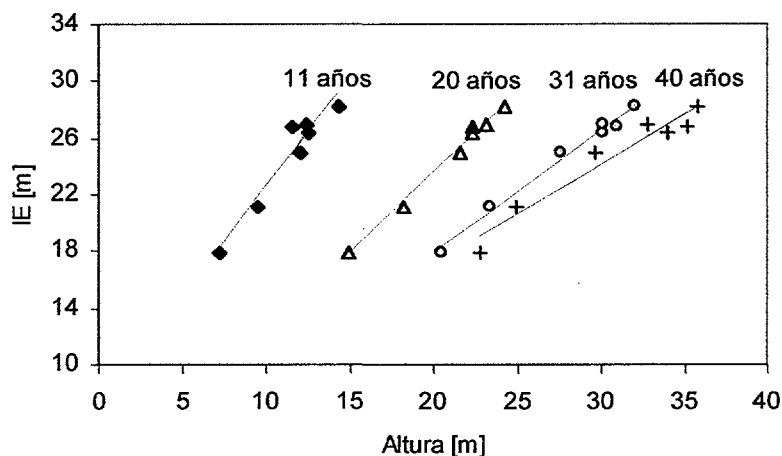


Figura 2.20: Evaluación Tardía: ajustes de la función 2.15 para las edades 11, 20, 31 y 40 años.

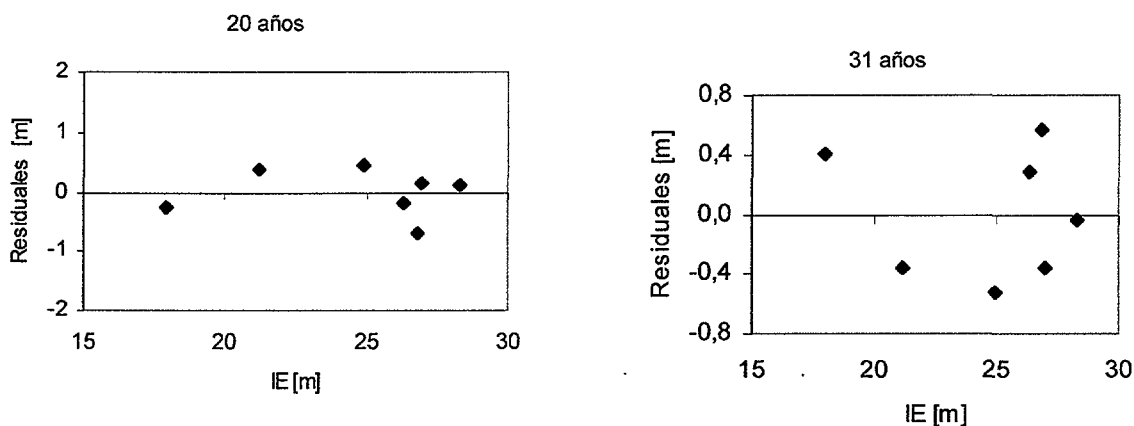


Figura 2.21: Evaluación Tardía: dispersión de los residuos para los ajustes de las edades de 20 y 31 años.

Los parámetros a y b de los distintos ajustes también mostraron una clara tendencia, pero esta vez curvilínea. El parámetro a es el que se ha tenido que explicar con una función cúbica debido a una depresión que su dispersión presenta a los 25 años. En ambos casos los ajustes han sido muy satisfactorios, obteniendo valores de R^2 del 99,9 % y obviamente valores de EEE muy bajos.

Parámetro a :

$$Pa = 28,4535 - 2,79545 \cdot t + 0,0866169 \cdot t^2 - 0,0008165 \cdot t^3 \quad (2.28)$$

R^2 : 99,9% EEE : 0,0353515 test-F: 12.359++
 EEa : 0,251671** EEb : 0,0341892** EEc : 0,001428** EEd : 0,0000186**

Parámetro b :

$$Pb = 3,09116 - 0,649004 \cdot \ln t \quad (2.29)$$

R^2 : 99,9% EEE : 0,00539 test- F : 24.807++

EEa : 0,0131418** EEb : 0,00412061**

En la Fig. 2.22, se recoge para la evaluación tardía, la dispersión de los pares de datos de los parámetros a y b con la edad y su ajuste.

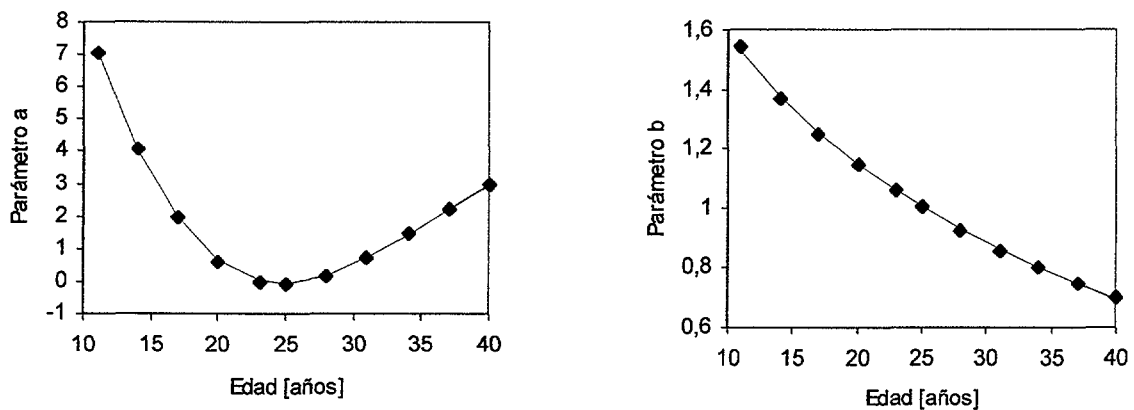


Figura 2.22: Evaluación Tardía: dispersión de los valores de los parámetros vs. las edades y las líneas ajustadas para cada una.

El modelo general reparametrizado de la evaluación tardía del IE_{25t} es el siguiente:

$$IE_{25} = (28,3506 - 2,75294 \cdot t + 0,0839029 \cdot t^2 - 0,000772405 \cdot t^3) + (3,06661 \cdot H_0 - 0,641523 \cdot \ln E \cdot H_0) \quad (2.30)$$

Y los estadísticos del ajuste fueron: R^2 (aj): 97,0% EEE : 0,6067 m

2.3.4. Discusión

La variante expuesta, cuya base es la propuesta por Nigh (1996), ha podido aplicarse satisfactoriamente en plantaciones de *Pinus radiata* de la provincia de Guipúzcoa. Presenta una ventaja sustancial sobre el método tradicional, en el cual si se presentan condiciones ambientales anormales que tienen un impacto sobre el crecimiento temprano en altura, éste, por lo tanto, afectará la estimación del IE_{25} . Con el paso de los años, dicho error no podrá ser corregido por el método tradicional, pues la estimación del IE_{25} siempre se realiza sobre el mismo período temprano de

crecimiento. Con esta variante el IE_{25} puede ser estimado año a año y la influencia de los incrementos en alturas generados por condiciones climáticas anormales podrá ser disminuida con sucesivas futuras estimaciones del mismo, aminorando cualquier posible error en la estimación del IE_{25} . Por otro lado, con un criterio amplio y liberal, es posible aceptar que bajo diferentes condiciones de crecimientos el IE_{25} de un rodal determinado pueda cambiar con el paso del tiempo, adecuándose a estos cambios; en estos casos la variante del método podrá adecuar una nueva estimación del IE_{25} para el rodal, frente a estos cambios.

Otros autores (Andenmatten & Letourneau, 1997, Gonda *et al.*, 1998) han encontrado que el aumento del largo del intercepto mejora la precisión de las estimaciones del IE_{25} . Pero inclusive en aquellos casos en que se consideren interceptos largos, la presente variante del método presenta ciertas ventajas. Además de la mayor precisión de las estimaciones al considerar un intercepto mayor (la altura total), se disminuye el error en la medición del mismo, ya que, aún en condiciones de difícil visibilidad, siempre será más fácil identificar el ápice para medir la altura del árbol, que intentar localizar un determinado número de zonas nodales en pleno follaje.

Los valores de R^2 han sido elevados y los EEE han tenido valores en la mayoría de los casos bastante inferiores al metro (Tablas 2.10 y 2.11). Respecto del $ANARE$ es evidente que para detectar alguna anomalía en la dispersión de los residuos sería conveniente disponer de más datos.

Las pendientes de las relaciones lineales (Tablas 2.10 y 2.11) están indicando la sensibilidad de la estimación del IE_{25} ; a mayor valor de la pendiente mayor incidencia tendrá cualquier error en la estimación de la altura dominante sobre el IE_{25} estimado. En la evaluación temprana con el aumento de la edad se pierde levemente en sensibilidad, pero se disminuye el efecto de cualquier error en la estimación de la altura del rodal para la estimación de IE_{25} . De igual manera en la evaluación tardía el descenso de la pendiente (parámetro b) de la relación con el aumento de la edad señala la mejor bondad predictiva. Efectivamente a los 11 años un error de un metro en la estimación de la altura se asocia con una variación de 1,55 metros del IE_{25} , mientras que para los 40 años el mismo error se asocia con una variación del IE_{25} de 0,70 metros.

Se han encontrado para ambas evaluaciones claras tendencias de los parámetros de los modelos con la edad (Fig. 2.19 y 2.22), logrando ajustar una única función para cada una con excelentes resultados (ecuaciones 2.27 y 2.30). Nigh (1996) no ha querido avanzar en un modelo único correlacionando los parámetros con otra función, debido a una probable pérdida de exactitud y al incremento de la complejidad de los análisis. En el caso de *Pinus radiata* valores de R^2 de 99,9% no dejan mucho margen para la pérdida de exactitud y siempre quedará la opción de usar los modelos individuales de IE_{25} -altura dominante. La reparametrización permite obtener la precisión del modelo general, y estos ajustes arrojaron valores de R^2 de 94 y 97 % para las evaluaciones tempranas y tardías, respectivamente.

Al estar trabajando con plantaciones de rápido crecimiento, la desventaja que implica esta variante del método respecto del mayor costo operativo en la determinación de la edad, se aminora al ser un dato generalmente disponible.

2.3.5. Verificación y Validación

La verificación y validación de los resultados han sido satisfactorias. La verificación, como se expuso, se realizó entre los IE_{25} observados y estimados a partir de los mismos árboles empleados para el desarrollo del método. Se considera que el error que se obtiene con la verificación es el reflejo de la pérdida de precisión por la correlación entre las funciones y además certifica el normal funcionamiento de todo el proceso de estimación. El error inherente al método que se ha obtenido se considera aceptable, siendo el error absoluto de 0,46 metros, que representa un error relativo del 2,1 % (Tabla 2.12).

Tabla 2.12: Errores absolutos y relativos de la verificación.

Arbol nº	IE_{25} obs. [m]	IE_{25} est. [m]	Error	
			Absoluto	Relativo
15	28.4	28.5	-0.27	-0.9
100	26.7	26.6	-0.28	-1.0
101	17.3	18.5	-0.76	-4.3
31	24.5	24.9	-0.05	-0.2
20	26.4	26.0	0.84	3.1
19	26.9	26.8	0.14	0.5
14	21.0	21.3	-0.17	-0.8
Media	24.6m	24.7m	0.46m	2.1 %

NOTA: Los valores de IE_{25} obs. se obtienen promediando el valor alcanzado por los dos árboles muestra a la edad base, mientras que los valores de IE_{25} est. son los promedios de las estimaciones obtenidas entre las edades de 3 a 39 años.

En el análisis de esta verificación se debe tener en cuenta un aspecto importante: se emplearon las curvas de crecimientos promedios entre las observaciones de los dos árboles de cada parcela. Esto se considera más apropiado que emplear los datos individuales, desde el momento que el método se desarrolló conceptual y mecánicamente para aplicarse a datos promedios por parcela, como por ejemplo: la altura dominante de los n árboles más gruesos por hectárea, etc.

La validación gráfica empleando información de las parcelas permanentes se analiza a través de la Fig. 2.23. Allí se muestran las estimaciones para cuatro parcelas permanentes que fueron medidas en tres

oportunidades. Las estimaciones de los IE_{25} entre las mediciones de una misma parcela deberían ser similares y se puede observar que así ocurre salvo en la parcela que tiene una leve tendencia ascendente. Además se puede ver, a la edad base, la coincidencia de la alturas dominantes con el IE_{25} estimado. Las curvas se deberían cruzar aproximadamente a los 25 años y así ocurre para los cuatro casos analizados.

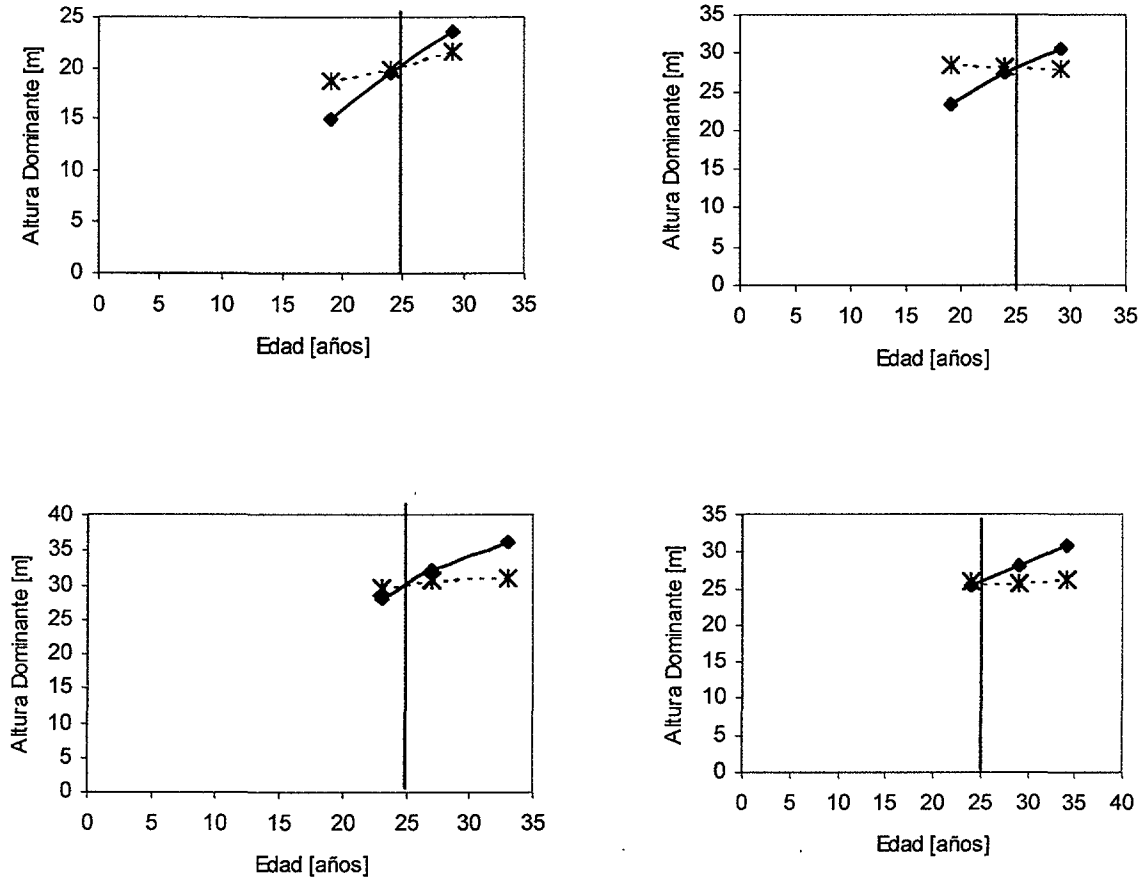


Figura 2.23: Comparación del IE_{25} observado en cuatro parcelas permanentes (curvas de crecimiento en altura con línea llena), con los IE_{25} s estimados para los tres momentos de medición (línea discontinua).

2.3.6. Curvas y Tabla de Índice de Estación

Las curvas y tablas de IE_{25} permiten estimar en forma gráfica y tabular el IE_{25} de un determinado rodal (Fig. 2.24 y Tabla 2.13).

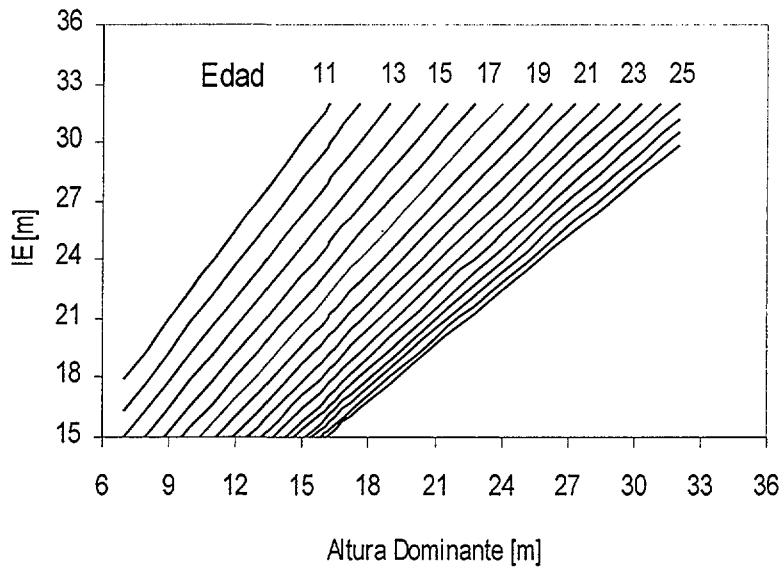
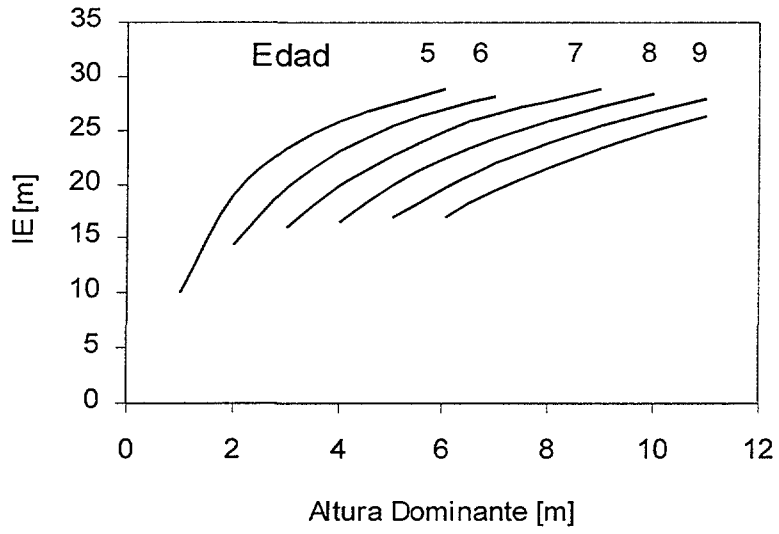


Figura 2.24: Curvas de IE_{25} para la evaluación temprana y tardía de la calidad de estación.

Tabla 2.13: Tabla para la estimación temprana y tardía del IE₂₅ para *Pinus radiata*.

Altura [m]	Edad [años]										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	INDICE DE ESTACIÓN [m]										
2	19										
2,5	21										
3	23	20	16								
3,5	25	22	18								
4	26	23	20	17							
4,5	27	24	21	18							
5	28	25	23	20	17						
5,5	28	26	24	21	18						
6	29	27	25	22	20	17					
7	30	28	26	24	22	19	18				
8		29	28	26	24	22	19	18			
9		30	29	27	25	23	21	19	18		
10			30	28	27	25	22	21	19	18	
11				29	28	26	24	22	21	19	18
12				30	29	27	26	24	22	21	19
13					30	28	27	25	24	22	21
14						29	29	27	25	23	22
15						30	30	28	26	25	23
16								30	28	26	25
17									29	27	26
18									31	29	27
19										30	29
20											30

Altura [m]	Edad [años]										
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	INDICE DE ESTACIÓN [m]										
12	18										
13	19	18									
14	21	19	18	18							
15	22	21	20	19	18						
16	23	22	21	20	19	18	18				
17	25	23	22	21	20	19	19	18			
18	26	24	23	22	21	20	20	19	18	18	
19	27	26	25	23	22	22	21	20	19	19	18
20	28	27	26	25	24	23	22	21	20	20	19
21	30	28	27	26	25	24	23	22	22	21	20
22		29	28	27	26	25	24	23	23	22	21
23		31	29	28	27	26	25	24	24	23	22
24			31	29	28	27	26	25	25	24	23
25				30	29	28	27	26	26	25	24
26					30	29	28	27	27	26	25
27						30	29	29	28	27	26
28							31	30	29	28	27
29								31	30	29	28
30										30	29
31											30

2.4. SISTEMAS DE CURVAS DE ALTURA DOMINANTE-EDAD

La habilidad para predecir aceptablemente el crecimiento y la producción de futuros rodales es fundamental en el manejo de los recursos forestales. Las curvas de IE_{25} y de altura dominante-edad son componentes básicos en la mayoría de los sistemas de crecimiento y producción. Las curvas de IE_{25} son usadas para estimar la capacidad productiva de la tierra, mientras que las curvas de altura-edad son empleadas para predecir los patrones de crecimiento en altura de los árboles dominantes y codominantes en rodales regulares de un IE_{25} dado. Muchos modelos de crecimiento y producción se fían del IE_{25} para definir los patrones de crecimiento de los árboles dominantes, los cuales están íntimamente relacionados con el crecimiento en volumen (Thrower & Goudie, 1992).

Después de definir y validar los patrones de crecimientos de *Pinus radiata* así como un método que permite estimar la potencialidad productiva a través del IE_{25} , se pasarán a desarrollar las curvas de altura dominante-edad de la especie. Las funciones que generan estas curvas son las que actuarán como conductoras en el modelo final de crecimiento del rodal.

A la luz de los resultados obtenidos respecto a los patrones de crecimiento en altura, se presentarán dos sistemas de curvas, uno anamórfico y otro polimórfico estricto. Ambos se consideran válidos para la predicción del crecimiento en altura, pero con algunas diferencias entre ellos. El sistema anamórfico es más simple de manipular y permite estimar el IE_{25} con un simple despeje de la función, dadas una altura y una edad, mientras que el polimórfico es un poco más exacto en la predicción del crecimiento temprano, pero es más compleja su manipulación y no permite estimar el IE_{25} en forma directa como el anamórfico (en este sistema se requiere de un método adicional como el definido en el apartado 2.2).

2.4.1. Materiales y Métodos

2.4.1.1. Fuente de Datos

Los datos provinieron de tres fuentes principales:

- a) Datos temporales obtenidos de las parcelas del Inventario Forestal Nacional.
- b) Treinta y ocho parcelas permanentes instaladas en 1988 en la provincia de Guipúzcoa.
- c) Catorce análisis troncales de árboles dominantes apeados en algunas de las anteriores parcelas permanentes.

a) Datos Temporales de las Parcelas del *I.F.N.*

Los mismos fueron suministrados para el presente estudio por la Diputación Foral de la provincia de Guipúzcoa e I.K.T. S.A.(Ikerketa Kertzal Teknologia Sociedad Anónima)

Como en muchas de las parcelas la edad se había aproximado en clases de cinco años, primero se procedió a la eliminación de las mismas de la base de datos. Los datos de las parcelas resultantes se emplearon para conocer el rango de crecimiento de las plantaciones en el País Vasco y para analizar la aptitud de la familia de curvas. Existieron varias razones para no profundizar el estudio con estos datos, una de ellas fue el hecho de ser datos temporales y la otra que el criterio de altura dominante se basó en los 100 árboles más gruesos por hectárea, mientras que en las parcelas permanentes se trabajó con 75 árboles dominantes y codominantes de los 100 árboles más gruesos por hectárea.

b) Datos de Parcelas Permanentes.

En 1988 se instalaron 38 parcelas permanentes en plantaciones cuyas edades iban desde los 11 hasta los 31 años. Treinta y cuatro de ellas fueron remedidas en 1993 o 1994 (a los cuatro o cinco años) y finalmente en 1999 quince de ellas tuvieron una tercera medición (a los cinco o seis años). Posteriormente a las dos primeras mediciones, en cada parcela se realizó una clara.

Tabla 2.14: Estadísticas globales de las parcelas permanentes para cada año de medición. *Dg*: diámetro promedio cuadrático.

Variable	1988			1993/94			1999		
	Medio	Mín.	Máx.	Medio	Mín.	Máx.	Medio	Mín.	Máx.
Edad [años]	22	11	31	27	15	35	30	22	38
Árboles/ha	747	212	2447	466	181	1044	320	171	487
<i>Dg</i> [cm]	27	11	41	33	20	45	37	29	50
Altura Dominante [m]	21	11	29	25	17	33	28	22	36
A. basal [m ² /ha]	31	17	55	34	21	52	31	23	45
<i>IE</i> ₂₅ [m]	25	17	30						

Nota: los datos de los años 1988 y 1993/94 son previos a la clara.

Los tamaños de las parcelas fueron variables de acuerdo a la edad (y por ende a la densidad) del rodal, así en las parcelas más jóvenes los tamaños oscilaron entre los 1.100 y 1.800 metros cuadrados y las más adultas entre los 2.700 y 3.200 m².

c) Datos de Análisis Troncales.

De las parcelas permanentes que permanecían en pie en 1999 se seleccionaron siete que cubrieran el rango de calidades de estación de la provincia. En cada una se apearon dos árboles dominantes cuyas alturas totales se aproximaran al promedio de las mismas. Estos árboles fueron trozados y medidos de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 2.2 De los análisis troncales se construyeron las curvas altura-edad de cada árbol que constituyeron las series reales de crecimiento.

Antes de entrar a desarrollar el sistema de curvas de calidad de estación se contrastaron los datos provenientes de las parcelas permanentes y de los análisis troncales. Una de las hipótesis al seleccionar un árbol dominante o codominante maduro, es que ha mantenido dicha posición social durante toda su vida. La finalidad de la confrontación es aprovechar el conocimiento que las alturas provenientes de las parcelas se obtuvieron a partir de los árboles dominantes, para compararlas con la alturas a diferentes edades y las formas de las curvas obtenidas a partir de los análisis troncales. Para realizar la prueba, por un lado se ajustaron simplemente dos curvas centrales o guías, una para cada grupo de datos y se compararon, a través de sus parámetros y comportamientos, mientras que por el otro se hizo una comparación gráfica, superponiendo ambas nubes de puntos.

2.4.1.2. Curvas Altura-Edad

La función empleada para desarrollar los sistemas de crecimiento en altura, fue la denominada de Bertalanffy-Richards:

$$H_o = A \left[1 - \exp(-k.t) \right]^c + \varepsilon \quad (2.31)$$

Donde: H_o : altura dominante; A : parámetro asintótico; k : parámetro relacionado con la tasa de crecimiento; c : parámetro que determina el punto de inflexión; ε : error aleatorio.

La función 2.31 fue reparametrizada como se vio en apartado 2.2 a través de relacionar primero sus parámetros con el IE_{25} . De ello resultaron dos funciones con excelentes aptitudes para expresar el crecimiento en altura de *Pinus radiata*, una anamórfica de cuatro parámetros y otra polimórfica de cinco parámetros, que son las utilizadas para desarrollar el presente capítulo. Se trabajó con ambos sistema porque además de los excelentes estadísticos de ajustes, las aptitudes predictivas que cada uno poseen para la evaluación temprana pueden variar, de manera que se pretende presentar los resultados de ambos para que el técnico pueda elegir cual prefiere emplear.

Las funciones calibradas para la construcción del sistema de curvas altura dominante-edad, definidas en el apartado 2.2, son las siguientes:

Función Anamórfica:

$$H_o = IE_{25} \cdot \left[\frac{1 - \exp(-0,071848.t)}{0,7200353} \right]^{1,81031} \quad (2.32)$$

Función Polimórfica:

$$H_o = IE_{25} \cdot \left[\frac{1 - \exp(-(0,0464+0,00098.IE_{25}).t)}{1 - \exp(-(1,1594025+0,0246675.IE_{25}))} \right]^{1,80266} \quad (2.33)$$

Para los ajustes de las funciones de Bertalanffy-Richards se emplearon técnicas de regresión no lineal, mediante el procedimiento iterativo de Marquardt, utilizando el programa Statgraphics plus v.3.2.

2.4.1.3. Validación

Para validar los sistemas anamórfico y polimórfico estricto se emplearon los datos provenientes de las sucesivas mediciones de las parcelas permanentes. La validación es de todo el sistema en general, puesto que parte de estimar el IE_{25} por la variante propuesta del método del intercepto de crecimiento, para luego aplicar las funciones de crecimiento. Se realizó de la siguiente manera:

- a) Estimación del IE_{25} de la parcela, para cada año de medición. Para ello se aplica la variante del método del intercepto de crecimiento presentado en el apartado anterior 2.3.
- b) Dados el IE_{25} y la edad en una parcela determinada, aplicando las funciones 2.32 y 2.33 se estima su altura dominante.
- c) Entre la altura observada de la parcela y las estimadas por las funciones se calculan los siguientes estadísticos: Error Absoluto Medio (EAM), Error Absoluto Medio relativo ($EAM\%$), Error Medio (EM) y el Error Medio relativo ($EM\%$). Los dos primeros dan una idea de la eficiencia del modelo, mientras que los dos últimos indican el probable sesgo del mismo.
- d) Se realizó una evaluación gráfica superponiendo las alturas observadas y estimadas en un par de ejes coordenados altura dominante-edad.
- e) Se realizó una segunda validación empleando las funciones de transición derivadas de las formas integrales 2.32 y 2.33, para proyectar la altura observada del principio del período al final del mismo. La evaluación se realizó con los mismos estadísticos expuestos en c).

2.4.1.4. Comparación con Anteriores Curvas de Calidad de Estación

La función 2.32 fue comparada contra las curvas de calidad de estación desarrolladas por Madrigal *et al.* (1975) y Espinel *et al.* (1997). Se realizó una comparación gráfica y otra cuantitativa.

La comparación gráfica consistió en superponer en un misma figura las familias de curvas que se comparan, empleando como referencia la misma edad de referencia. Para la comparación con las curvas de Madrigal *et al.* se usó la edad de 15 años, mientras que para comparación con las de Espinel *et al.* (1997) se empleó la edad de 20 años, acordes con las edades de referencia escogidos en los respectivos estudios.

La comparación cuantitativa consistió en proyectar las curvas de ambas familias, correspondientes a tres calidades de estación, desde los diez años con la misma altura dominante y evaluar las diferencias a los 25 años, edad que constituye la referencia del presente estudio para la estimación del IE_{25} . A dicha edad se calcularon las diferencias absolutas y porcentuales, relativizando estas últimas en función de la altura estimada por la nueva función.

2.4.2. Resultados y Discusión

En primer lugar se realizaron los ajustes de la función 2.31 para construir las curvas guías, por un lado para las series de crecimiento promedios de las parcelas y por el otro para los datos de las parcelas permanentes. De sendos ajustes resultaron los parámetros dados en la Tabla 2.15. En esta Tabla se puede observar la similitud de los valores de los parámetros, lo que estaría demostrando que ambos datos responden a un similar patrón de crecimiento, además los errores estándares de la estimaciones son similares señalando la semejanza entre las dispersiones. Ello refuerza la hipótesis que los árboles seleccionados para los análisis troncales habrían sido dominantes a lo largo de su vida. Este análisis se completa observando la coincidente superposición gráfica de ambos grupos de datos, no apareciendo desvíos en alguna etapa del crecimiento entre los patrones de ambos grupos de datos (Fig.2.25).

Tabla 2.15: *parámetros de los ajustes de la función 2.31 para dos grupos de datos distintos.*

PARÁMETROS	Serías Crecimiento	Parc.Permanentes
<i>A</i>	31,55	32,13
<i>K</i>	0,0861	0,0865
<i>c</i>	2,049	2,056
<i>EEE</i>	3,2 m	3,0 m

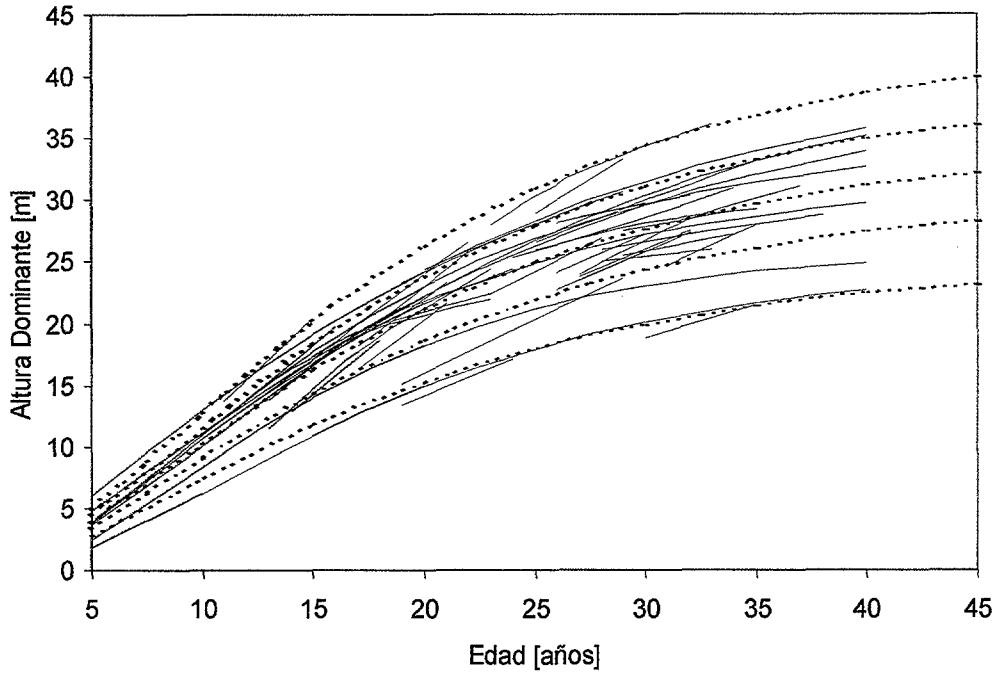


Figura 2.25: Vista general de las cinco curvas anamórficas altura dominante-edad ajustadas (líneas discontinuas) con los grupos de datos provenientes de las parcelas permanentes y los análisis troncales.

Para la confrontación gráfica de la Fig. 2.25, se establecieron cinco curvas arbitrarias de calidades de estación, que se superpusieron con los datos observados. La buena aptitud del sistema anamórfico construido también se puede apreciar si se superponen cinco curvas arbitrarias con los datos del Inventario Forestal Nacional (Fig. 2.26). Dichas curvas cubren adecuadamente al rango de crecimiento aportado por las 601 parcelas.

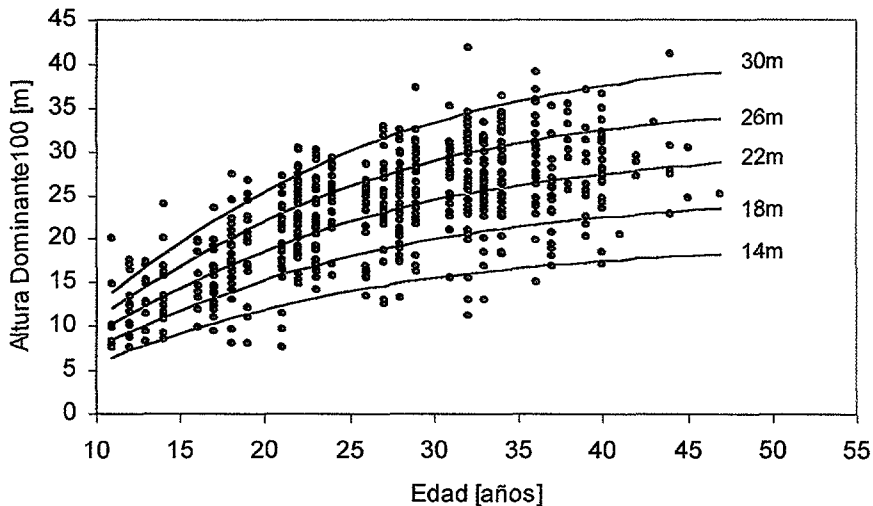


Figura 2.26: Superposición de cinco curvas anamórficas ajustadas con los datos provenientes del Inventario Forestal Nacional.

Es importante señalar que con el sistema propuesto, tanto anamórfico como polimórfico, no es necesario identificar *clases* de calidad de estación ya que las curvas barren en forma continua el rango de IE_{25} de *Pinus radiata*.

Una de las utilidades principales de las funciones ajustadas de crecimiento en altura, es emplear su forma diferencial para la predicción del incremento esperado. Si bien lo usual en los estudios de modelización es usar el crecimiento en altura en su forma integral, una eficiente alternativa es el empleo de las funciones de transición locales para guiar la predicción del crecimiento del rodal (García, 1984b). Las formas diferenciales de las funciones 2.32 y 2.33 son las siguientes:

Sistema Anamórfico:

$$\frac{dH_o}{dt} = 0,071848 \cdot 1,81031 \left[\left(\frac{IE_{25}}{(1 - \exp^{-1,7962})} \right)^{1,81031} \right]^{0,552392} \cdot H_o^{0,447608} - H_o \quad (2.34)$$

Sistema Polimórfico:

$$\frac{dH_o}{dt} = (0,0464 + 0,001 \cdot IE_{25}) \cdot 1,803 \cdot \left[\left(\frac{IE_{25}}{(1 - \exp^{-(0,0464 + 0,001 \cdot IE_{25}) \cdot 25})} \right)^{1,803} \right]^{0,555} \cdot H_o^{0,445} - H_o \quad (2.35)$$

La finalidad de estas funciones será proyectar anualmente la altura dominante actual del rodal para actuar como conductora del crecimiento del rodal. Si bien ya se ha demostrado las buenas aptitudes de ambas funciones para describir los patrones de crecimientos, para rodales juveniles con edades hasta los diez años podría ser conveniente emplear la función 2.35 dado el polimorfismo temprano de *Pinus radiata*. Por encima de esta edad ambas funciones son adecuadas para proyectar la altura, sin embargo la función 2.34 es computacionalmente más simple.

2.4.2.1. Validación

La primera validación, que consistió en realizar las estimaciones de las alturas dominantes en las parcelas para cada medición y compararlas con las alturas medidas, dio resultados muy alentadores para ambos sistemas (anamórfico y polimórfico). Las 86 comparaciones realizadas arrojaron similares errores absolutos medios (*EAM*) de 0,10 m que representa el 0,5 %, tanto con el sistema anamórfico como con el polimórfico. (Tabla 2.16)

Si bien ambos modelos son apropiados para expresar el crecimiento en altura, los resultados del la Tabla 2.16 demuestran una mejor aptitud general del modelo anamórfico 2.32, superando al

polimórfico 2.33. De todas maneras ello no se considera terminante como para desechar el modelo polimórfico. Como se expuso los modelos serán usados para predecir el crecimiento en altura pueden tener utilidades diferentes de acuerdo a la etapa de desarrollo del rodal.

Tabla 2.16: Estadísticos producto de la confrontación entre las alturas medidas y las estimadas por ambos sistemas de curvas.

Sistema Anamórfico

ESTADÍSTICOS	1988	1993/94	1999	General
Tamaño	38	35	13	86
E.A.M. [m]	0,11	0,10	0,08	0,10
E.A.M. [%]	0,73	0,42	0,28	0,54
E.M. [m]	- 0,21	0,35	- 0,26	- 0,12
E.M. [%]	1,97	0,88	- 0,87	1,98

Sistema Polimórfico

ESTADÍSTICOS	1988	1993/94	1999	General
Tamaño	38	35	13	86
E.A.M. [m]	0,11	0,10	0,08	0,10
E.A.M. [%]	0,73	0,42	0,28	0,54
E.M. [m]	0,41	2,42	- 0,15	2,68
E.M. [%]	1,55	10,03	- 0,43	11,15

La validación gráfica también demuestra la buena exactitud de las estimaciones para todo el rango de crecimiento de la especie (Fig.2.27). Efectivamente en la misma se aprecia la buena superposición de las alturas observadas y estimadas.

2.4.2.2. Comparación con Anteriores Curvas de Calidad de Estación

Una vez demostrada las aptitudes de ambos modelos para expresar el crecimiento en altura se pasa a realizar la comparación con los sistemas de Madrigal *et al.* (1975) y Espinel *et al.* (1997). Ésta se presenta utilizando el sistema anamórfico originado con la función 2.32, puesto que permite una análisis más completo de los posibles errores que se pueden cometer en la predicción de la calidad de estación.

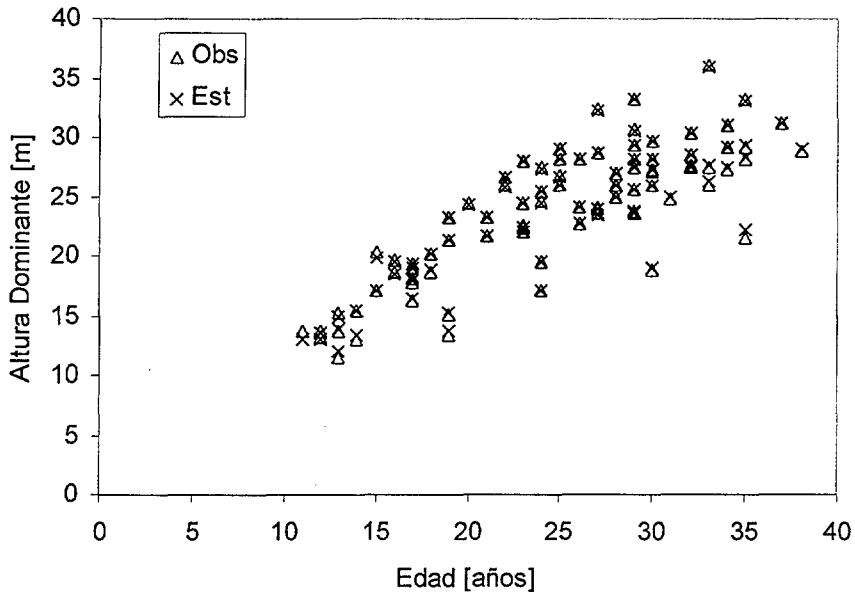


Figura 2.27: Datos observados y estimados de las alturas dominante en las parcelas permanentes.

En las Fig. 2.28 y 2.29 es posible realizar el análisis gráfico comparativo con las familias de curvas de calidad de estación definidas por Madrigal *et al.* (1975) y por Espinel *et al.* (1997), respectivamente. Del simple análisis gráfico se observan las divergencias entre los modelos anamórficos. En la Fig. 2.28 se aprecia que la curva de la peor calidad de estación son coincidentes hasta casi los 30 años, pero la otras coinciden solo parcialmente. En las curvas de calidad media hay una cierta diferencia a edades tempranas, mientras que las curvas de mejor calidad coincidirían por encima de los 20 años

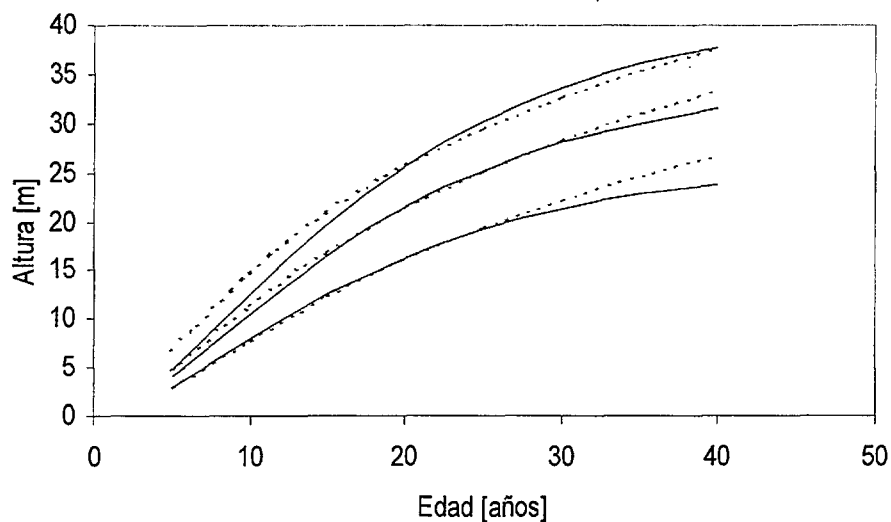


Figura 2.28: Comparación de las curvas de Espinel *et al.* (1997) (líneas discontinuas) con las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas).

Por otro lado comparando las curvas de Madrigal *et al.* (1975) se observa una gran coincidencia entre las de calidad media y hasta los 20-25 años en las curvas de la peor calidad. Las curvas de mejor calidad de estación presentan divergencias tanto a edades tempranas como tardías (Fig.2.29).

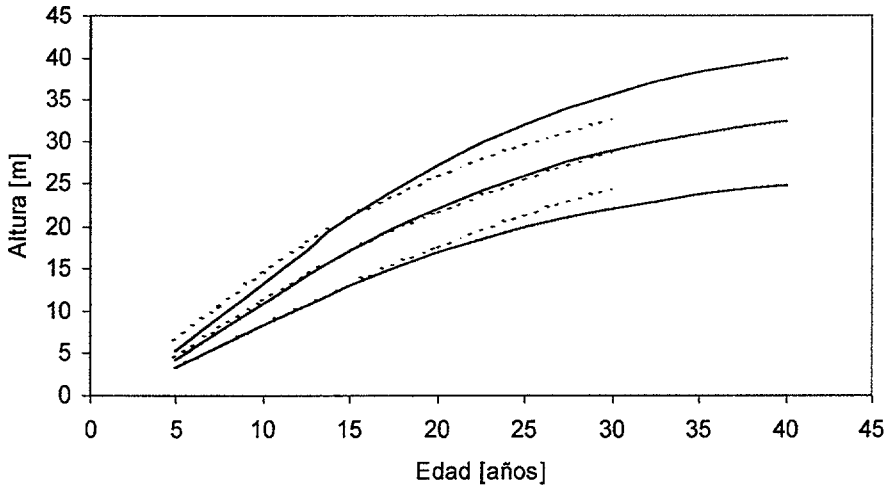


Figura 2.29: Comparación de las curvas de Madrigal *et al.* (1975) (líneas discontinuas) con las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas).

Con la finalidad de representar los errores que pueden significar las diferencias antes mencionadas en la proyección de la altura dominante, por ejemplo para estimar el IE_{25} , se realiza una comparación cuantitativa. Esta prueba consiste en proyectar desde los 10 años el sistema anamórfico ajustado frente a las curvas de Espinel *et al.* (1997) y las de Madrigal *et al.* (1975). En las Figuras 2.30 y 2.31 se puede apreciar gráficamente la prueba; en ellos se observan de una manera diferente las diferencias encontradas en las Fig. 2.28 y 2.29. Estas diferencias se cuantifican en la Tabla 2.17, la cual muestra que si se pretende estimar el IE_{25} a los 25 años de edad, los errores pueden alcanzar valores superiores al 15 %, lo que indudablemente repercutirá en la estimación de la producción del rodal.

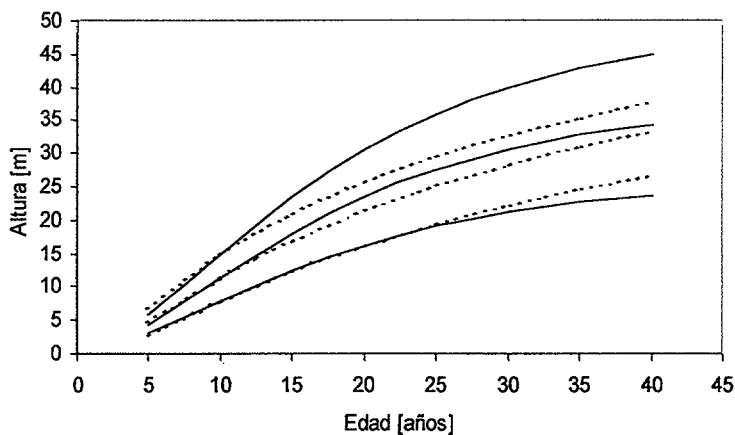


Figura 2.30: Proyecciones de las curvas de Espinel et al. (1997) (líneas discontinuas) y de las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas) a partir de las mismas alturas dominantes a los diez años y para tres calidades de estación.

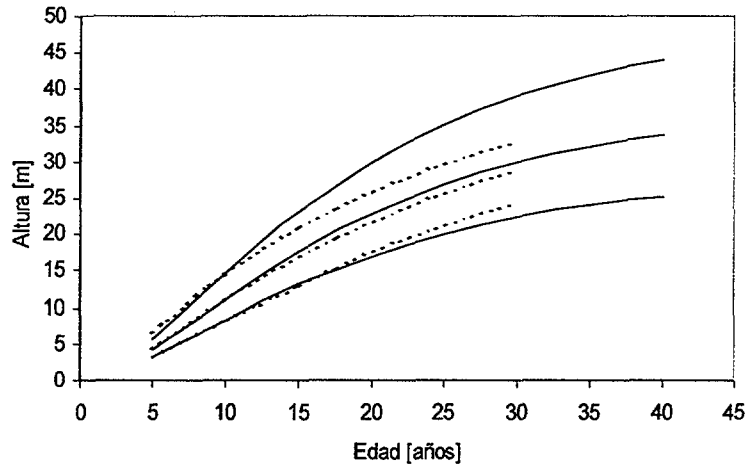


Figura 2.31: Proyecciones de las curvas de Madrigal et al. (1975) (líneas discontinuas) y las curvas anamórficas ajustadas (líneas continuas) a partir de las mismas alturas dominantes a los diez años y para tres calidades de estación.

Tabla 2.17: Diferencias porcentuales entre las estimaciones de los IE_{25} empleando las diferentes curvas de altura dominante-edad existentes.

Calidad de Estación	I	II	III	I	II	III
Altura Dominante a 10 años [m]	14,9	11,4	7,9	14,6	11,2	8,3
<i>IE</i> Espinel [m]	29,5	25,2	19,4	---	---	---
<i>IE</i> Madrigal [m]	---	---	---	29,7	25,6	21,3
<i>IE</i> Nuevo [m]	36,0	27,5	19,1	35,2	27,0	20,1
Diferencia [%]	-17,9	1,7	-8,6	-15,6	-5,2	6,0

3. CRECIMIENTO A NIVEL DE RODAL

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se ocupará del desarrollo de una serie de funciones de crecimiento del rodal que utilizarán el crecimiento en altura dominante como guía y el área basal o basimétrica como variable de respuesta. Estas funciones de transición se dividen en dos grupos, uno de ellos emplea ecuaciones muy simples que vinculan dos índices de densidad y permiten proyectar el estado actual de un rodal para cualquier período de tiempo; mientras que en el otro se utiliza la función biológica de Bertalanffy-Richards en su forma diferencial, por lo tanto proyecta anualmente el estado del rodal.

El capítulo comienza con una introducción al tema de la modelización del crecimiento y la producción a nivel del rodal. En esta introducción se realiza una revisión de la evolución de los modelos matemáticos aplicados a la ciencia forestal. Luego continúa con una descripción de las técnicas y herramientas usadas hasta la fecha y finalmente se presenta una revisión sobre los estudios llevados a cabo en el país.

Posteriormente se entra al desarrollo de los citados modelos. Para ello ha sido necesario para alcanzar los modelos finales elaborar dos hipótesis de base:

- Hipótesis sobre la mortalidad natural de las masas de *Pinus radiata* creciendo en máximas densidades. Con esta hipótesis se pretendió controlar la evolución del número de árboles vivos cuando los rodales se aproximan a las máximas densidades.
- Hipótesis de crecimiento de rodales sin intervenciones, con la cual se han podido inferir algunos parámetros, como el área basal o la tasa de crecimiento, máximos para una calidad de estación dada, y necesarios para el desarrollo de alguna de las funciones de crecimiento.

3.2. CONCEPTOS SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL RODAL

La palabra crecimiento se refiere al cambio de alguna dimensión o peso en un sistema orgánico. El incremento⁶ es el cambio en tamaño o peso de un elemento dentro de un cierto intervalo de tiempo.

En los estudios de crecimiento el área basal o basimétrica es una variable muy útil, bien usada directamente o como una variable independiente para estimar otras variables de salida del rodal. Es

⁶ En la terminología inglesa se expresa como tasa de crecimiento absoluto o relativo (growth rate).

fácilmente calculada a partir de las mediciones de diámetros o estimada a través de algún método angular (relascopio, dendrómetro, etc.). Además está fuertemente relacionada con el volumen del árbol y con el volumen por unidad de superficie del rodal.

El área basal, o las variables relacionadas con ella, fueron empleadas con éxito para obtener estimaciones muy exactas del crecimiento y la producción en volumen del rodal (Clutter, 1963; Pienaar, 1969, 1979; Sullivan & Clutter, 1972; Pienaar & Turnbull, 1973; Osumi, 1983; García, 1984, 1987, 1988, 1994b; Ito & Osumi, 1984; Pienaar & Shiver, 1984, 1986; Andenmatten *et al.*, 1997b; Gonda *et al.*, 1998; Andenmatten, 1999).

El mejor método para medir el crecimiento en área basal es empleando parcelas permanentes. La remediación de parcelas permanentes proporciona una estimación más precisa del crecimiento pasado respecto de otros métodos bajo la misma intensidad de muestreo.

Hay varios factores que influyen en la calidad de los datos suministrados por las parcelas permanentes, entre ellos están: el intervalo de tiempo entre las mediciones, la tasa de crecimiento de la/s especie/s estudiada/s, las influencias climáticas y las prácticas silvícolas. Además se origina un problema estadístico, que es la correlación entre mediciones comunes sucesivas. Esta correlación se genera porque la medición de una variable en un determinado momento incluye los valores de las mediciones anteriores.

Desde un punto de vista biológico, cuanto más corto es el período de tiempo entre las mediciones, más altas son las correlaciones entre mediciones sucesivas y más grande es la ventaja provista por las parcelas. El largo del período de las mediciones dependerá, en gran medida, de la tasa de crecimiento de la especie.

La uniformidad en los períodos de medición tiene directa influencia en los errores de estimación. Si las observaciones están uniformemente espaciadas en el tiempo los errores de aproximación al calcular los incrementos periódicos pueden ser aceptables, sobre todo si se están usando ecuaciones de diferencias. Si, al contrario, la separación entre observaciones varía sustancialmente, se debería analizar la varianza con el cambio de la longitud del intervalo (García, 1994b). Esto tiende a ser más un problema con especies de crecimiento rápido, donde las diferencias de crecimiento surgidas de fechas de medición variables son mayores (García, 1988).

Otro factor cuya influencia está relacionada con el largo del período son las prácticas selvícolas. El incremento que tuvieron los árboles cortados desde el comienzo del período hasta la corta, siempre constituye un factor de incertidumbre, que aumentará con el mayor tiempo transcurrido entre la medición inicial y la corta. Sin lugar a dudas que el mejor control es realizar la medición en el momento de la intervención.

Por otro lado la reducción del período de medición incrementa la influencia del error de muestreo, de los errores debido a las variaciones climáticas y a los de mediciones inexactas y además de la ya citadas correlaciones entre mediciones.

Respecto de las fluctuaciones ambientales que ocurren dentro del período de mediciones, García (1983, 1984, 1994b) propone como primera aproximación suponer que las mismas son del tipo "ruido blanco". Es decir, que las fluctuaciones ocurridas dentro de un período de tiempo son independientes de aquellas en otros intervalos, al menos aproximadamente y en una escala temporal adecuada. Sugiere que si además los errores de medición son comparativamente poco importantes, los errores se pueden tomar como no correlacionados.

Pero las mediciones repetidas de un mismo individuo ofrecen errores correlacionados que generan varianzas crecientes. En la práctica forestal estas correlaciones son frecuentemente ignoradas y los parámetros estimados por la técnica de los mínimos cuadrados (Amaral, 1978). A pesar de ello varios autores (Sullivan & Clutter, 1972; Buckman, 1962; Woollons & Hayward, 1985) sostienen que las estimaciones resultantes de los coeficientes del modelo son insesgadas, pero con grandes varianzas que si podrían estar sesgadas .

Empleando la técnica de mínimos cuadrados, se espera que ésta funcione si los residuos son aproximadamente independientes y normalmente distribuidos. Si las trayectorias son perturbadas por variación ambiental, estas perturbaciones tienen un efecto acumulativo, haciendo que los errores estén correlacionados y tengan varianzas crecientes en el tiempo. Fallando el supuesto de errores no correlacionados, los estimadores de mínimos cuadrados pueden ser ineficientes y los errores pueden ser fuertemente subestimados (García, 1994b).

Dada una buena y apropiada cantidad de datos, los problemas de correlación entre mediciones sucesivas pueden ser ignorados (Woollons & Hayward, 1985). La combinación de datos longitudinales –series de crecimientos- con transversales –datos temporales- puede ayudar a evitar los efectos de la posible correlación entre mediciones. En términos generales los riesgos enunciados podrían ser evaluados con la realización de adecuadas validaciones de las salidas de los modelos. Al confrontar las estimaciones obtenidas con el modelo contra datos observados independientes y provenientes de un amplio espectro de situaciones, es posible determinar la exactitud con la que trabaja el modelo y si las salidas están afectadas por algún sesgo.

La estructura de errores para un sistema dinámico puede modelarse a través de una entrada u en la función de transición, donde u es un proceso estocástico que representa las fluctuaciones ambientales, proceso al cual se le podría adicionar los errores de medición.

El problema es idear modelos que sean suficientemente realistas y al mismo tiempo matemáticamente tratables (García, 1994b).

3.3 MODELIZACIÓN

En la ciencia forestal, como en biología y economía, se ha intentado expresar el crecimiento a través de una fórmula matemática. Una ecuación es un intento por describir algún fenómeno que puede estar controlado por una compleja ley biológica, física o económica.

En general, un modelo es una representación simplificada de algún aspecto de la realidad que se pretende estudiar y analizar. El desarrollo de un modelo se sustenta en ciertas hipótesis o leyes y requiere, cada día más, del auxilio de la matemática, la estadística y la informática. Principalmente con el progreso en computación se hace más fácil manejar modelos cada vez más complejos. Los ordenadores han llegado a ser indispensables como herramientas para el desarrollo y uso de muchos modelos, aunque los principios básicos que los sustentan sean los mismos que han surgido con los primeros estudios de crecimiento y producción.

Un modelo es un sistema que representa un conjunto de elementos unidos por algún grado de interacción o interdependencia (Morales *et al.*, 1979). Cada elemento del sistema puede considerarse como un subsistema o componente. Muchos sistemas poseen un componente que hace las veces de guía o conductor. Así, por ejemplo, un modelo para la predicción del crecimiento y producción a nivel de rodal, puede poseer una función de crecimiento en altura dominante que actúa como conductora para el resto del sistema.

Al tratar de mejorar los métodos de estimación las matemáticas se complican cada vez más, y el esfuerzo computacional aumenta rápidamente. Es difícil saber en un caso particular cuánto refinamiento producirá mejoras que valgan la pena (García, 1994b).

Las técnicas de ajuste ampliamente difundidas para el desarrollo de modelos de crecimiento y producción son las regresiones lineales y no lineales, aunque hay autores que, en el campo forestal, emplean el método de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros (García, 1983, 1984, 1994b; Ito & Osumi, 1994; Erviti, 1989; Ortega, 1989).

Al emplear las técnicas de regresión, hay una serie de asunciones que se deben cumplir:

- (a) Las variables independientes son medidas sin error.
- (b) Los residuales son independientes.
- (c) Los residuales están normalmente distribuidos.
- (d) La varianza de los residuos es homogénea.

Si ello se cumple se considera al modelo de regresión ajustado como insesgado.

Una de las características principales de la regresión no lineal, es que no provee una única e insesgada solución para un grupo dado de variables. La solución no lineal, a diferencia de la lineal, es determinada iterativamente y puede estar influenciada por el método de estimación y de las condiciones de partida especificadas por el técnico (Vanclay, 1994). Así entonces aunque se haya alcanzado alguna solución (convergencia), debe tenerse cuidado que no se haya arribado a un *mínimo local*.

Una serie de pasos son sumamente importantes cuando se pretende valorar y aplicar un modelos. Estas actividades se denominan verificación, validación y calibración.

Verificación: prueba el modelo con los datos sobre el cual fue basado, se realiza para eliminar fallos en la lógica de programación, defectos de los algoritmos y sesgos en los cómputos (Bruce & Wensel, 1987). En muchos estudios se la denomina autovalidación.

Validación: consiste en probar las salidas del modelo contra muestras independientes de manera de evaluar la exactitud de las predicciones o proyecciones. Cada relación funcional de transición o de salida y el modelo de simulación completo debe someterse a pruebas de validación rigurosas, para comparar el crecimiento y la producción simulados con datos empíricos reales (Morales *et al.*, 1979). Particularmente importante es la validación cuando se están empleando datos correlacionados provenientes de series reales de crecimientos, ya que se estaría obteniendo una estimación de la exactitud de las predicciones a través de los desvíos encontrados. Las validaciones se pueden realizar en forma gráfica, analizando las tendencias entre las observaciones y las estimaciones, y en forma analítica a través de cuantificar los desvíos o errores.

Calibración: es ajustar un modelo a ciertas condiciones particulares de una localidad o región y que pueden diferir de aquellas sobre las cuales el modelo fue construido. La adecuación se realiza ajustando los parámetros del modelo. De hecho los ajustes que se realizan en cualquier tabla de producción para acercar sus parámetros a las condiciones particulares de un monte es una forma de hacer una calibración.

Los conceptos de validación y verificación ya han sido intensamente aplicados en el capítulo de calidad de estación. Respecto con el proceso de calibración, este podría necesitarse en alguna etapa posterior a la elaboración del presente modelo de *Pinus radiata*, por ejemplo si se quisiera aplicar en otra provincia del País Vasco o en alguna localidad de Galicia o Cantabria. No se debe confundir esta etapa de la modelización con la calibración de las funciones polimórficas de calidad de estación, aunque en su esencia haya importantes similitudes.

Considerando que el modelo en sí es una simplificación de una relación o sistema, en la selección del modelo apropiado, deben evitarse aquellos de extrema complejidad. Es importante tener en cuenta en la selección las bondades matemáticas y biológicas de las salidas más que su complejidad en términos y variables.

Cualquier biometrista puede alertar de los peligros del sobre-dimensionamiento de la función con variables independientes y los efectos de la multicolinealidad sobre los parámetros de la regresión, los cuales podrían resultar en estimaciones extrañas. Solamente la experiencia podrá escudar al técnico sobre la mistificación de la construcción de índices complicados y de estimadores que aparecen para explicar el juego de datos manipulados. Los buenos modeladores forestales dependen más del conocimiento de selvicultura y de los principios biológicos del crecimiento que de pruebas estadísticas rigurosas (puras) en la selección de modelos y algoritmos del crecimiento (Bruce & Wensel, 1987).

Continuando la idea, el problema en el desarrollo de modelos se puede sintetizar en lo siguiente:

- Definir claramente las hipótesis biológicas que sustentan los modelos matemáticos.
- Obtener datos de alta calidad y confiabilidad y buena cantidad.

La buena preparación del técnico permitirá evaluar adecuadamente los comportamientos del modelo, a raíz de comprobar la lógica y el cumplimiento de las hipótesis de base, todo ello complementado con la evaluación estadística de los resultados. Otro aspecto importante en la eficiencia en la construcción de un modelo es explotar al máximo la base de datos disponibles.

3.4. MODELOS A NIVEL DE RODAL: CRECIMIENTO EN ÁREA BASAL

Hay cierta coincidencia en clasificar genéricamente los modelos de crecimiento forestal (Clutter *et al.*, 1983; Woollons & Hayward, 1985; García, 1988; Vanclay, 1994, 1995) en:

- Modelos a nivel de rodal: pueden ser implícitos: trabaja con variables agregadas del rodal, tales como área basal, diámetro medio, volumen/ha, árboles/ha, espaciamiento, etc.; o explícitos: que además trabajan con distribuciones diamétricas.
- Modelos a nivel de árbol: pueden ser independientes de la distancia, que describen el estado con datos de árboles individuales, pero sin especificar la ubicación de los mismo; o

dependientes de la distancia o de posición, que incluyen además las coordenadas o la posición relativa de los vecinos – o del más cercano-.

En la presente investigación se profundizaron los modelos a nivel de rodal que proyectan las variables agregadas del rodal, como por ejemplo el área basal o el número de árboles por hectárea.

A través de los años el crecimiento o incremento del área basal de un rodal ha sido predicho como una función de ciertas variables independientes o predictoras. Las variables predictoras más importantes son: la edad, la calidad de estación y la densidad expresada en términos de área basal o del número de árboles por unidad de superficie. A veces la densidad también es expresada en forma relativa a través de algún índice de densidad o de ocupación.

Estas funciones han sido tanto del tipo empíricas como del tipo biológicas.

Los modelos empíricos no ofrecen explicación biológica a través de sus parámetros o entre las variables independientes y la de respuesta. Es decir son expresiones que describen el comportamiento de la variable de respuesta sin intención de identificar las causas o de explicar el fenómeno.

En los modelos biológicos o teóricos, en cambio, subyace una hipótesis fundamental asociada con la causa del fenómeno, y por lo tanto se pueden evaluar e interpretar a través de los valores de sus parámetros y las variables.

En las funciones que expresan el crecimiento del área basal desarrolladas a través del tiempo, tanto empíricas como biológicas, hay, como se dijo, cuatro variables independientes que se han asociado a esta variable con significativas correlaciones, ellas son: la edad, la calidad de estación, el área basal y el número de pies.

- Edad del rodal (t): ha sido la variable independiente primaria para los estudios de crecimiento y producción de rodales regulares (Spurr, 1952; Buckman, 1962). La dependencia de los procesos fisiológicos asociados al crecimiento, con la edad del organismo ha hecho de ésta una variable de significativa correlación con el fenómeno. En general a edades juveniles se presenta un rápido incremento anual en área basal del rodal, hasta llegar a la culminación, momento en el cual el mismo empieza a decrecer, primero rápidamente y luego cada vez más lentamente a medida que se acerca a la vejez. En los últimas décadas el uso de esta variable ha sido discutida para la predicción del crecimiento (García, 1983, 1984, 1987, 1994b; Andenmatten *et al.*, 1997; Andenmatten, 1999). Sin cuestionar su influencia se afirma que el uso de la edad como variable predictora es conceptualmente poco satisfactorio ya que el tiempo transcurrido no tiene presencia física

(excepto como un número de anillos de crecimiento), y por lo tanto no se le debería dar un significado causal. En realidad cuando los forestales dicen edad, a menudo están pensando tamaño. De acuerdo al modelo y para una estación dada, la altura dominante está funcionalmente relacionada con la edad, y podemos reemplazar por ende, la edad por la altura dominante. En la práctica estas substitución no cambia las cosas, pero es conceptualmente más clara y facilita el pensamiento en situaciones más complicadas (García, 1994b).

- Calidad de Estación: ha sido tradicionalmente la segunda variable independiente en estudios de crecimiento y producción (Amaral, 1978). Su empleo puede ser como altura dominante o como índice de estación.
- Índice de Estación (IE): no siempre el IE ha mostrado una buena correlación con el crecimiento en área basal, Buckman (1962) señala que la correlación con IE suele ser muy baja, debido a que los efectos de otras variables presentes en el modelo, primariamente edad y densidad. Este autor también remarca que algunos factores tales como fluctuaciones climáticas, ataques de insectos y mortalidad, pueden alterar en cierto grado la relativamente pobre relación entre el crecimiento en área basal y el IE , especialmente en cortos períodos de medición. En dos modelos empíricos desarrollados para expresar el incremento anual en área basal de *Pinus pinaster*, Álvarez *et al.* (1999) aplicando el ajuste por regresión paso a paso desecharon el IE como variable independiente por no mejorar la precisión o explicación que daban el área basal (G) y la edad (t).
- Altura Dominante (H_0): como ya se expresó son varias las razones para emplear esta variable de estado:
 - a) Trae implícito el concepto del paso del tiempo, por lo que podría usarse en reemplazo de la edad.
 - b) No es afectada, dentro de un amplio rango, por la densidad del rodal.
 - c) Como consecuencia de lo anterior se constituye a través de sus funciones en un eficaz componente conductor para el desarrollo de un modelo de crecimiento y producción del rodal.
 - d) Está muy bien correlacionada con el volumen bruto total del rodal.
- Área Basal (G): es una variable de estado indicadora de la densidad del rodal, ya que su magnitud está correlacionada con el número y los tamaños de los árboles. Además junto a la

altura dominante permite la estimación del volumen del rodal (Morales *et al.*, 1979). En términos generales, se puede expresar que hay concordancia en aceptar la ley de Langsaeter (Daniel *et al.*, 1982), referida a que el crecimiento en área basal o volumen por unidad de superficie se mantiene sensiblemente constante dentro de una amplia variedad de densidades. Mientras que en rodales muy abiertos, tales como aquellos con menos del 50% de ocupación, o muy cerrados, como por ejemplo con más del 100% de espesura, el crecimiento si es afectado por la densidad (Amaral, 1978). En realidad, la densidad del rodal es importante en el control del tamaño y calidad de los árboles del rodal. En este sentido entonces, las claras están orientadas a redistribuir el crecimiento en los mejores árboles. Vista desde otro ángulo, Pienaar & Turnbull (1973), plantean la ley expresando: "dentro de un amplio rango de regímenes de claras, la tasa de crecimiento (absoluta) en un rodal clareado es idéntica a aquella en un rodal no clareado con la misma edad y área basal que el rodal clareado". Con ello se asume que el incremento en área basal (y volumen total) es independiente de las claras. No es evidente que el incremento en área basal de un rodal, inmediatamente después de la clara, sea igual al de otro que, con la misma área basal, no haya sido clareado (Morales *et al.*, 1979; García, 1990), especialmente con claras intensas. El crecimiento para el período inmediatamente después de la clara (o poda) puede no ser el mismo que si el tratamiento no se hubiera realizado, ya que los árboles podrían necesitar un tiempo para adaptarse a las nuevas condiciones del medio. En estos casos, una variable de estado que represente el grado de ocupación de la estación o cierre del dosel puede ser ventajoso (García, 1994b).

- Área Basal máxima ($G_{m\acute{a}x}$): es la mayor superficie, expresada generalmente en metros cuadrados por hectárea, de la sección transversal de todos los árboles a la altura de 1,3 m, que puede sustentar un rodal en un punto del tiempo (Morales *et al.*, 1979). También recibe esta denominación aquella área basal máxima que en una estación puede ser alcanzada por una especie. Ésta es, justamente, una variable predictora de singular valor en los métodos desarrollados en la presente tesis.

El área basal máxima es utilizada en la modelización con los propósitos de:

- a) establecer un indicador de la densidad del rodal; este suele expresarse como $G_t/G_{tm\acute{a}x}$ o como $(1-G_t/G_{tm\acute{a}x})_t$, donde G_t es el área basal al tiempo t y $G_{tm\acute{a}x}$ es la correspondiente área basal máxima al mismo momento t .
- b) Predecir la mortalidad debido a la competencia intraespecífica regular. En los modelos se asume que esta mortalidad comienza a ocurrir cuando G_t se aproxima a $G_{tm\acute{a}x}$.

c) Para fijar la meta en cada calidad de estación, a la cual tenderá el área basal presente o teórica de un rodal en un momento dado.

- Número de árboles por hectárea (M): esta variable de estado está relacionada con la distribución del área basal o volumen del rodal. Es la variable que más directamente se corresponde con la mortalidad, por ello las funciones de mortalidad regular -por competencia- usualmente se expresan en esta variable. En general los modelos de simulación tienen alguna expresión para el número de árboles. También es la variable de densidad que integra algunos índices de densidad y todas las expresiones forestales de la ley del autoaclareo o clara natural.

3.4.1. Modelos Empíricos

Durante muchos años, en la mayoría de las fórmulas matemáticas usadas en investigación forestal no se consideró la biología del crecimiento. Por el contrario, la literatura revela que los modelos empíricos fueron siempre los más frecuentes (Prodan *et al.*, 1997).

Aunque algunos de estos modelos dan razonables estimaciones del crecimiento en área basal, su confiabilidad depende en gran medida de la cantidad y calidad de la base de datos. Además debe prestarse especial atención a las propiedades matemáticas y biológicas de los mismos.

Un ejemplo típico de este tipo de modelos es el propuesto por Buckman (1962) para *Pinus resinosa* en Minnesota, Estados Unidos, quién utilizó la siguiente ecuación para predecir el incremento en área basal:

$$\Delta G = 1,689 + 0,411 \cdot G - 0,0002 \cdot G^2 - 0,077 \cdot t + 0,0002 \cdot t^2 + 0,064 \cdot IE$$

Donde:

ΔG : incremento periódico anual neto en área basal.

G : área basal en pies cuadrados/acre.

t : edad en años.

IE : índice de estación.

La edad mínima muestreada fue de 25 años, de manera que la expresión no es adecuada para rodales juveniles.

Estos modelos corren serios riesgos de violar algunas de las propiedades funcionales o leyes biológicas. Uno de los inconvenientes que se empezó a estudiar con modelos empíricos, es el referido a la compatibilidad entre las funciones de crecimiento y la de producción.

Los estudios de compatibilidad entre los modelos de crecimiento y producción comenzaron en forma independiente en investigaciones llevadas a cabo por Buckman (1962) y Clutter (1963). Estas investigaciones abrieron una nueva fase en los estudios de crecimiento y producción (Amaral, 1978). Posteriormente apareció el trabajo de Sullivan & Clutter (1972), que continuaron trabajando con funciones empíricas para refinar el trabajo de Clutter (1963).

Buckman (1962), enfatiza que el crecimiento y la producción no son fenómenos independientes y no deberían tratarse como tal. Él define la producción como la suma de un número de incrementos netos anuales. Demostró que si el modelo de crecimiento es desarrollado independientemente del modelo de producción, los resultados obtenidos por suma de los incrementos para un período particular generalmente difieren de aquellos obtenidos directamente por el modelo de producción para el mismo período.

Un año después, Clutter (1963) enunció que: los modelos de crecimiento y rendimiento son compatibles cuando el modelo de rendimiento puede ser obtenido por suma del crecimiento predicho a través de un período de crecimiento apropiado, o más precisamente, cuando la forma algebraica del modelo de rendimiento puede ser obtenida por integración matemática del modelo de crecimiento.

Clutter (1963), trabajando con *Pinus taeda* propone, quizás el sistema de ecuaciones empíricas más relevante para la modelización del crecimiento y la producción. Emplea una función de volumen a nivel del rodal, que es una variante del modelo lineal propuesto por Schumacher (1939). La función posee como variables independientes, el área basal, el índice de estación y la edad, las mismas variables empleadas por Buckman un año antes. Además expresó el área basal como una función integral dependiente de la edad y el índice de estación, la cual derivada expresa el incremento instantáneo en área basal en función del área basal misma, la edad y el índice de estación. Todo ello produjo un sistema de cinco ecuaciones compatibles que pueden utilizarse para estimar el volumen actual, los crecimientos en área basal y volumen y el área basal y el volumen futuro.

El sistema de ecuaciones tratadas por Clutter (1963) fue refinado por Sullivan & Clutter (1972), para producir estimaciones consistentes de los crecimientos y producciones actuales y futuros. Emplearon el modelo de Schumacher-Clutter estimando el crecimiento y la producción como función del índice de estación, la edad y las áreas basales inicial y final. El sistema de ecuaciones empíricas puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\text{Ln}V_1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{IE} + \beta_2 \cdot t_1^{-1} + \beta_3 \cdot \text{Ln}G_1 \quad (1)$$

$$\text{Ln}V_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{IE} + \beta_2 \cdot t_2^{-1} + \beta_3 \cdot \text{Ln}G_2 \quad (2)$$

$$\text{Ln}G_2 = \text{Ln}G_1 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right) + \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + \alpha_2 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \text{IE} \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2) y simplificando se tiene:

$$\text{Ln}V_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{IE} + \beta_2 \cdot t_2^{-1} + \beta_3 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \text{Ln}G_1 + \beta_3 \cdot \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + \beta_3 \cdot \alpha_2 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \text{IE} \quad (4)$$

$$\text{Ln}V_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{IE} + \beta_2 \cdot t_2^{-1} + \beta_3 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \text{Ln}G_1 + \beta_4 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) + \beta_5 \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \text{IE} \quad (5)$$

Los autores mostraron que la ecuación 5 es invariante para diferentes períodos de proyección y que cuando el tiempo transcurrido es nulo, la función se transforma en la citada de Schumacher extendida (1).

Amaral (1978) trabajando con series reales de crecimiento de *Pinus taeda* ajustó un modelo (entre otros) empírico lineal del incremento en área basal contra diez términos independientes que contenían variables simples y combinadas del rodal. Empleó para la selección de variables y del modelo general el método de regresión paso a paso. Concluyó que si bien el ajuste estadístico fue bueno el comportamiento del crecimiento era errático ya que no podía describir apropiadamente la tendencia de las series reales, por lo que desechó el modelo. No pudo confirmar la ley de producción final común para rodales de diferentes densidades iniciales que crecen en una misma estación.

Pienaar & Shiver (1986) aplican el sistema de Clutter (1963) y Clutter & Sullivan (1972) con *Pinus elliotii* en un intento de generalizar este sistema de ecuaciones empíricas para predecir el área basal y el crecimiento en área basal en rodales con y sin claras. Los mismos autores (1984) venían de perfeccionar con los mismos datos un modelo de predicción del crecimiento en área basal aplicando la función biológica de Bertalanffy-Richards.

En el modelo empírico generalizado, Pienaar & Shiver (1986) proponen algunas modificaciones, la calidad de estación es expresada en términos de altura dominante a una edad dada, la densidad en términos de número de árboles/ha y la más particular es la incorporación de un término modificador.

Este término modifica al área basal de una plantación sin claras a una edad, una altura dominante y un número de árboles dados, para predecir el área basal de una plantación homóloga clareada.

$$\ln(G) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(N) + \beta_2 \cdot t^{-1} + \beta_3 \cdot \ln(H_o) + \beta_4 \cdot \left(\frac{\ln(N)}{t} \right) + \beta_5 \cdot \left(\frac{\ln(H_o)}{t} \right) + \beta_6 \cdot \left(\frac{N_t \cdot t_t}{N_a \cdot t} \right) \quad (6)$$

Donde:

N : número de árboles/ha presentes.

H_o : altura dominante.

N_t : número de árboles/ha extraídos en la última clara.

N_a : número de árboles/ha remanentes en la última clara.

t : edad a la que ocurrió la última clara.

Este término modificador está relacionado con la diferencia entre las áreas basales de rodales con y sin clara, de la misma edad, árboles/ha y altura dominante, y dependerá de la edad a la cual se realiza la clara y de la intensidad de la misma. En estas condiciones, la diferencia en área basal entre ambos rodales para un mismo número de árboles/ha será mayor a mayor edad y por otro lado cuanto mayor sea dicho número de árboles/ha post-clara, menor será la diferencia con el homólogo no clareado. De manera que cuanto más tiempo haya pasado desde la última clara, de una intensidad (N_t/N_a) dada, más grande y más cercano a uno será el término modificador.

Con el paso del tiempo los modelos empíricos han dejado paso a los modelos biológicos, siendo en la actualidad los de uso más extendido. A la vista de la revisión desde los sistemas de ecuaciones empíricas propuestas por Clutter (1963) y Sullivan & Clutter (1972) no han aparecido modelos de este tipo que los superen.

3.4.2. Modelos Biológicos

Hasta la década de 1980 los modelos empíricos han sido mucho más frecuentemente usados que los biológicos (Amaral, 1978), pero en las últimas dos décadas se le ha prestado particular atención al desarrollo de los modelos biológicos o teóricos. En toda modelización matemática de los procesos biológicos sólo puede realizarse una valoración apropiada de los mismos si todo el conocimiento acerca del fenómeno es tomado en cuenta. El conocimiento de las leyes del crecimiento del bosque y su formulación analítica puede contribuir a un entendimiento preciso de un proceso de crecimiento estudiado.

En la mayoría de los casos las curvas de crecimientos tienen una forma sigmoide, entre cuyas características principales se destacan: a) son asintóticas y b) poseen un punto de inflexión a una edad que variará con la especie y la calidad de estación.

Si estas dos características del crecimiento son satisfechas por la función, ésta debería ser razonablemente exacta y resolver el problema estadístico-matemático de la predicción del crecimiento y la producción.

En particular al crecimiento en volumen, García (1994a; 1998-comunicación personal) en base al seguimiento de parcelas permanentes de *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.*, ha sugerido que la asíntota esperada podría no ocurrir, manteniendo el crecimiento de edades avanzadas en forma más o menos lineal.

Los modelos biológicos han logrado expresar apropiadamente los crecimientos en área basal del rodal, principalmente en lo que se refiere a la forma de la curva y a permitir estimar el área basal máxima que es posible alcanzar en una determinada estación. Este es un punto en donde algunos de los modelos empíricos pueden fallar.

Uno de las funciones biológicas más extendidas para la simulación del crecimiento del rodal ha sido la de Bertalanffy-Richards y sus derivaciones.

A partir del fracaso para modelar el crecimiento en área basal de *Pinus taeda* con las funciones empíricas, Amaral (1978) comenzó a trabajar con el modelo de Bertalanffy-Richards para expresar el área basal en función de la edad. En primer lugar intentó aproximar los valores asíntóticos de área basal para tres calidades de estación y diferentes densidades iniciales. Para ello experimentó con una expresión lineal, luego de observar el comportamiento de los pares de datos: incremento en área basal (ΔG) y área basal inicial (G). La expresión inicial fue:

$$\Delta G = a + b \cdot G \quad (7)$$

Al encontrar una importante influencia de la densidad, expresada en número de árboles/ha (N), la incorporó a la ecuación (7), quedando:

$$\Delta G = a + b \cdot G + c (G/N) \quad (8)$$

Con la expresión (8) fue estimando en forma gráfica los valores de área basal máxima para cada calidad de estación y diferentes densidades iniciales. Para realizar la estimación del área basal máxima, graficó para cada estación y densidad inicial las estimaciones de las variables ΔG y G , y cuando la línea estimada cortaba al eje X (área basal), allí registraba el valor de área basal. Los valores de asíntota obtenidos de esta forma fueron empleados para ajustar el modelo de Bertalanffy-Richards en su forma monomolecular (sin punto de inflexión). El punto de interés es que si la

estimación del crecimiento de *Pinus taeda* depende de las citadas ecuaciones empíricas (7) y (8), la ley de asíntota común no se cumpliría.

Pienaar (1969, 1979) y Pienaar & Turnbull (1973) hicieron una importante contribución para el desarrollo de teorías cuantitativas y sus aplicaciones a los estudios de crecimiento y producción de los bosques.

Ellos sacaron a relucir algunos conceptos y formulaciones matemáticas pasadas, las cuales habían sido aplicados en otros campos de la biología y la dinámica poblacional, mostrando como estos modelos de crecimiento deberían ser adecuados en la ciencia forestal. Sus estudios fueron realizados con el modelo de Bertalanffy-Richards, resaltando el cumplimiento de la ley de producción final común en cada calidad de estación. De acuerdo a ellos el término producción asíntótica significa el nivel de saturación final en biomasa o volumen de un rodal. Teóricamente este nunca puede ser alcanzado, aunque fluctuaciones alrededor de este valor asíntótico pueden ser observadas en la realidad. Esta teoría sería aplicable para ciertos límites de densidades iniciales.

Los citados estudios comienzan con la discusión de Pienaar (1969) sobre la aplicación del modelo de Bertalanffy-Richards para la construcción de las tablas de producción de tercera generación. El modelo es aplicado para la predicción del área basal, considerando que, si existe una relación alométrica entre dicha variable y el volumen, el modelo de crecimiento puede aplicarse a ambos, resultando con ello en dos funciones relacionadas, una de transición en área basal y una de salida en volumen. Trabaja con series de crecimientos reales de *Pinus elliottii* provenientes de rodales con y sin claras y para densidades iniciales que van desde los 250 hasta los 3.000 árboles/ha. Asume que los parámetros de la función relacionados con la asíntota (A) y el punto de inflexión (m) permanecen constantes para las diferentes densidades del rodal y en una determinada calidad de estación. Con ello el parámetro relacionado con la tasa de crecimiento (k) es el determinante de la forma de la curva y se transforma en una especie de índice relacionado directamente con el número de árboles por unidad de superficie. Concluye que el parámetro k se mantendrá sensiblemente constante si la densidad no varía, por lo que al realizar una clara el valor del parámetro bajará en relación directa. La hipótesis subyacente que se ratifica con este estudio es la de la existencia de un área basal máxima común en cada calidad de estación.

Posteriormente Pienaar & Turnbull (1973) ratifican los resultados de Pienaar (1969), encontrando que los crecimientos en área basal de *Pinus elliottii* tendían a converger a un valor común, para diferentes densidades iniciales. A diferencia de los resultados obtenidos por Amaral (1978), estos autores trabajando con series reales de crecimientos de *Pinus elliottii* encontraron que las producciones en área basal para densidades iniciales de 200 a 1.200 árboles/ha, tendían a converger a un similar nivel final. Con ello la culminación del incremento corriente anual es inversamente proporcional a la densidad inicial.

En un estudio sobre el crecimiento en área basal de *Cryptomeria japonica* y *Chamaecyparis obtusa*, Ito & Osumi (1984), aplican la función de Bertalanffy-Richards en tres variantes. El estudio se basó en series reales de crecimientos bajo diferentes regímenes de claras. Encontraron pocas diferencias entre los ajustes de las funciones con los parámetros: asíntota (A) y punto de inflexión (m) locales o globales, ratificando con ello lo propuesto por Pienaar & Turnbull (1973) respecto a que la función es apropiada para describir el desarrollo de rodales con y sin claras, empleando el parámetro relacionado con la tasa de crecimiento (k) como un factor de la densidad presente en el rodal.

3.5. LA APROXIMACIÓN A LA TEORÍA DEL ESPACIO DE LOS ESTADOS

La teoría del espacio de los estados tiene su precursor en la modelización del crecimiento de los bosques en García (1979, 1984, 1987, 1988, 1994b). Sus trabajos más importantes en este sentido se han realizado en Nueva Zelanda con repoblaciones de *Pinus radiata*, aunque sus estudios también están extendidos por Chile y España.

Un par de conceptos simples pueden aclarar la filosofía del modelado del crecimiento. Cualquier sistema puede modelarse especificando (García, 1988):

- Una descripción adecuada del sistema en cualquier punto del tiempo (el estado del sistema).
- La tasa de cambio de estado en función del estado actual (una función de transición local).

La teoría se basa en representar el rodal por un número suficiente de variables que describen el estado del mismo en un momento dado, de manera que, a) los futuros estados son determinados por el estado actual y las acciones futuras, y b) la información de interés, tal como volumen, puede ser derivada a partir de las variables de estado. En otras palabras, las variables de estado resumen los eventos históricos afectando el futuro desarrollo del rodal (García, 1988).

Para proyectar el estado inicial la función de transición puede expresarse implícitamente de acuerdo a:

$$x(t) = F [x(t_0), U, t - t_0] \quad (a)$$

Dicha expresión (a) quiere significar que un estado en un momento final t , denominado $x(t)$, dependerá de un vector de estado inicial, denominado $x(t_0)$, de las acciones aplicadas dentro del período de proyección, denominado U , y del período de proyección, $t - t_0$.

Este estado final puede transformarse en la variable de interés por intermedio de una función de salida o transformación (b):

$$Y_{(t)} = f[X_{(t)}] \quad (b)$$

Las funciones de transición (a) se proyectan para períodos de tiempo en donde no se realizan intervenciones selvícolas.

Si para la expresión (a) se emplea una función de transición local de la forma diferencial $dx/dt=f(x, u)$, la cual puede ser integrada, se satisfacen todas las propiedades que una función de transición debe tener: consistencia, composición y causalidad. Además se cumple la propiedad de compatibilidad entre el crecimiento y la producción propuesta por Clutter (1963). Las propiedades funcionales pueden definirse de la siguiente manera (García, 1994b):

- a) Consistencia: si el tiempo transcurrido es nulo, el estado final es idéntico al inicial.
- b) Composición: el resultado de proyectar el estado inicial desde t_0 hacia t_1 y luego desde t_1 hacia t_2 , debe ser el mismo que si proyectara de una vez desde t_0 a t_2 .
- c) Causalidad: un cambio del estado sólo puede ser causado por actuaciones ocurridas dentro del intervalo de tiempo de proyección y no por eventos en otros períodos.

En definitiva la aproximación del espacio de los estados evita la necesidad de modelar directamente las complejas relaciones que, dependientes del tiempo, ocurren entre los ingresos y salidas, a través de la descripción del estado del sistema en un punto en el tiempo y modelizar la tasa de cambio de dicho estado (Vanday, 1994).

Aplicando esta filosofía, García (1983, 1984, 1987, 1994b) desarrolló un grupo de ecuaciones diferenciales estocásticas. Las ecuaciones diferenciales son una generalización multivariada del modelo de Bertalanffy-Richards con un proceso estocástico adicionado para representar variaciones climáticas y para el caso de la altura dominante, un segundo componente aleatorio para representar el error de medición (Goulding, 1994). Estos errores producen desviaciones de la curva de crecimiento más probable y pueden ser considerados como resultado del efecto acumulativo de disturbios aleatorios que actúan por cortos períodos de tiempo (García, 1983).

Un aspecto también característico y ya mencionado, es el reemplazo de la variable edad por una variable de estado como la altura dominante.

3.6. ÍNDICES DE DENSIDAD (*ID*)

Los índices de densidad constituyen una importante herramienta, no sólo para describir el estado de ocupación del sitio por el rodal, sino para fijar pautas o límites de manejo, permitir comparaciones entre rodales que pueden diferir en sus edades y/o sus densidades o para predecir estados futuros del rodal.

Estos índices son una expresión o medida relativa de la densidad del rodal, expresada ésta última en número de árboles, área basal o volumen por unidad de superficie, y asociada a alguna variable relacionada con el tamaño de los árboles, como el diámetro promedio cuadrático, la altura dominante o el volumen promedio. El Índice de Densidad del Rodal (*IDR*) postulado por Reineke (1933), el Factor de Espaciamento o Espaciamento Relativo (*FE*) de Hart-Becking (1954) o la Densidad Relativa de Curtis (1982), son ejemplos de ello, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables que integran tres índices de densidad del rodal: *IDR*, Índice de Densidad del Rodal; *FE*, Factor de Espaciamento y *DR*, Densidad Relativa.

Índice de Densidad	Variable Tamaño	Variable Densidad
IDR	Diámetro promedio	Número de árboles
FE	Altura dominante	Número de árboles
DR	Diámetro promedio	Área basal

A nivel de planificación silvicultural los *ID* han sido ampliamente utilizados para construir los Diagramas de Manejo de la Densidad (*DMD*), que permiten circunscribir gráficamente el rango de crecimiento de un rodal, a través de las variables tamaño-densidad empleadas en el índice respectivo.

Los *DMD* son simples modelos promedios del rodal, que relacionan variables tamaño-densidad del mismo y se presentan en una forma gráfica. Una de las relaciones más extendidas, y también cuestionada, es la regla o ley de los $-3/2$, autoaclareo o clara natural, que relaciona el volumen del árbol promedio y la densidad de rodales cerrados (Long & McCarter, 1984).

Similar, y matemáticamente relacionadas, entre las relaciones tamaño-densidad se incluyen aquellas relaciones de la altura dominante (Becking, 1954, Wilson, 1979) o el diámetro promedio (Reineke, 1933), con el número de árboles por hectárea.

Los *DMD* son un atractivo mecanismo para la planificación selvícola porque le permite al técnico fijar una meta productiva y entonces seleccionar las combinaciones de espaciamento inicial y claras que permitirían alcanzar el objetivo (Cameron, 1988).

Poseer información sobre las densidades máximas promedios, permite establecer las llamadas zonas de manejo, que constituyen las fajas de densidades relativas en las cuales se debe manejar un rodal para el logro de determinados objetivos productivos. Estas zonas se establecen como un porcentaje de las densidades máximas promedios esperadas (Fig.1).

Estas posibilidades de expresiones gráficas del *IDR* y del *FE* permiten, entonces, su uso para la planificación del manejo de rodales a través del control de la densidad. Para ello es importante determinar, las densidades máximas promedio que representan la línea de referencia superior, la densidad mínima o de inicio de la competencia intraespecífica, que constituye la línea de referencia inferior y entre ellas la zona de manejo del rodal para la optimización de un determinado objetivo productivo. La Fig. 1 presenta un ejemplo de planificación del régimen de claras empleando el *IDR* (Gonda, 1999). Allí se observa el límite superior por el cual evolucionaría un rodal sin intervenciones una vez que alcanza la densidad máxima y a partir de este límite se relacionan todas las zonas de manejo bajo las cuales se proponen conducir un rodal.

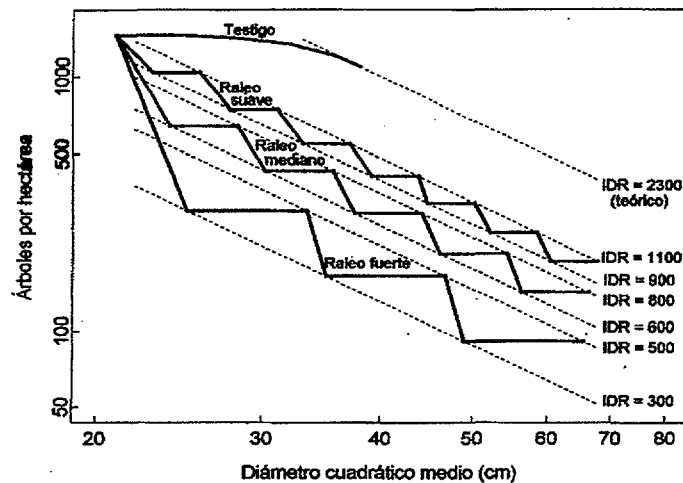


Figura 1: Cuatro regímenes de manejo empleando un Diagrama de Manejo de la Densidad (en función del IDR) para plantaciones de *Pinus ponderosa* en Patagonia, Argentina. Raleo=Clara. Fuente: Gonda, 1999.

Sin pretender abordar las controversias suscitadas con la Ley de los $-3/2$, se cita que Zeide (1987), a través de un análisis de la misma, sugiere emplear, para el desarrollo de estos diagramas, el diámetro medio cuadrático en lugar del volumen promedio del rodal, en virtud de que aquel está mejor correlacionado con el diámetro de la copa y el número de árboles/ha.

Si bien también Zeide (1987, 1991) cuestiona el empleo de una función lineal simple para expresar las complejas relaciones de alta competencia en el rodal, se considera que para realizar aproximaciones en ausencia de datos empíricos, como las que se realizan en la presente tesis, una función de este tipo continúa siendo de suma utilidad.

Bravo *et al.* (1997) realizan una detallada descripción cuali-cuantitativa de los índices de densidad más importantes, la ley del autoaclareo y la relación entre dichos índices. Siguiendo a Zeide (1987) también recomiendan emplear la relación de Reineke.

3.6.1. Índice de Densidad del Rodal (*IDR*)

El *IDR* fue presentado por Reineke (1933) como una medida de la densidad promedio del rodal que se obtiene con referencia a una relación límite predeterminada entre el número de árboles por unidad de superficie y el tamaño del árbol promedio (Clutter *et al.*, 1983).

$$N = a \cdot D_g^b \quad (9)$$

Donde: *N*: número de árboles/ha; *D_g*: diámetro normal promedio del rodal; *a, b*: coeficientes.

Esta expresión obtenida en una condición de competencia límite o extrema y para un diámetro de referencia, se transforma en el *IDR*. En el sistema métrico es usual elegir el diámetro de 25 cm como referencia. Para determinar el *IDR* de cualquier rodal con cualquier *N* y *D_g* conocidos, se define:

$$IDR = a \cdot 25^b \quad (10)$$

Si se grafica la ecuación (9) en ejes de escalas logarítmicas se obtiene una recta, cuya pendiente fue postulada como universal, para rodales que se encuentran creciendo en máxima densidad. Esta universalidad de la pendiente, Reineke (1933) la postula debido a la similitud que encontró en los valores de las mismas para 12 de las 14 especies que estudió. La ecuación (10) ajustada para las máximas densidades promedios, está representando un límite superior de competencia intraespecífica, cuya disminución del número de árboles se produce con un pendiente aproximada de $-1,6^7$.

Dividiendo la expresión (10) por (9) se tiene:

⁷ El valor original de la pendiente dado por Reineke (1933) fue de $-1,605$.

$$\frac{IDR}{N} = \left(\frac{25}{Dg} \right)^b \quad (11)$$

Reordenando:

$$IDR = N \cdot \left(\frac{25}{Dg} \right)^b \quad (12)$$

Ello nos indica que dos rodales con el mismo *IDR*, tendrán las mismas condiciones de competencia, sin importar sus edades o calidades de estación.

3.6.2. Factor de Espaciamento (*FE*)

Las referencias sobre quién es el autor de este índice son confusas. Wilson (1979) y Day & Gonda (1987), coinciden que la primera cita ocurrió en Europa y tiene cerca de 150 años; pero el primero hace referencia a un posible origen Danés en 1851, mientras que los segundos le asignan el origen a Brown, también en 1851, quien lo aplicó en Inglaterra para el control de carcas. Aunque, en general, es común asignársele el origen a Hart en 1928 (Clutter *et al.*, 1983; von Gadow & Hui, 1999). Posteriormente lo emplean Becking (1954) y Hummel (1954); en Norte América lo introduce Wilson en 1946 (Day & Gonda, 1987). Sus nombres más conocidos son Índice de Hart-Becking, Factor de Espaciamento de Wilson o Espaciamento relativo. El *FE* es definido por la distancia promedio entre árboles (espaciamento promedio), expresada como una proporción de la altura dominante del rodal. El espaciamento puede expresarse como de marco cuadrado, triangular o irregular; si fuera cuadrado, la relación se escribe así:

$$FE = \frac{e}{H_o} \quad (13)$$

Donde: *FE*: Factor de Espaciamento; *e*: espaciamento promedio en metros; *H_o*: altura dominante en metros.

Algunos argumentan que el espaciamento triangular es una asunción más realista para el cálculo del distanciamiento promedio entre árboles, pero dado que cualquier valor de *FE* obtenido de un espaciamento triangular es una proporción constante del valor obtenido de un distanciamiento cuadrado, la distinción es irrelevante en cuanto a medida de densidad se refiere (Clutter *et al.*, 1983).

Al igual que el *IDR*, es característico de cada especie e independiente de la calidad de estación. También puede representarse gráficamente como una recta si volcamos las variables número de árboles/ha (*N*) vs. la altura dominante (*H_o*) en un par de ejes coordenados logarítmicos. Esta relación tiene la forma siguiente:

$$N = a H_o^b \quad (14)$$

Donde: *N*: número de árboles /ha; *H_o*: altura dominante; *a, b*: coeficientes.

También se encontró que para muchas especies el valor de coeficiente *b* se mantenía casi constante en un valor cercano a -2 (dos) (Day, 1985; Day & Gonda, 1987).

El *FE* es uno de los mejores y más simples métodos para desarrollar planes de manejo de rodales, donde poco se conoce acerca del crecimiento de las especies (Day, 1985), y ha sido una de las bases principales para la planificación de las claras en Europa.

3.6.3. Densidad Relativa (*DR*)

Curtis (1982) desarrolló una medida de la densidad relativa para clasificar parcelas de acuerdo a la relación entre el área basal de un rodal respecto del diámetro promedio cuadrático (Mitchell & Cameron, 1985). El índice combina el área basal (*G*) y el diámetro medio cuadrático (*D_g*) para formar una medida de la densidad del rodal (Davis & Johnson, 1987):

$$DR = \frac{G}{D_g^{0,5}} \quad (15)$$

Este índice (15) es ampliamente utilizado para *Pseudotsuga menziesii* en el noroeste de Estados Unidos (Davis & Johnson, 1987), además es la medida de la densidad empleada por el simulador DFSIM (Douglas-fir Simulator-Simulador de Abeto Douglas). El índice ha sido empleado casi exclusivamente con esta especie (Curtis, 1982; Mitchell & Cameron, 1985; Andenmatten *et al.*, 1997; Andenmatten, 1999) y en general no tuvo un uso tan extendido como el *IDR* o el *FE*.

3.6.4. Vínculos Entre Variables e Índices

Cuando se analizan las evoluciones de los diversos *ID*, casi todos ellos tienden a un valor máximo en donde se estabilizan. Tal situación es la que sustenta la hipótesis del autoclareo de los rodales regulares bajo condiciones de alta competencia intraespecífica. Si dicho fenómeno se analiza a través

de las variables tamaño-densidad involucradas en los *ID*, esta mortalidad natural ocurriría a una tasa aproximadamente constante. Si, en cambio, el análisis se realiza sobre la evolución del *ID* respecto a alguna variable relacionada con el tiempo, la mortalidad natural se expresa como la estabilización del valor del índice.

Andenmatten *et al.* (1997) comenzaron a estudiar los comportamiento de los índices *FE* y *DR* con el tiempo para *Pinus ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii*. La finalidad fue encontrar una relación entre estos índices que permita su utilización para la proyección en el corto plazo de las variables agregadas del rodal involucradas en dichos *ID*.

Además esta vinculación permitiría mejorar la descripción estructural del rodal. Larson & Cameron (no publicado) realizaron un estudio comparativo de cuatro *ID* (*FE*, *IDR*, *DR* y *ID⁸*), para la prescripción de claras y, entre otras cosas, concluyeron que ninguno de los *ID* por sí solo puede describir adecuadamente la estructura del rodal.

Andenmatten *et al.* (1997), empleando las salidas del simulador TASS (Tree and Stand Simulator = Simulador de Árboles y Rodales), analizaron la evolución del *FE* y la *DR* con el paso del tiempo, utilizando para reflejar ello la altura dominante. Encontraron que ambos índices alcanzan valores máximos a una misma altura dominante. Sendos valores máximos estarían indicando la mortalidad inminente por competencia y el hecho que ocurran a una misma altura dominante, señala la coherencia con tal fenómeno y entre sí (Fig. 2a).

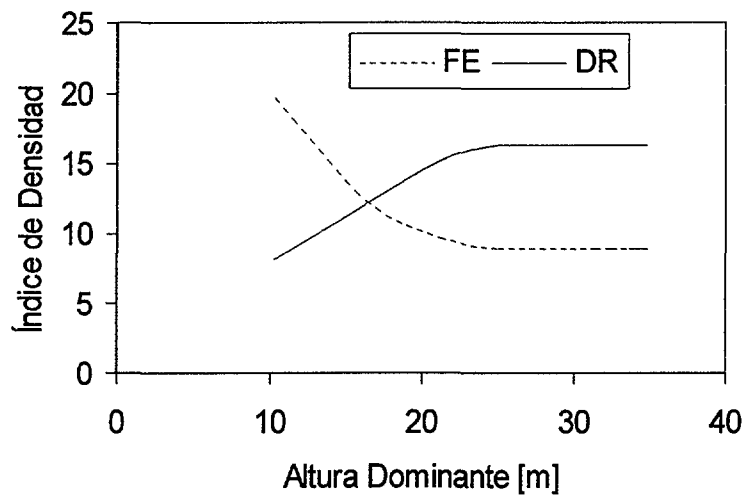
Como se observa en la Fig. 2b, si se invierte el *FE* su evolución se transforma en creciente favoreciendo la comparación con la *DR*. Al hacer ello lo renombran con un sentido lógico como Factor de Altura (*FH*):

$$FE = \frac{e}{H_o} \Rightarrow FH = \frac{1}{FE} = \frac{H_o}{e} = \frac{H_o \cdot \sqrt{N}}{100} \quad (16)$$

Esta conversión facilitó en gran medida su comparación la Densidad Relativa y su posterior vinculación.

⁸ Índice de densidad propuesto por Drew & Flewelling (1979) equivalente al *IDR* pero con el uso del volumen del árbol promedio.

a)



b)

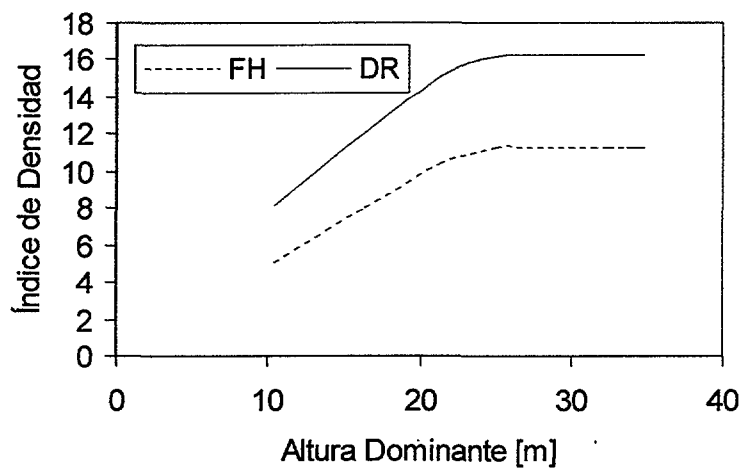


Figura 2: Evoluciones de DR y FE en la figura (a) y DR y FH en la figura (b).

Es de notar que para estudiar la evolución de las variables en el tiempo estos autores reemplazan la edad por la altura dominante. La altura dominante, como ya se dijo, es una variable de estado que además de involucrar implícitamente el paso del tiempo, indica la capacidad de crecimiento del rodal.

Andenmatten (1999) plantea para *Pseudotsuga menziesii*, el estudio del vínculo entre la DR y el FH a través del siguiente proceso:

- a) Estudiar la proporcionalidad que existe entre los valores máximos de ambos índices. Estos valores máximos se infirieron a partir de sumarle dos veces la desviación estándar al valor promedio de cada índice. Ello se determinó con el promedio y la distribución de probabilidades de una muestra.

- b) Probar si existe una proporcionalidad constante entre los índices a lo largo del desarrollo del rodal.
- c) Aplicar finalmente una función de proporcionalidad directa para la estimación de la *DR*.

El autor notó que entre las trayectorias de ambos índices podría existir una proporcionalidad directa que denominaron *F* y que se podía expresar de la siguiente manera:

$$\frac{DR}{FH} = F \Rightarrow DR = F.FH \quad (17)$$

A partir de ello postularon que si resultaba sencillo predecir la evolución del *FH* con una adecuada curva de crecimiento en altura, debiera ser simple predecir la evolución de la *DR* a partir de una relación funcional entre ambos. Por lo tanto para un período de tiempo dado y bajo la hipótesis de proporcionalidad directa, una relación de transición se puede escribir a partir de (17), de la siguiente forma:

$$\frac{DR_2}{DR_1} = \frac{FH_2}{FH_1} \quad (18)$$

Y la misma proporcionalidad permite deducir la expresión (19) que ha sido la utilizada por los autores:

$$DR_2 = DR_1 + F . (FH_2 - FH_1) \quad (19)$$

Un aspecto al que los autores han prestado especial atención, es al valor del factor de proporcionalidad *F* de las ecuaciones (17) y (19). Observaron que para una misma parcela, a través de las sucesivas mediciones el valor de *F* tiende a estabilizarse en cierto valor, lo que les indujo a plantear la precedente función de transición (19), donde $F(FH_2 - FH_1)$ es el producto que expresa el crecimiento de la DR_t en el período de proyección considerado. Claro está que ello implicaría que la proporcionalidad se mantiene a lo largo del desarrollo de un rodal regular. Pero en el mismo trabajo se ha dejado notar lo siguiente:

- a) Que el valor de proporcionalidad *F* es determinado para las condiciones de máxima densidad, es decir cuando el valor de ambos índices se estabilizan. Lo cual no implica que dicha proporcionalidad se mantenga con densidades menores y en etapas del desarrollo anteriores.

b) Que la hipótesis de proporcionalidad constante se supone a partir de aplicar la función de transición (19) con el valor de F obtenido con los valores máximos de los índices de densidad para rodales con cualquier densidad. Las pruebas realizadas por los autores para la proyección de corto plazo han resultado satisfactorias, con errores inferiores al 10 %. Se emplearon para tal fin 31 muestras de rodales con diferentes edades y estructuras y para distintas longitudes del período de proyección; de ellas sólo dos parcelas fueron rechazadas. También realizaron una validación con las salidas del simulador TASS, bajo una gran variedad de situaciones y largos de períodos, obteniendo errores del orden del 6-7 %.

Una peculiaridad destacable del método es que en las ecuaciones (17) a (19) se han reunido las variables estructurales del rodal más importantes: área basal (G), diámetro promedio (D_g), altura dominante (H_d) y número de árboles (N). A la vez la variable N aparece como factor común en ambos miembros y se la cita como la variable vínculo entre ambos índices. Esta es una de las virtudes de la relación planteada por los autores.

En este sentido las funciones (18) y (19) pueden considerarse funciones de transición basadas en variables estructurales que describen los estados del rodal en dos momentos determinados.

Habitualmente las proyecciones con las presentes funciones se hacen para intervalos cortos (hasta 10 años), suficientes para los efectos buscados en planificación silvícola de corto plazo. Esto permite aplicar el supuesto de que no existirá la mortalidad y por lo tanto se evita la necesidad de ajustar una función para estimar el número de individuos (Andenmatten, 1999).

Siguiendo este concepto, la función (18) se rescribió como:

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{H_{d2}}{H_{d1}} \quad (20)$$

Esta relación proporcional, podría dar buenos resultados, con la ventaja de no requerir el ajuste de parámetros, empleando sólo las ecuaciones de crecimiento en altura (Andenmatten, 1999), si efectivamente la proporcionalidad es de esta forma.

Si se espera que ocurra mortalidad en el período de planificación, se puede emplear en la misma relación el FH , que incorpora el N :

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{FH_{d2}}{FH_{d1}} \quad (21)$$

3.7. CRECIMIENTO DE RODALES SIN INTERVENCIONES

Con el fin de establecer un sistema de predicción del crecimiento y producción a nivel de rodal, puede ser importante conocer el comportamiento del bosque sin la aplicación de tratamientos intermedios. Estas relaciones representarían el *techo* o las condiciones de máxima densidad bajo las cuales puede crecer una plantación. Los parámetros de productividad de los rodales sin manejo son una referencia para los estudios de la producción de los rodales bajo intervención. Leyes como: la producción total de una especie en una estación dada no variará dentro de amplios rangos de manejo, o la importante Ley de Eichornn, que la producción total es función de la altura dominante del rodal, son un ejemplo de la importancia que poseen estos rodales para la investigación sobre la producción.

Una peculiaridad de la experimentación forestal del País Vasco y posiblemente extendida al resto del país, es que no se disponen de ensayos de manejo con parcelas o rodales testigos con ausencia de tratamientos de claras. Las 38 parcelas permanentes disponibles para este estudio o la falta de estudios sobre condiciones naturales de crecimiento sin la intervención del hombre, son una muestra de ello.

En la simulación del crecimiento a nivel de rodal el empleo de los índices de densidad puede representar una herramienta muy útil cuando no se cuentan con datos apropiados. En este contexto se han usado los índices de densidad y sus vínculos para simular el crecimiento de plantaciones de *Pinus radiata* sin intervenciones, en diferentes calidades de estación y para las densidades de plantación más comunes. Esta simulación ha permitido emplear estos índices y otras metodologías para desarrollar modelos de predicción para rodales bajo manejo. Estas hipótesis podrán ser contrastada con adecuados ensayos experimentales.

3.8. ANTECEDENTES EN ESPAÑA

La gran mayoría de los estudios de crecimiento y producción han tenido como finalidad la elaboración de una tabla de producción.

El esquema tradicional de los modelos de crecimiento y producción se compone de una serie de relaciones funcionales o fundamentales, que comienzan con las curvas altura-edad para la clasificación de la calidad de estación y la predicción del crecimiento en altura dominante. Este conjunto de funciones estaba acorde al tipo de tabla que se pretendía desarrollar, pero cualquiera que sea el tipo de tabla una primera observación es que el número de relaciones funcionales solía ser excesivo, con la consecuente pérdida de precisión de todo el sistema y finalmente de la tabla. Las funciones de transición en área basal empleadas tradicionalmente fueron del tipo empíricas, en las cuales no se registran procesos de validación o se obtenían como producto de predecir el número

de árboles/ha y el diámetro promedio cuadrático con sendas funciones. Ya se ha analizado que este tipo de funciones bien empleadas pueden dar estimados precisos de los crecimientos de corto plazo, pero que puede ser muy arriesgado su uso para la predicción de largo plazo, ya que su resultado final podría depender de la densidad de partida. En los casos en que habría un aparente abuso de las relaciones funcionales del modelo, el problema se agrava pues las densidades de partidas dependen de otras funciones.

Un sistema de relaciones fundamentales se puede ejemplificar implícitamente de la siguiente manera:

$$1^{\circ} \text{ Relación Fundamental: } H_o = f(t)$$

$$2^{\circ} \text{ Relación Fundamental: } H_g = f(H_o)$$

$$3^{\circ} \text{ Relación Fundamental: } N = f(H_g; H_o; t) \text{ o } N = f(H_o)$$

$$4^{\circ} \text{ Relación Fundamental: } D_g = f(N, H_o)$$

$$5^{\circ} \text{ Relación Fundamental: } V = f(G, H_o)$$

Con las estimaciones de la 3^o y 4^o relación fundamental se calcula el área basal [m²/ha].

Si bien hoy día se aprecia un cambio en el uso de los modelos empíricos a favor de los biológicos, todavía se nota cierta tendencia a expresar el cambio de las variables por funciones, quitándole flexibilidad a la toma de decisiones para el establecimiento de los regímenes silvícolas. Ejemplo de ello es que se suele estimar el diámetro promedio cuadrático o el número de árboles con una función, que siempre será dependiente de la calidad de muestreo de donde provienen los datos. Tal es el reciente trabajo de Gómez (1998) sobre *Pinus nigra*, que señala la vigencia de esta estructura de modelo para el modelado del crecimiento y la producción.

El tipo, la intensidad y la oportunidad de la clara deberían ser variables decisionales de manera que junto a una función de transición en área basal permitan delinear el régimen, entonces la variable diámetro promedio cuadrático se obtiene como una consecuencia. En recientes estudios de Álvarez *et al.* (1999) y González *et al.* (1999) sobre crecimiento y producción de *Pinus pinaster* y *Pinus nigra*, respectivamente, han definido al número de árboles/ha en cada momento como una variable decisional, es decir que la debe establecer el técnico, y mantienen la relación funcional del diámetro medio cuadrático.

Otra peculiaridad de algunos estudios de crecimiento y producción es que aparentan otorgarle escasa importancia a la predicción del área basal para la estimación de la producción. En ellos no se presenta un análisis sobre la consistencia de las estimaciones de este parámetro, que está directamente relacionado con la producción.

Hay un trabajo que ejemplifica la falta de atención que se le asigna a este componente en los modelos. Se trata de una revisión sobre las tablas de producción realizadas en España (publicadas y no), realizada por Rojo & Montero (1994). En el mismo se ha realizado una exhaustiva recopilación de autores, fechas, fuentes de datos, tipos de tablas, área de aplicación, etc., pero cuando se detienen en la caracterización de cada tabla, el análisis se concentra en las funciones y curvas de calidad de estación, no mereciendo atención el resto de las relaciones funcionales empleadas por los distintos autores. Es claro que la mayoría de los modelos desarrollados emplean al crecimiento en altura como conductor de la simulación, pero la precisión de la predicción de la producción está lejos de explicarse con la sola cita del sistema altura-edad y menos aún el perfil de la tabla. Ello sin desmerecer la sólida correlación que existe entre la altura dominante y el volumen bruto total del rodal.

Otro ejemplo al respecto es que en el mismo trabajo citan que varias tablas presentan una anomalía en el comportamiento de los crecimientos anuales, presentando culminaciones anteriores en los peores sitios, a diferencias de otras tablas cuyas especies poseen un comportamiento contrario. Ello es evidentemente un problema de consistencia de las funciones o de la estructura de enlace de las mismas, sin embargo no hay mayor análisis al respecto.

Esta recopilación se actualizó en 1999 (Madrigal *et al.*), en donde se presenta una introducción sobre los fundamentos y aplicaciones de las tablas de producción y luego se describen 25 tablas para diferentes especies y ecosistemas. La mayoría corresponden a tablas de producción españolas.

En referencia a *Pinus radiata* se han registrado varios estudios sobre crecimiento y producción, teniendo la totalidad de ellos un ámbito de aplicación en el País Vasco, a pesar que la especie se planta en toda la zona norte del país.

Los primeros estudios registrados fueron realizados por Echeverría (1942, 1943, 1944), que se recogen en tres publicaciones sobre diversos aspectos relacionados con la silvicultura aplicada en el norte de España. Entre los productos se realizaron las tablas de producción normales para cinco calidades de estación, estas últimas clasificadas en función de la altura media. Para el estudio se utilizaron datos provenientes de 41 parcelas en 16 sitios de ensayos, con períodos de remediación que alcanzaron los diez años. Se pueden considerar a estos estudios como importantes aportes a la silvicultura en general y en lo que respecta a las tablas de producción, éstas han sido de gran valor para el establecimiento, en la presente investigación, de las densidades máximas que serían factibles de encontrar en las repoblaciones de *Pinus radiata*.

En 1975 el Ministerio de Agricultura a través del Servicio de Producción Forestal publica las primeras tablas de producción de silvicultura media realizadas por Madrigal *et al.* Las mismas se basan en datos provenientes del inventario único de una red de parcelas. Las tablas se regionalizaron para el

País Vasco. Se construyeron siguiendo el esquema de relaciones fundamentales vinculadas, de las cuales tres constituyeron la conducción del modelo general:

$$H_0 = f(t) \quad (22)$$

$$N = f(H_g; H_0; t) \quad (23)$$

$$D_g = f(N; H_0) \quad (24)$$

De las relaciones (23) y (24) se desprende el área basal del rodal en un momento dado y ella se utiliza en una función de salida del volumen total. Esta tabla aún se sigue utilizando en el País Vasco pero con serias observaciones respecto a la falta de adecuación a las condiciones reales y a las múltiples correcciones o calibraciones que deben hacerse para lograr esa adecuación (Otazúa, 2000, comunicación personal).

En 1992 Castilla & Prieto publican el esquema de la simulación del crecimiento y producción de las repoblaciones de la especie en el País Vasco. Este estudio propone varias mejoras, una es el empleo de una función biológica para expresar el crecimiento en área basal, la cual respeta la ley de producción final común para cada calidad de estación; otra es la predicción de las distribuciones diamétricas más probables en cada momento y finalmente introducen la valoración financiera de cada régimen simulado. No figura que el sistema haya sido validado o puesto en aplicación.

Años después, Prieto *et al.* (1996a, 1996b, 1998) elaboran para *Pinus radiata* unas nuevas tablas de producción de silvicultura media para la provincia de Guipúzcoa, País Vasco. Una limitación adicional respecto a las que poseen este tipo de tablas, es que han clasificado sólo dos calidades de estación. A partir de ellas se desarrolla un programa de ordenador para calcular la rentabilidad financiera de las alternativas silvícolas.

Posteriormente aparece un nuevo modelo de gestión para las masas de *Pinus radiata* en el País Vasco (Cantero *et al.*, 1995; Espinel *et al.*, 1997). Este modelo se prepara en forma de programa de ordenador y permite la simulación del crecimiento y la producción de cualquier rodal. El simulador también posibilita predecir la distribución diamétrica del rodal e incorpora aspectos interesantes como la mortalidad temprana y tardía en número de pies; también se tiene previsto incorporar aspectos de rentabilidad económica al mismo. Divide el sistema de ecuaciones para la predicción temprana (hasta los 10 años) y para la predicción tardía de los parámetros del rodal (por encima de los 10 años). Un aspecto peculiar es que proyectan el área basal a través de una función empírica con la cual no se logra sostener la hipótesis de producción final común en cada estación. La mortalidad se estima en número de pies/ha, pero la función no tiene la propiedad de composición, dependiendo la tasa de mortalidad final del número de etapas en las que se la predijo. Se propone en el futuro realizar la correspondiente validación y a la fecha sólo se realizaron pruebas

confrontando los resultados del simulador con las tablas de selvicultura media, elaboradas por Madrigal *et al.* (1975) y Prieto *et al.* (1996a, 1996b, 1998).

En los últimos años aparecen varios estudios realizados sobre otras especies.

En el citado estudio realizado por Gómez (1998) sobre *Pinus nigra*, el modelo de crecimiento y producción es guiado por las tres típicas funciones fundamentales: de altura dominante, del número de árboles y del diámetro promedio cuadrático, similares a las ecuaciones (22) (23) y (24). Con estas variables se desprende la evolución del crecimiento en área basal y a través de una función de salida dependiente de ésta la del volumen total. De este algoritmo surgen las tablas de producción de selvicultura variable.

Álvarez *et al.* (1999) proponen un modelo dinámico para *Pinus pinaster* en Galicia. El modelo se basa en la teoría del espacio de los estados considerando el estado del rodal en un momento dado a través de las variables número de árboles/ha (N), la altura dominante (H_o) y el área basimétrica (G). En apariencia la elección del N no posee restricciones dentro de las densidades encontradas en las parcelas de muestreo. Para la altura dominante se empleó una variante reparametrizada de la función de Bertalanffy-Richards. El área basal, para edades tempranas se estima a través de predecir el diámetro promedio cuadrático como una función del N y la H_o . Para edades tardías se emplea una función del incremento anual el cual es relacionado con el área basal inicial y la edad del rodal, descartando la variable IE por el escaso aporte a la explicación del modelo (función 25). Si bien esta función es compatible con el área basal al final de un período cualquiera, es dependiente de la densidad inicial, es decir, el área basal final del rodal dependerá de la densidad de partida.

$$I_g = a \cdot G^b \cdot t \quad (25)$$

El modelo fue verificado (autovalidado) confrontando los volúmenes observados y estimados en las parcelas permanentes que constituyeron la base de datos.

Todo el sistema se agrupa en un simulador que inclusive realiza la evaluación económica de las distintas alternativas selvícolas en montes regulares. El mismo ya ha sido aplicado en la preparación de un proyecto de ordenación de un Parque Natural en España.

En 1999 aparecen las primeras tablas de selvicultura a la carta para *Pinus nigra* en el Prepirineo catalán (González *et al.*, 1999). En este estudio proponen interesantes modelos de gestión para masas regulares de la especie. Respecto al algoritmo de la tabla, liberalizan la decisión sobre el número de árboles presentes en cada momento y la proyección del estado del rodal se sustenta en una función estática del diámetro medio cuadrático, el cual una vez estimado y junto al número de

árboles presentes, permite calcular el área basal del rodal en ese momento. El trabajo se centra en los modelos de gestión por lo que no aparecen la verificación y validación de las funciones fundamentales respecto a la precisión y al cumplimiento de ciertas hipótesis biológicas.

Se considera que, tanto el simulador para *Pinus radiata* como el desarrollado para *Pinus pinaster* han sido probados parcialmente. El primero empleando las tablas de selvicultura media (Madrigal *et al.*, 1975; Prieto *et al.*, 1996a, 1996b), las cuales no registran validaciones y el segundo realizando una verificación con las mismas parcelas empleadas para la construcción. Si ambos simuladores se emplearan para la predicción o proyección de corto plazo, posiblemente estimen con buena precisión, si no se salen de los rangos de utilización. Pero al desarrollar un simulador, las posibilidades de planificación del técnico son ilimitadas y ello lo puede llevar a salirse de los rangos aceptables de precisión, sumado a que toda construcción de un simulador apunta a generar salidas de largo plazo. Por ejemplo ambos permitirían llevar a cabo una selvicultura a la carta, de manera que se podrían planificar regímenes sin claras o con una clara suave, lo que para ambos sistemas, la producción final del régimen dependerá de la densidad de partida, ya que no se lograría que distintas alternativas con diferentes densidades de partida pronostiquen una producción bruta final similar. Con ello no se demostraría una hipótesis como la de producción bruta final constante para una calidad de estación e independiente de la densidad de partida.

Sin lugar a dudas, como se expuso, estos sistemas pueden ser muy exactos para la predicción de corto plazo, pero deben probarse para la de largo plazo, que es justamente la que un simulador permite realizar.

Muchos estudios han citado y propuesto la experiencia de García para modelar el crecimiento y la producción de distintas especies forestales bajo la teoría del espacio de los estados (Erviti, 1989; Rojo, 1994; Álvarez *et al.*, 1999), pero pareciera que no ha habido una completa interpretación de la filosofía que encierra dicha teoría. En algunos casos, se refieren a la misma como el procedimiento de ajuste de máxima verosimilitud, que es el empleado por García (1983, 1984, 1994b) para la estimación de los parámetros, y en otros a desarrollo de un modelo estocástico. Pero en la construcción del sistema o modelo de predicción emplean las funciones de transición en su forma integral tradicional, con la edad como guía del proceso o utilizan modelos empíricos que atentan contra la compatibilidad del proceso de predicción. Con ello pierden la posibilidad de proyectar el estado actual del rodal usando funciones diferenciales que tengan al crecimiento en altura como guía de la proyección.

3.9. MATERIALES Y MÉTODOS

3.9.1. Fuente de Datos

Se utilizaron dos fuentes principales de datos:

a) Parcelas Permanentes: en 1988 se instalaron 38 parcelas permanentes en la Provincia de Guipúzcoa. Treinta y cinco de ellas fueron remedidas entre 1993 y 1994 y 13 fueron vueltas a medir en 1999. Con ello los intervalos de medición van desde los cuatro a los seis años. Los tamaños de las mismas variaron de acuerdo con la edad, entre los 1.100 y los 3.200 metros cuadrados. Después de las dos primeras mediciones se les realizaron claras. (En la Tabla 2.14 del apartado 2.4 se presentan las estadísticas generales de las parcelas y en el Anexo II los datos específicos).

b) Parcelas Temporales: provienen del IFN y fueron instaladas en plantaciones de *Pinus radiata* del País Vasco. Algunas de estas parcelas tuvieron que eliminarse debido a que las edades de los rodales fueron agrupadas en clases de cinco años. Finalmente quedaron disponibles 601 parcelas en rodales cuyas edades habían sido registradas en forma exacta.

c) Tablas de Producción Normal de Echeverría (1942): se emplearon para aproximar las densidades máximas que pueden alcanzar los rodales de la especie en la Provincia.

Los datos empleados fueron: número de árboles/ha (N), área basal (G), diámetro promedio cuadrático (D_g), altura dominante (H_o) y edad (t).

3.9.2. Vínculos entre las variables de Estado e Índices de Densidad del Rodal

Con las fuentes de datos a) y b) del punto anterior se calcularon los índices, Densidad Relativa (DR) y Factor de Altura (FH) y sus vínculos o relaciones, siguiendo la propuesta de Andenmatten *et al.* (1997) y Andenmatten (1999). A diferencia de estos autores se trabajó con modelos lineales y no lineales que no mantienen una proporcionalidad directa entre las variables, de las que luego se obtuvieron las funciones de transición que, además de poseer una precisión aceptable, cumplen con las propiedades matemáticas y biológicas de consistencia y composición.

En primer lugar se realizó una exploración gráfica de las posibles relaciones y luego se ajustaron funciones a través de las técnicas de regresión lineal y no lineal, cuando existía una tendencia más o menos clara de la nube de puntos. Obtenida la relación o vínculo se derivó la correspondiente

función de transición que permitirá proyectar un índice en función del estado actual del rodal y de la evolución del otro índice.

Las variables simples y combinadas evaluadas son las siguientes:

$$DR: \text{Índice de Densidad Relativa} \quad DR = \frac{G}{D_g^{0,5}}$$

$$FH: \text{Factor de Altura Dominante} \quad FH = \frac{H_o}{e}$$

$$PG: \text{proporción de cambio de } G \text{ para un período considerado} = G_2/G_1$$

$$PH: \text{proporción de cambio de } H_o \text{ para un período considerado} = H_2/H_1$$

$$PDR: \text{proporción de cambio de } DR \text{ para un período considerado} = DR_2/DR_1$$

$$PFH: \text{proporción de cambio de } FH \text{ para un período considerado} = FH_2/FH_1$$

Donde:

G : área basal.

H_o : altura dominante.

e : espaciamiento medio.

D_g : diámetro promedio cuadrático.

G_2 ; G_1 : área basal al final e inicio del período considerado, respectivamente.

H_2 ; H_1 : altura dominante al final e inicio del período considerado, respectivamente.

DR_2 ; DR_1 : densidad relativa al final e inicio del período considerado, respectivamente.

FH_2 ; FH_1 : factor de altura al final e inicio del período considerado, respectivamente.

Para el ajuste de las funciones por regresión se empleó el paquete estadístico Statgraphics plus v.3.0.

3.9.3. Crecimiento de Rodales Sin Intervenciones

Dada la falta de información experimental acerca de la evolución de plantaciones de *Pinus radiata* sin tratamientos intermedios, se intentó simular la misma a través de los índices de densidad (ID) y sus vínculos. Se utilizaron el Índice de Densidad del Rodal (IDR), el Factor de Altura Dominante (FH) y la Densidad Relativa (DR).

Además, ante la carencia de información, se tuvo que inferir aquella referida a los valores máximos que estos ID pueden alcanzar para la especie. Como se expresó anteriormente, estos valores

máximos representarían un límite de máxima densidad promedio que podrían alcanzar los rodales, límite que se mantendría sensiblemente estable en el máximo a expensas de la mortalidad natural de individuos.

Para aproximar esta información y esbozar la hipótesis de autoclareo o clara natural se trabajó con la relación usada por Reineke (1933), para lo cual se graficaron en ejes logarítmicos las variables N - D_g provenientes de las distintas fuentes de datos. En el caso de las parcelas permanentes que tuvieron claras cuantificadas, se procedió a sumarlas en los siguientes períodos considerando que no existió mortalidad. De este modo se obtuvieron valores aproximados de N y D_g como si no se hubieran realizado las claras, al menos desde el momento de la instalación de cada parcela. Al área basal de una clara, que se adiciona al período siguiente, se le suma un incremento a través de una tasa predeterminada. Estas series así obtenidas se las denominó *Series de Crecimientos Acumulados*. También se incorporó al análisis los pares de datos obtenidos de las tablas de producción de Echeverría (1942), considerando que son tablas de producción normales y por lo tanto se refieren a bosques completamente cerrados o poblados.

Con la nube que originó todos los pares de datos N - D_g , se estudió si existía un límite superior de densidades que siguiera la tendencia lineal decreciente. La hipótesis de la ley de clara natural tiene tres componentes: el primero se refiere a si el límite de máxima densidad promedio es lineal, el segundo se refiere al *nivel* donde este límite se ubica y el tercero a la pendiente o tasa de mortalidad de dicha línea; y obviamente es importante conocer si el descenso del número de pies por mortalidad natural sigue esta tendencia.

Una vez que se aproximó la teoría sobre la mortalidad natural por competencia, junto a ésta, se procedió a simular el crecimiento en área basal, empleando la curva de crecimiento en altura, los índices de densidad y los vínculos obtenidos entre estos últimos.

Para la elaboración de la hipótesis de crecimiento sin intervención se partió de una densidad de plantación de 2500 plantas/ha, densidad tradicionalmente empleada y de la que provienen las parcelas permanentes. El proceso de simulación se realizó a partir de los 10 años, para cuatro calidades de estación, y se puede resumir como sigue:

Se estima para la edad de inicio de la simulación el número de árboles/ha (N) y la altura dominante (H_0). Con estas dos variables ya se está en condiciones de calcular el FH , con el que se estima la DR a partir de alguna relación previamente ajustada entre ellos. Estimada la DR , ya se puede despejar de la misma el área basal (G). Con ellos ya se tienen los parámetros iniciales para continuar con la

simulación. Las proyecciones se hacen por quinquenios⁹ (Fig.3.1). Las tres variables básicas de la proyección son: N , H_o y DR , siguiendo un procedimiento como el descrito, para aplicando una función de transición para proyectar la DR inicial hacia el final del período. Respecto a la mortalidad, se emplea el IDR para establecer los momentos de máxima competencia y la tasa de mortalidad con la que se autorregularía la densidad del rodal. Esta mortalidad se fue aplicando por tanteos, tratando de no seguir una rigidez matemática y comenzando a reducir el número de árboles cuando el IDR alcanza aproximadamente un 75% del IDR máximo; ello se decidió de acuerdo a las experiencias registradas en *Pinus radiata* por Drew & Flewelling (1977).

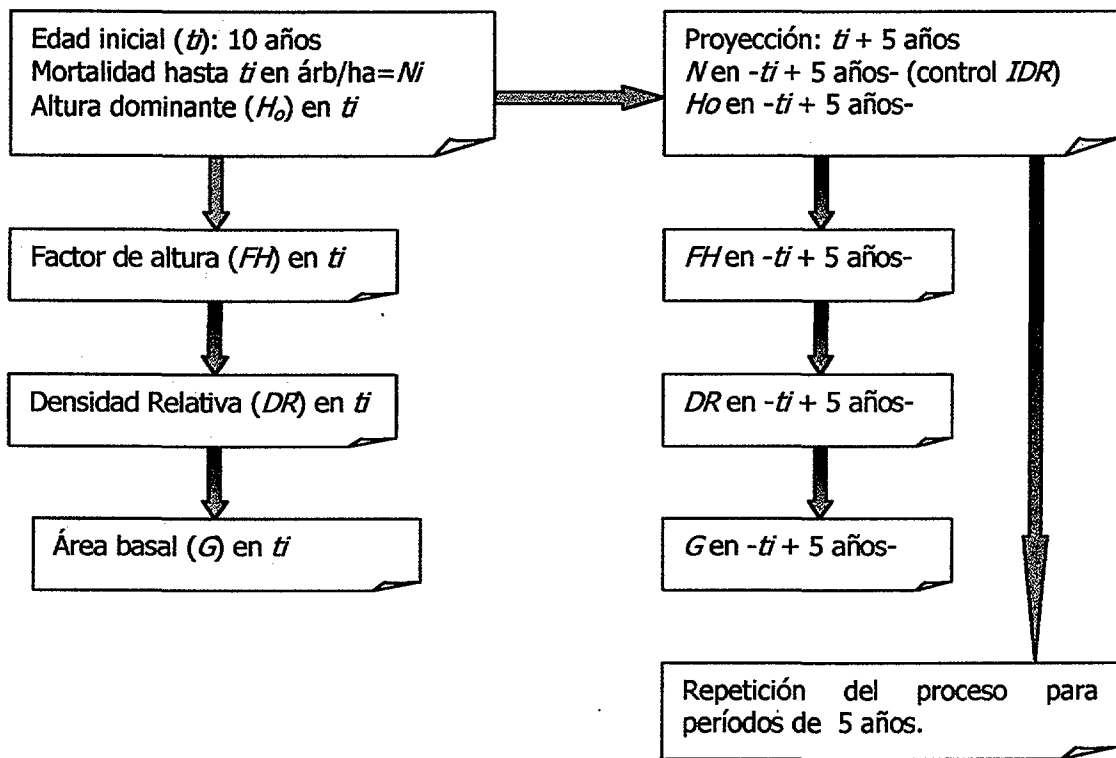


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso de simulación del crecimiento de un rodal sin intervenciones.

Para calcular el área basal (G) a partir de una determinada DR y N , se procede como sigue:

$$DR = \frac{G}{Dg^{0,5}} = \frac{G^{0,75} \cdot G^{0,25}}{D_g^{0,5}} = \frac{G^{0,75} \cdot [N \cdot 0,7854 \cdot D_g^2]^{0,25}}{D_g^{0,5}} = \frac{G^{0,75} \cdot (N \cdot 0,7854)^{0,25} \cdot D_g^{0,5}}{D_g^{0,5}}$$

Con esta expresión se puede eliminar D_g , para luego despejar G , quedando la fórmula originalmente propuesta por Andenmatten (1999):

⁹ Concordante con el período promedio de remediación de las parcelas permanentes.

$$G = \left[\frac{10.DR}{(0,7854.N)^{0,25}} \right]^{1,333} \quad (3.1)$$

Una vez establecidas las curvas de crecimiento en área basal para cada calidad de estación se ajustó la función de Bertalanffy-Richards, para cada una de ellas:

$$G = A \cdot [1 - \exp(-k.t)]^c \quad (3.2)$$

Donde:

G : área basal en m²/ha.

A : parámetro que representa el área basal asintótica.

k : parámetro relacionado con la tasa de crecimiento de la función.

c : parámetro relacionado con el posicionamiento del punto de inflexión de la función. $c = 1/1-m$, donde m es el parámetro original, relacionado con el punto de inflexión.

Obtener una aproximación de los valores asintóticos del área basal para las diferentes calidades de estación es importante para la aplicación de las metodologías que se desarrollan más adelante y que emplean la función 3.2. Además de estimar las densidades máximas con la simulación expuesta, también se exploraron ajustando la función 3.2 independientemente para cada serie de crecimiento acumulada, obtenidas de aquellas parcelas permanentes que poseían tres mediciones. Los datos ajustados de estas parcelas fueron las áreas basales acumuladas (G residual + G claras) en función de la edad.

3.9.4. Crecimiento de Rodales Intervenidos

Para la predicción del crecimiento en área basal se desarrollaron dos metodologías, una de ellas con dos variantes:

▸ Método de Predicción I: en primer lugar se desarrolló el procedimiento de Pienaar (1969, 1979) y Pienaar & Turnbull (1973), empleando la función 3.2 ajustada para rodales sin intervención. En segundo lugar con la expresión diferencial de la función 3.2 más la familia de curvas de altura-edad desarrolladas en el apartado 2, se ensayó la predicción basada en la teoría del espacio de los estados.

▸ Método de Predicción II: desarrollado por Andenmatten *et al.* (1997) y Andenmatten (1999) a partir del vínculo entre las variables de estado e índices de densidad. Conceptualmente constituye una función de transición empírica desarrollada bajo la teoría del espacio de los estados.

Métodos de Predicción I

Este método, como se describió, incluye dos variantes que se originan a partir de los ajustes de la función 3.2 para rodales sin claras y en diferentes estaciones.

Variante Pienaar (1979).

Se emplea como material base la función 3.2 ajustada para los rodales sin claras. Con los valores de los parámetros ajustados para cada calidad de estación se exploró las relaciones de éstos con los IE_{25i} ; cuando se encontró dependencia se ajustó por regresión lineal una función.

Se volvió a ajustar la función 3.2 ahora reparametrizada con las relaciones encontradas entre los parámetros y los IE_{25i} , con ello se obtuvieron los estadísticos generales para evaluar y comparar los ajustes.

Las funciones ajustadas con rodales sin intervención, además de entregar los valores asintóticos de la densidad expresada en área basal, también ofrecen información sobre las tasas máximas de crecimiento. Estas tasas de crecimientos vienen relacionadas por los valores del parámetro k . Considerando densidades menores a las estipuladas en la simulación, que se suponen máximas, la teoría plantea que las tasas de crecimientos serán también menores. De esta manera si se pretende proyectar el incremento en área basal de cualquier rodal con cualquier densidad menor a las máximas, se deberá estimar el valor del parámetro k , ya que el parámetro asintótico se mantendrá constante para una estación dada. Para ello se procede así:

De la función 3.2 se despejó el parámetro k :

$$k = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{G}{A} \right)^{1/c} \right]}{t} \quad (3.3)$$

A la vez se obtiene la derivada de la función 3.2:

$$\frac{dG}{dt} = k.c.G \left[\left(\frac{A}{G} \right)^{1/c} - 1 \right] \quad (3.4)$$

Se reemplaza (3.3) en (3.4):

$$\frac{dG}{dt} = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{G}{A} \right)^{1/c} \right] \cdot G \cdot c \cdot \left[\left(\frac{A}{G} \right)^{1/c} - 1 \right]}{t} \quad (3.5)$$

Así se obtiene la ecuación diferencial 3.5 que estima el incremento anual en área basal en función de las áreas basales actual y asintótica y de la edad. A la vez área basal asintótica, expresada por el parámetro A , puede reemplazarse por una función del IE_{25} .

Variante García (1984)

El procedimiento consiste en proyectar el incremento en área basal a partir de una serie de variables de estado, sin considerar explícitamente la edad del rodal. El procedimiento que se empleó fue reemplazar en la función 3.5 la variable edad (t) por una función equivalente que utiliza la altura dominante (H_o) como variable de estado independiente. Ello se realizó despejando t de uno de los modelos de crecimiento en altura desarrollados en el apartado 2.4.

Con la expresión obtenida se puede proyectar el área basal en función del estado estructural del rodal y de la calidad de estación, considerando implícitamente el tiempo a través de la altura dominante.

$$dG/dt = f(IE_{25}, H_o, G)$$

Ello se logra reemplazando en la función de transición local 3.5 la variable tiempo (t) por una función despejada de la función 2.31 del crecimiento en altura dominante, que es la siguiente:

$$t = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{H_o}{A_h} \right)^{1/c_h} \right]}{k_h} \quad (3.6)$$

Para ambas variantes las funciones fueron ajustadas por regresión lineal y el procedimiento iterativo de Marquadt de regresión no lineal (Draper & Smith, 1994). Los estadísticos utilizados fueron: coeficiente de determinación ajustado (R^2), error estándar de la estimación (EEE), prueba de t (Student) para los coeficientes y el análisis de los residuales ($ANARE$). También se realizó una evaluación gráfica de los ajustes.

Los ajustes fueron realizados por el programa estadístico Statgraphics Plus v3.0.

Métodos de Predicción II

Se estudiaron las relaciones existentes entre las variables de estado: área basal (G) y la altura dominante (H_o) y los índices de densidad: Densidad Relativa (DR) y Factor del Altura (FH). El procedimiento, las variables e índices se describieron en el apartado 3.8.2.

Se comenzó relacionando las variables de estado: G & H_o y luego se pasó a relacionar dichas variables con los ID y los ID entre sí. Las funciones fueron ajustadas por regresión empleando los mismos evaluadores citados en el punto anterior.

Para ambos métodos de predicción se prestó especial atención a las propiedades de las funciones, en lo que respecta a consistencia y composición. Además se verificó el cumplimiento de la ley de la producción final constante para cada calidad de estación. Todo ello le otorgarían a las funciones de transición buenas aptitudes para la predicción de largo plazo.

3.9.5. Verificación

Para la verificación se emplearon las series de crecimiento de las parcelas permanentes. La misma se realizó con los estados iniciales de dichas parcelas que, a partir de las distintas funciones ajustadas, se proyectaron hacia el final del período de medición. La variable evaluada fue el área basal (G).

Los procedimientos fueron los siguientes:

- Variante Pienaar: a partir de las variables G , IE_{25} y t de cada parcela, se proyecta con la ecuación 3.5 el área basal anualmente hasta el final del período. Con ello se obtiene el G final estimado que se compara con el observado.
- Variante García: es similar al anterior, pero aquí se reemplaza la edad (t) por una función de la altura dominante (H_o). Para arribar al área basal final se emplea la ecuación diferencial dG/dt y simultáneamente otra de la altura dominante dH_o/dt ; con ambas se va incrementando anualmente el estado inicial del rodal hasta llegar al final del período.
- Método de Predicción II: se emplea alguna función de transición que vincule los ID . Primero se proyecta H_o hasta el final del período. Con las alturas y números de árboles iniciales y finales se calculan los FH inicial y final; junto a DR inicial se emplea alguna función de transición para estimar DR final y de éste se calcula G final con la función 3.1.

La precisión de la proyección es evaluada con los siguientes estadísticos:

Estadísticos:

$$\text{Error Absoluto (EA)} = [G_{\text{obs}} - G_{\text{est}}]$$

$$\text{Error Absoluto porcentual (EA\%)} = EA / G_{\text{obs}}$$

$$\text{Error o Sesgo (E)} = G_{\text{est}} - G_{\text{obs}}$$

$$\text{Error o Sesgo relativo (E\%)} = E / G_{\text{obs}}$$

$$\text{Error Absoluto Medio (EAM)} = \sum EA / n$$

$$\text{Error Absoluto Medio porcentual (EAM\%)} = \sum EA\% / n$$

$$\text{Sesgo del Modelo (SM)} = \sum E$$

Donde:

$G_{\text{obs}}/G_{\text{est}}$: área basal observada y estimada, respectivamente.

n: número de muestras.

3.10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.10.1. Índice de Densidad del Rodal (IDR)

La nube de puntos obtenida a partir de los pares de datos $N-D_g$ han mostrado un claro límite superior, con una tendencia lineal por encima de la cual no se encontraron rodales creciendo. Al superponerle a dicho límite una recta con una pendiente descendente de $-1,57$ se encontró una aceptable concordancia (Fig.3.2). Este límite estaría representando las densidades máximas que es posible encontrar en el País Vasco.

Si bien no es posible asegurar que las máximas densidades que se poseen en la base de datos provengan de rodales sin cortas o con claras muy suaves, se ha podido inferir que se ubican próximos a niveles máximos de competencia. A esta suposición se arribó al coincidir en los niveles máximos de densidades los datos de la tablas de producción normales de Echeverría (1942) y con los de las densidades acumuladas en las parcelas permanentes a través de los períodos de remediación y algunas de las parcelas temporales del IFN (Fig. 3.2).

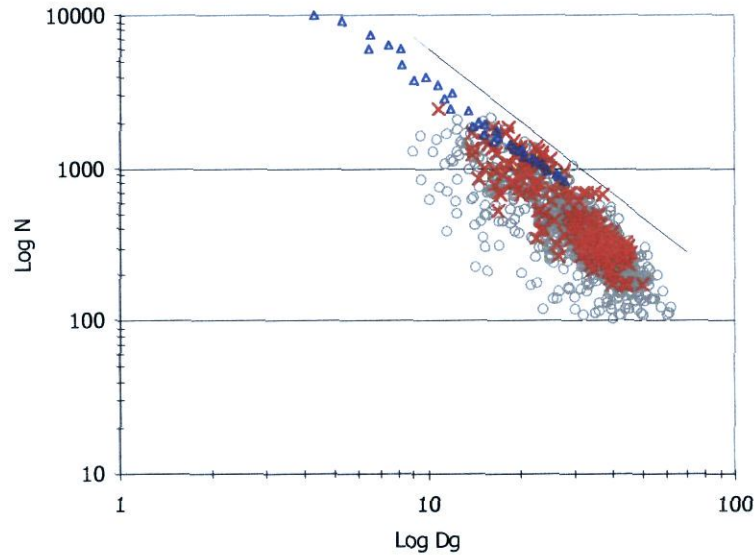


Figura 3.2: Datos $N-D_g$ provenientes de: 601 parcelas del IFN (círculo), 38 parcelas permanentes con sus remediciones (cruz) y las tablas de producción normales de Echeverría (1941)(triángulo). La línea representa la máxima densidad con la pendiente hallada de $-1,57$.

La recta que se ha escogido para representar la densidad máxima promedio para *Pinus radiata* en el País Vasco, se ha ajustado con los datos obtenidos de las tablas de Echeverría. La misma se ha comparado gráficamente con la totalidad de los datos encontrando una aceptable coherencia para describir las densidades máximas (Fig. 3.2). La ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Log } N &= 5,35 - 1,57 \cdot \text{Log } D_g; \\ N &= 221.309,5 \cdot D_g^{-1,57} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Se puede considerar que la pendiente obtenida es equivalente a la publicada por Reineke ($-1,605$). Hay estudios que han demostrado que una diferencia de 0,15 en el valor de la pendiente no producen cambios importantes en la estimación de la producción bruta final del rodal (Chauchard *et al.*, 1999b).

Si se asigna un $D_g = 25$ cm, se obtiene el *IDR* correspondiente a esta línea de densidad máxima: 1.430 árboles/ha. Este valor constituye el índice que se ha utilizado para regular la mortalidad en plantaciones sin intervención. Escogido el diámetro de referencia se puede expresar la función 3.8, que permitirá calcular el *IDR* de cualquier rodal de *Pinus radiata* conociendo su D_g y N .

$$I.D.R. = N \cdot \left(\frac{D_g}{25} \right)^{-1,57} \quad (3.8)$$

Hay instalada, aun hoy día, una discusión si la ley de clara natural posee validez desde el punto de vista del comportamiento biológico (Zeide, 1987, Vanclay, 1994), al respecto se pueden realizar dos consideraciones prácticas sobre el tema, sin profundizar sobre el mismo:

- a) El gráfico de los pares de datos $N-D_g$ muestra una nube de puntos con un claro límite superior, dicho límite superior con tendencia lineal es obtenido *biológicamente*, es decir, no es producto de un artificio matemático sino de las relaciones de competencia intraespecífica. De manera que es una realidad que no puede desconocerse y permite obtener una referencia sobre la máxima competencia. Cuando comienza la mortalidad y a qué tasa se produce es algo que la experimentación deberá establecer para cada lugar y especie. Es posible observar una leve curvatura en la tendencia de las densidades máximas, aproximadamente para un diámetro de 40 cm, ello se origina porque los rodales con esos desarrollos no poseen más de 400 árboles/ha, lo que significa que han sido bastantes clareados y seguramente están por debajo de las densidades máximas posibles.
- b) Este límite real es útil para realizar aproximaciones sobre las oportunidades y las intensidades de las claras para un determinado objetivo productivo, a través de los denominados Diagramas de Manejo de la Densidad (*DMD*). Estos *DMD* permiten realizar aproximaciones sobre los regímenes de manejo más adecuados.

Por ello se aprovechó esta evidencia con dos fines, uno fue para aproximar un límite de máxima densidad promedio sobre el cual no se dejaría crecer un rodal en la simulación, otro para emplear el índice 3.8 para establecer zonas de manejo en la planificación selvícola.

3.10.2. Vínculos entre las variables de Estado e Índices de Densidad del Rodal

De las numerosas relaciones que se han ensayado no sólo entre los *ID*, sino también entre las variables de estado *G* y *H_o* se presentarán las funciones que mejor precisión y buenas propiedades han tenido.

Como ya se expuso se dio prioridad a los resultados obtenidos con los análisis de las parcelas permanentes respecto de las temporales (*IFM*), ya que aquellas utilizan el criterio de 75 árboles más gruesos por hectárea para estimar la altura dominante. Criterio que se ha empleado para la presente investigación.

Relación entre el área basal (G) y la altura dominante (H_o)

Si se grafica la transición entre G en función de la transición de H_o , se observa una clara tendencia no lineal entre ambos. Esta tendencia se pudo expresar fácilmente por una función lineal, pero dicha función de transición presentó cierto sesgo con tasas de cambios bajas de G y H_o . Este sesgo se pudo corregir tanto con una función lineal como no lineal, pero las mismas pierden las propiedades de consistencia y composición, propiedades que debe poseer una función de transición.

La función obtenida fue la siguiente:

$$PG = PH^{1,50326} \quad (3.9)$$

$$R^2: 93\%$$

Donde:

$$PG: G_2/G_1$$

$$PH: H_{o2}/H_{o1}$$

La función 3.9 posee excelente propiedades funcionales, pero subestima el cambio de área basal (PG) para valores entre 1 y 1,3 de PH (Fig.3.3). Ello significaría que cuando el cambio en altura dominante en un período dado es bajo ($PH < 1,3$), como ocurre en rodales maduros o períodos muy cortos de proyección, se estaría subestimando el cambio de G . Ello mejoró con el empleo de la ecuación de la recta, pero al hacerlo, como se expuso, se pierden las propiedades de consistencia y composición de la función, por lo que esta opción se desechó.

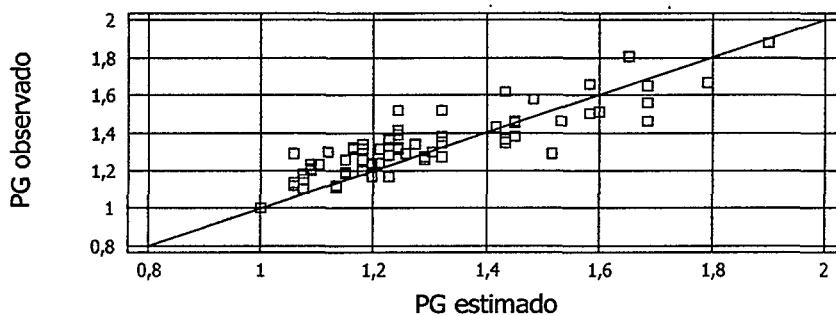


Figura 3.3: Relación entre los valores de PG observados y estimados por la función 3.9.

Esta función de transición es una imagen clara del concepto de espacio de los estados ya que liga el cambio de una variable de estado (PG) con el cambio de otra variable de estado que contiene el concepto temporal (PH).

Relación entre los ID

A continuación se intentó vincular los índices de densidad DR y FH . El gráfico entre ambas variables muestra una tendencia lineal. De los modelos probados dos se seleccionaron por la precisión y por la satisfacción de las propiedades de consistencia y composición que poseen las funciones de transición que de ellas se derivan. Uno de los modelos fue la ecuación de la recta cuya expresión es la siguiente:

$$DR = -0,694279 + 1,31848 \cdot FH \quad (3.10)$$

$$R^2: 75,1 \%$$

$$EEE: 1,05$$

$$\text{Prueba } t\text{-Probabilidad coef.independiente: } 2,6 \%$$

Si el término independiente fuera nulo (0), el valor que adoptase la pendiente de la función, representaría directamente la proporcionalidad entre ambos índices. Pero la prueba de t para el coeficiente independiente de la ecuación 3.10 infiere una probabilidad de ser nulo muy baja de 2.6%.

En la Fig. 3.4 se observa el buen ajuste de la función 3.10, quizás se desprende una leve heterocedasticidad pero que no se considera importante. El R^2 del 75% es aceptable.

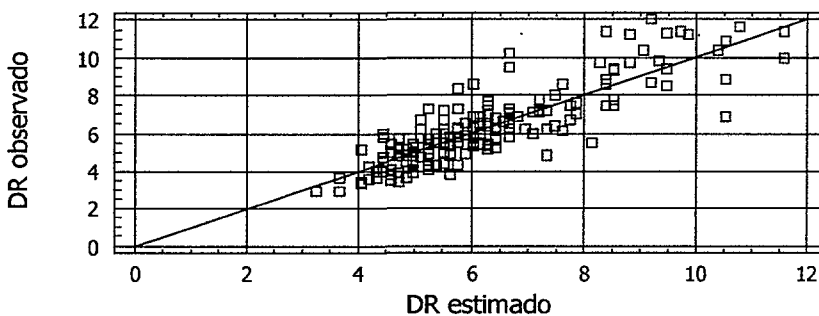


Figura 3.4: Relación entre los valores de DR observados y estimados por la función 3.10.

El otro modelo que relacionó aceptable y similarmente los ID , fue el potencial:

$$DR = FH^{1,09348} \quad (3.11)$$

$$R^2: 75,0 \%$$

$$EEE: 0,157 \text{ (expresado en logaritmo)}$$

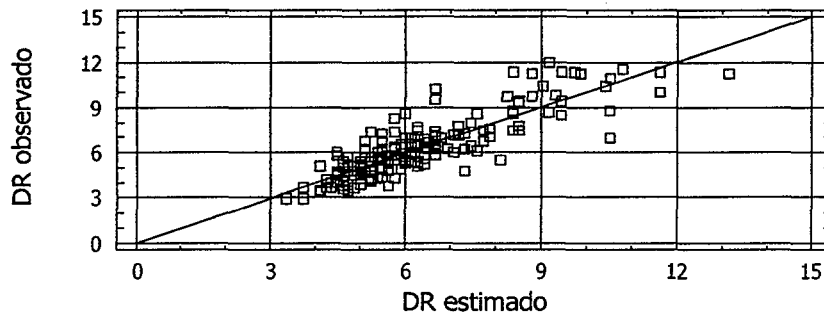


Figura 3.5: Relación entre los valores de DR observados y estimados por la función 3.11.

La Fig. 3.5 muestra que la ecuación potencial 3.11 también tiene buenas aptitudes, con un R^2 similar del 75%. Esta expresión es condicionada e indica que la proporcionalidad entre los ID es logarítmica. Efectivamente si se despeja el parámetro (m) de la función queda:

$$m = \frac{\text{Ln}DR}{\text{Ln}FH}$$

Este parámetro m , cuyo valor para *Pinus radiata* es de 1,09, es equivalente al denominado por Andenmatten et al. (1997) y Andenmatten (1999) como F , pero al que los autores le asignan una proporcionalidad directa.

A partir de las ecuaciones 3.10 y 3.11 se derivaron las respectivas funciones de transición para expresar el cambio de la DR en un período determinado.

Si se emplea la función 3.10 se procede de la siguiente manera: con dicha función se puede estimar la DR conociendo el FH , entonces si se restan las expresiones correspondientes a dos puntos en el tiempo, se tiene:

$$DR_2 - DR_1 = [-a + b.FH_2] - [-a + b.FH_1]$$

y simplificando se puede obtener:

$$\begin{aligned} DR_2 - DR_1 &= b \cdot (FH_2 - FH_1) \\ DR_2 &= DR_1 + 1,31848 \cdot (FH_2 - FH_1) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Esta función de transición 3.12, es similar a la propuesta por Andenmatten *et al.* (1997) y Andenmatten (1999), pero a la que arriban por otra vía. Estos autores definen directamente esta función de transición cuyo ajuste depende de encontrar el valor del coeficiente b (denominado F), al que lo refieren como una expresión de la proporcionalidad directa entre los dos ID . Para esta aproximación estiman los **valores máximos de cada índice** y luego los divide (DR/FH) encontrando con ello un factor de proporcionalidad que, en su hipótesis, se mantendría a lo largo del desarrollo de cualquier rodal de la especie estudiada. Argumentan que con este procedimiento de asignar valor al coeficiente en referencia a los valores máximos, se evita la influencia que las claras pueden tener sobre la relación entre los índices antes de que alcancen dichos valores máximos.

Se considera que estudiando primero la relación estática entre los dos índices, previo a la definición de la función de transición, es más apropiado. Esto permitiría la comprensión más cabal del vínculo y de cómo varía la relación con el paso del tiempo. Ejemplo de ello están los análisis que resultaron en las funciones 3.10 y 3.12, que demuestran que la proporcionalidad directa no se cumple, al menos para *Pinus radiata*. Por cualquier efecto que las claras pudieran tener en la relación, de la base de datos para este análisis se quitaron los ID calculados inmediatamente después de la clara.

Continuando con la derivación de las funciones de transición, si se resuelve la ecuación 3.11 dividiendo las expresiones en dos puntos dados en el tiempo, se puede obtener la otra función de transición:

$$\frac{DR_2}{DR_1} = \frac{FH_2^m}{FH_1^m}$$

Simplificando:

$$DR_2 = DR_1 \left(\frac{FH_2}{FH_1} \right)^{1,09348} \quad (3.13)$$

Ambas expresiones 3.12 y 3.13 satisfacen las propiedades de consistencia y composición y poseen leves diferencias en las estimaciones finales del área basal (G).

Respecto al factor de proporcionalidad entre ambos ID , denominado F (DR/FH) por los autores (Andenmatten *et al.*, 1997; Andenmatten, 1999), también se ha estimado promediando los cocientes DR/FH de todas las parcelas, en cada momento de medición. Con las parcelas permanentes se obtuvo un valor de $F = 1,2$, mientras que con las temporales el factor bajó a 1,12, demostrando que la muestra influye en el mismo. Además los valores obtenidos a través de las proyecciones de las funciones 3.12 y 3.13 entre los 10 y 90 años, alcanzaron valores máximos y estables de 1,26 y 1,27,

respectivamente. Pero es importante señalar que el valor F fue cambiando con la edad hasta que se estabilizó en los citados anteriormente.

Los mismos autores han insistido en la hipótesis de un valor de F que refleje una proporcionalidad directa entre la DR y el FH a lo largo del desarrollo del rodal. Sin embargo para *Pinus radiata* las relaciones 3.10 y 3.11 estarían indicando que tal proporcionalidad no existe, al menos en forma directa y para la muestra disponible; la expresión 3.11 señala la existencia de una proporcionalidad en términos de logaritmos de las variables. Sólo en el caso que la ecuación 3.10 fuera condicionada (sin término independiente), el valor de la pendiente estaría representando una proporcionalidad directa entre los ID y dicho valor debería ser similar al obtenido como promedio de los cocientes DR/FH de las parcelas permanentes. Dado que el factor F -cociente entre DR y FH - es descendiente como lo muestra la Fig. 3.6, la proporcionalidad directa no se mantendría, salvo cuando se alcanzan los valores máximos de los índices.

Al respecto se pone de manifiesto lo siguiente:

- i. Si existe una relación entre ambos índices que no es proporcional directa, como la encontrada a través de las funciones 3.10 y 3.11 y,
- ii. la evolución del FH es creciente hasta que alcanza una meseta o máximo a edades avanzadas del rodal.

Entonces:

- iii. Cuando el FH alcance su máximo lo hará indefectiblemente la DR , independientemente de la relación que haya entre ambos.
- iv. Alcanzado dichos máximos, alcanzarán una proporcionalidad estable, vista las evoluciones que poseen los ID (Fig. 2, ap.3.6.4).

Ello quiere significar que si se puede encontrar una función que relacione ambos índices a lo largo de la vida del rodal, será más precisa que aquella que utilice la proporcionalidad que poseen cuando alcanzan los valores máximos, como se había empleado hasta ahora.

A ello hay que agregarle que debido a lo reciente del método, todavía no se ha estudiado el efecto que los diferentes tipos de claras pueden tener sobre el vínculo. Por ello en la muestra analizada de *Pinus radiata* se ha dejado de lado los ID obtenidos con las variables del estado inmediatamente después de las claras.

Una idea de la mejora que se puede obtener para explicar el fenómeno de variación de los índices, se muestra en la Fig. 3.6. Allí se vuelcan los valores de factor F obtenidos de las parcelas

permanentes de dos manera diferentes. En la Fig. 3.6 a) se muestra la relación real directa entre los *ID* a través de todo el rango de crecimiento de las parcelas; es decir se muestra como evoluciona la proporcionalidad de los *ID* como el cociente *DR/FH*. En la Fig. 3.6 b) se muestra la evolución de una relación logarítmica entre los *ID*. La proporcionalidad de cada parcela permanente se obtiene como $F = \text{Ln}(DR)/\text{Ln}(FH)$, que es simplemente despejando el parámetro *m* de la función 3.11.

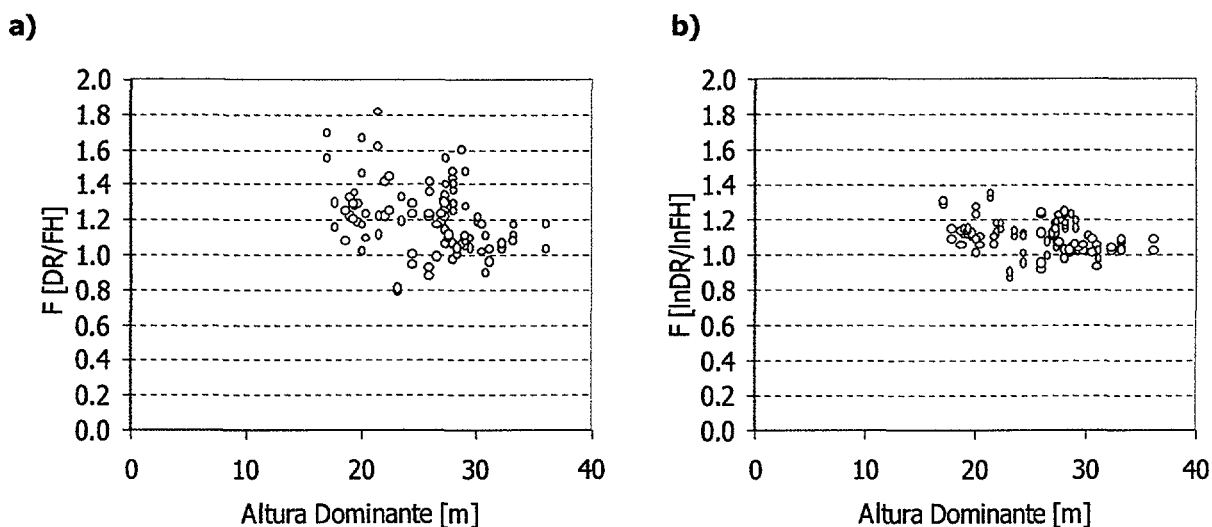


Figura 3.6: Evolución y dispersión de dos relaciones entre los índices *DR* y *FH*, una directa (*DR/FH*) en la figura (a) y la otra logarítmica ($\text{Ln}DR/\text{Ln}(FH)$) en la figura (b).

En la Fig. 3.6 b) se observa que el hecho de considerar una proporcionalidad logarítmica entre los índices se logra una nube de puntos más estable en una horizontal o de un valor medio, lo que favorece su empleo en una función de transición.

3.10.3. Crecimiento de Rodales sin Intervención

Los resultados referidos al crecimiento de rodales de *Pinus radiata* sin claras por ahora quedan planteados como hipótesis, cuya certeza se podrá evaluar en cierta medida a través del proceso de verificación que se realiza más adelante. Como se expuso, la experimentación permitirá contrastar verdaderamente esta hipótesis.

Para realizar la simulación del crecimiento de rodales sin intervenciones, el punto inicial es seleccionar la edad de partida y luego alguna de las funciones 3.10 ó 3.11, las cuales nos permiten estimar las variables de estado en dicho momento. La variable directriz es la altura dominante, la cual se predice a través de la función polimórfica estricta ajustada en el capítulo 2; la variable de respuesta buscada es el área basal, la cual será estimada en virtud de estimar la *DR* para cada punto

de proyección y despejado del mismo. La respectiva curva de crecimiento altura-edad es seleccionada luego de establecer el IE_{25} que posee el rodal que se simulará.

Para la estimación del DR y por ende el G de partida, se seleccionó primero la densidad de la plantación, escogiendo 2.500 plantas/ha, densidad comúnmente utilizada y de la que provienen los rodales de las parcelas permanentes. Luego se estableció un tasa de mortalidad de 0,25 % anual, hasta la edad de partida de 10 años. Esta tasa se seleccionó de información no publicada, obtenida en IKT SA, y en las parcelas permanentes más jóvenes. Obtenido el número de árboles a los 10 años, se estimó la altura dominante y con ambos datos se calculó el FH , con el cual ya se puede estimar la DR , a partir de la función 3.10. Estimada la DR se calcula el G con la deducción 3.1

A partir del área basal inicial a los 10 años, la misma se hizo crecer a partir de ir proyectando la DR con la función 3.12. La simulación de la mortalidad de un rodal sin intervención se realizó a través del IDR , es decir se dejó crecer el rodal invariante en el N , hasta que el IDR alcanzó un valor equivalente al 75% del máximo establecido, de aproximadamente 1.430; ya a partir de allí se hizo descender N hasta mantener este nivel de densidad supuestamente máxima promedio (Fig. 3.2).

Las proyecciones se realizaron para cuatro calidades de estación: 19, 22, 25 y 28 m., y los períodos proyectados fueron de cinco años coincidentes con el período promedio de mediciones de las parcelas permanentes, fuente principal de datos. Los resultados de la simulación hasta los 60 años, se muestran en la Tabla 3.1. Allí se puede notar que el IDR no se ha manejado con rigurosidad matemática, ya que por tanteos se empezó a aplicar cierta mortalidad cuando se alcanzó aproximadamente el 75 % de la densidad máxima esperada.

Tabla 3.1: Resultados de la simulación para rodales no tratados creciendo en cuatro calidades de estación. Para la proyección de la DR se empleó la función 3.10.

Plantación: 2.500 árb/ha.

IE_{25} : 19 m.

Edad	N	IDR	H_o	FH	DR	G	D_g
10	2438	375	7,5	3,69	4,16	11,62	7,8
15	2438	667	12,0	5,94	7,13	23,8	11,1
20	2400	915	15,9	7,79	9,58	35,44	13,7
25	2350	1110	19,0	9,21	11,45	45,28	15,7
30	2300	1255	21,4	10,26	12,83	53,08	17,1
40	2050	1384	24,5	11,11	13,95	61,67	19,6
50	1800	1400	26,2	11,14	13,99	64,63	21,4
60	1680	1407	27,2	11,14	13,99	66,11	22,4

Plantación: 2.500 árb/ha.

 IE_{25} : 22 m.

Edad	N	IDR	H_o	FH	DR	G	D_g
10	2438	464	8,9	4,38	5,08	15,12	8,9
15	2438	806	14,1	6,98	8,51	30,12	12,5
20	2400	1091	18,5	9,09	11,28	44,10	15,3
25	2350	1309	22,0	10,66	13,37	55,66	17,4
30	2050	1389	24,6	11,15	14	61,97	19,6
40	1600	1420	28,0	11,19	14,06	67,69	23,2
50	1410	1430	29,8	11,17	14,04	70,43	25,2
60	1320	1432	30,7	11,14	14	71,73	26,3

Plantación: 2.500 árb/ha.

 IE_{25} : 25 m.

Edad	N	IDR	H_o	FH	DR	G	D_g
10	2438	557	10,3	5,10	6,03	19,01	10,0
15	2438	950	16,3	8,05	9,93	36,97	13,9
20	2400	1270	21,2	10,40	13,01	53,33	16,8
25	2020	1403	25,0	11,24	14,12	62,98	19,9
30	1650	1432	27,8	11,30	14,20	67,89	22,9
40	1300	1456	31,3	11,30	14,20	73,52	26,8
50	1165	1489	33,1	11,31	14,22	76,38	28,9
60	1100	1472	34,0	11,29	14,19	77,65	30,0

Plantación: 2.500 árb/ha.

 IE_{25} : 28 m.

Edad	N	IDR	H_o	FH	DR	G	D_g
10	2438	655	11,8	5,85	7,02	23,29	11,0
15	2300	1068	18,5	8,89	11,03	43,38	15,5
20	2200	1393	23,9	11,22	14,10	61,11	18,6
25	1670	1451	28,0	11,44	14,39	68,83	22,9
30	1350	1465	31,0	11,38	14,31	73,35	26,3
40	1100	1501	34,6	11,48	14,45	79,51	30,3
50	970	1493	36,4	11,35	14,27	81,53	32,7
60	920	1494	37,3	11,32	14,23	82,66	33,8

Las evoluciones de los rodales sin tratamientos intermedios también se pueden apreciar en las Fig.3.7 y 3.8. La coherencia de las simulaciones se puede inferir observando la Fig. 3.9, independientemente de la calidad de estación para una misma altura dominante se predice la misma área basal.

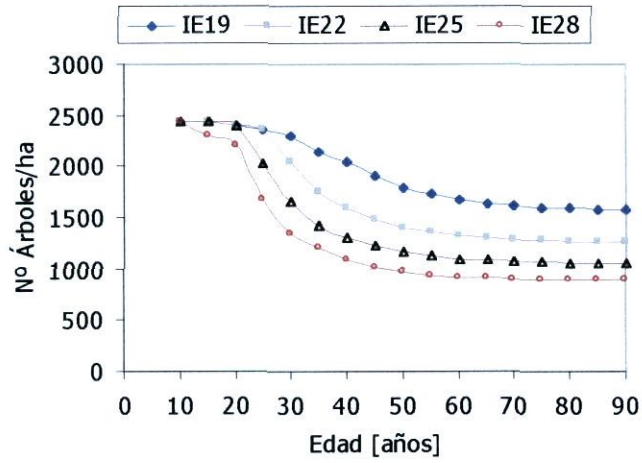


Figura 3.7: Simulación del descenso del número de arboles por mortalidad natural como consecuencia de la competencia y para cuatro calidades de estación.

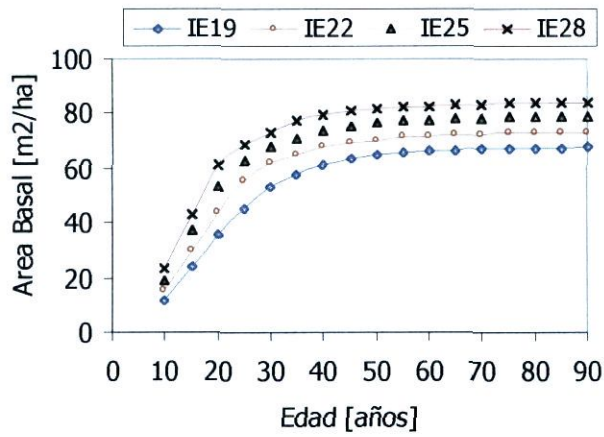


Figura 3.8: Simul. calidades de estación.

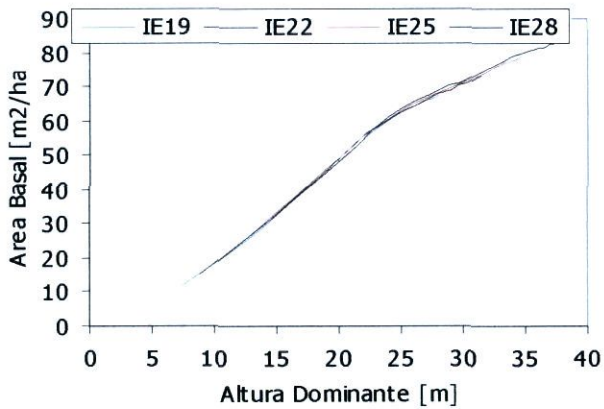


Figura 3.9: Evolución entre el área basal y la altura dominante para las cuatro calidades de estación estudiadas.

A cada una de las cuatro curvas de crecimiento en área basal se le ajustó una curva independiente con la función 3.2, cuyos ajustes establecen, para cada calidad de estación, un valor asintótico y uno relacionado con la tasa de crecimiento a través de los parámetros A & k , respectivamente (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: *Parámetros obtenidos del ajuste de la función 3.2 a las cuatro curvas de crecimiento en área basal de rodales sin intervención de claras.*

IE_{25}	A	k	c
19	68,8064	0,0881419	3,42508
22	74,1136	0,1019	3,60018
25	79,7564	0,108717	3,44015
28	84,7708	0,115942	3,37207

En al Tabla 3.2 se observa que mientras el parámetro c no muestra una asociación con el IE_{25} , el parámetro k asciende levemente con la mejora del IE_{25} . Con esta información se indagó respecto del tipo de relación que poseen los parámetros con el IE_{25} . Ambos parámetros mostraron un comportamiento lineal, que se expresaron con sendas ecuaciones de la recta que se emplearon para reparametrizar el modelo 3.2. Se ajustaron dos modelos, uno reparametrizado con el parámetro A y otro con los parámetros A & k . Los resultados de los ajustes son los siguientes:

Función I:

$$G = (24,5201 + 2,2216 \cdot IE_{25}) \cdot (1 - \exp^{-0,101932 \cdot t})^{3,26853} \tag{3.14}$$

$$R^2: 98,4 \%$$

$$EEE: 2,30 \text{ m}^2/\text{ha}$$

$$EAM: 1,54 \text{ m}^2/\text{ha}$$

Función II:

$$G = (35,0636 + 1,77871 \cdot IE_{25}) \cdot (1 - \exp^{-(0,177211 - 1,69119 \cdot 1 / IE) \cdot t})^{3,45899} \tag{3.15}$$

$$R^2: 99,8 \%$$

$$EEE: 0,75 \text{ m}^2/\text{ha}$$

$$EAM: 0,58 \text{ m}^2/\text{ha}$$

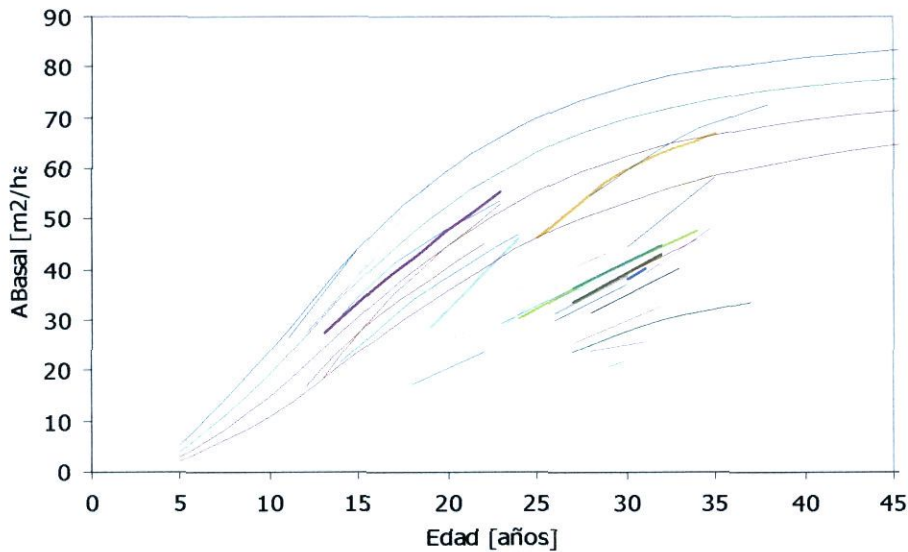


Figura 3.10: *Superposición de las cuatro curvas de crecimiento simuladas en área basal para rodales sin tratamientos y las curvas de las series de crecimientos acumulados de las parcelas permanentes.*

Realizando el análisis gráfico a través de la Fig.3.10, se puede apreciar la coherencia entre los patrones de las curvas teóricas ajustadas y las tendencias de las áreas basales acumuladas de las parcelas permanentes. Sólo algunas parcelas muestran una tasa de crecimiento mayor respecto de las curvas teóricas y obviamente una gran parte de las parcelas permanentes se encuentran por debajo de las curvas teóricas, debido a que son masas clareadas y por consiguiente con menores densidades. Se puede observar que las parcelas en rodales más jóvenes, con menos claras, tienen densidades próximas a las máximas, mientras que las más adultas, con más claras, están por debajo.

Por otro lado y con el mismo fin de analizar la coherencia de las curvas teóricas, se ajustó la función 3.2 para cada serie de crecimiento acumulado obtenida de cada parcela permanente. Para el ajuste se hizo constante el parámetro $c=3,45899$ y se dejaron libres los parámetros A & k (Tabla 3.3).

Tabla 3.3: *Parámetros y estadísticos de los ajustes de la función 3.2 del crecimiento del área basal acumulada, para aquellas parcelas medidas tres veces. Parámetro $c = 3,45899$.*

PNº	IE ₂₅	A	K	R ²	EEE
3	27	76,6	0,0894	98,9	1,5
4	23	72,5	0,1092	99,3	1,1
5	24	77,9	0,1028	99,6	0,9
6	26	107,3	0,0738	98,3	2,2
7	25	74,5	0,0869	99,3	1,1
14	20	97,3	0,0652	99,9	0,2
15	28	60,7	0,0818	99,9	0,01
19	26	75,8	0,0610	99,9	0,2
20	27	77,9	0,0731	99,9	0,2
21	26	95,1	0,0676	96,6	2,0
27	23	47,3	0,0642	97,1	0,8
31	24	95,3	0,0687	99,0	0,9

En virtud de los resultados mostrados en el Tabla 3.3 se demuestra que las áreas basales máximas (A), como las tasas de crecimientos (k) obtenidas por la simulación de los rodales sin tratamientos pueden considerarse lógicas. Así y todo la estimación del parámetro asintótico A con series de tres datos en el tiempo podría considerarse aproximativo. No así el parámetro k , que influenciado por el número de árboles, dichos tres puntos podrían ser suficientes para expresar la tasa de crecimiento; los menores valores obtenidos en las parcelas permanentes (Tabla 3.3), respecto de la Tabla 3.2 estarían demostrando que están relacionados con las menores densidades presentes en aquellas.

3.10.4. Crecimiento de Rodales Intervenidos

Modelos de Predicción I

Variante Pienaar (1979).

La ecuación diferencial 3.5, derivada de la función integral 3.15, se uso para predecir el área basal al final de cada período de medición, incrementando anualmente el G inicial con las siguiente ecuación resultante:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{G}{A} \right)^{0,2891017} \right] G \cdot 3,45899 \cdot \left[\left(\frac{A}{G} \right)^{0,2891017} - 1 \right]}{t} \quad (3.16)$$

Donde:

$$A = 35,0636 + 1,77871 \cdot IE_{25}$$

La estimación del área basal al final del período se realizó con la función 3.16 acumulando anualmente el incremento en área basal (dG/dt) y adicionando un año cada vez. De las 47 proyecciones realizadas en la verificación, los resultados generales indican un error del 5,9% y un sesgo negativo muy pequeño (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: *Estadísticos resultantes de la predicción del área basal al final del período, empleando las mediciones de las parcelas permanentes y la función 3.16 como predictora.*

<i>Tamaño</i>	47
ΣEA	176,7
$\Sigma EA\%$	1650,1
<i>EAM</i>	1,9 m ² /ha
<i>EAM%</i>	5,9 %
<i>SM</i>	-8,2
<i>SM%</i>	-13,0

Estos resultados son sumamente satisfactorios y si bien se trata de una verificación, el hecho de que parte de los datos provengan de la hipótesis de crecimiento de rodales no tratados, se puede considerar que el error obtenido corresponde a una cuasi-validación. Además dicho error proviene de una variedad de situaciones y calidades de estación, por lo que se puede afirmar que la función 3.16 constituye una muy buena herramienta predictiva y como se verá más adelante, consistente con importante principios silviculturales. Justamente la consistencia con principios tales como que en cada estación se arribe a una misma densidad final sin importar la densidad de partida hace que el modelo 3.16 sea apropiado para las proyecciones de corto y largo plazo.

La precisión también se puede apreciar en la Fig. 3.11 que muestra los grados de cercanías entre las observaciones y las predicciones.

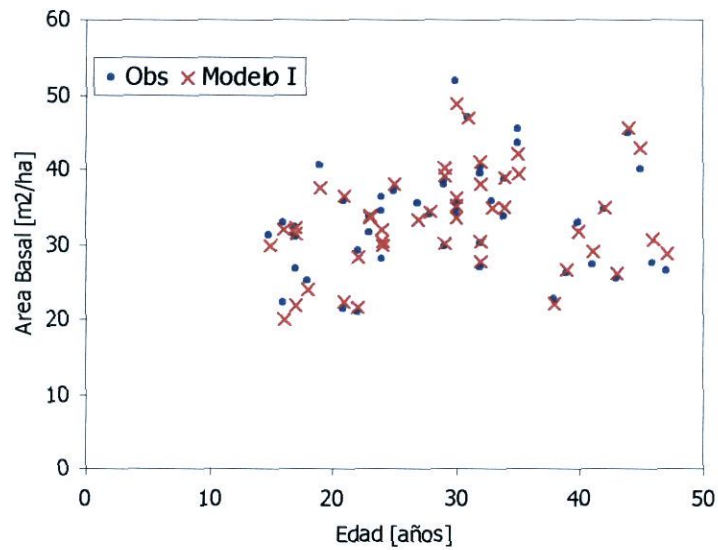


Figura 3.11: Datos de las áreas basales observadas y estimadas por el Modelo de Predicción I, para cada parcela permanente.

Variante García (1984).

La variante consiste en reemplazar la variable t con una función equivalente, dependiente de la altura dominante (H_o). La misma se despeja de la función 2.32 o 2.33 presentada en el apartado 2.4, quedando de la siguiente manera:

$$t = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{H_o}{A_h} \right)^{1/c_h} \right]}{k_h} \quad (3.17)$$

Esta función del tiempo 3.17 se reemplaza en la ecuación 3.16, quedando una función de transición local que depende exclusivamente de las variables de estado del rodal e implícitamente el tiempo:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{G}{A} \right)^{0,2891017} \right] \cdot G \cdot 3,45899 \cdot \left[\left(\frac{A}{G} \right)^{0,2891017} - 1 \right] \cdot 0,071848}{\ln \left[1 - \left(\frac{H_o}{A_h} \right)^{0,5524} \right]} \quad (3.18)$$

Donde:

A : Área basal asintótica dependiente del IE_{25} .

A_h : Altura dominante asintótica dependiente del IE_{25} .

La diferencia con la ecuación 3.16 no es muy grande matemáticamente, pero si conceptualmente, esto último directamente relacionado con las aplicaciones en casos reales. Mientras que la ecuación 3.16 predice el incremento a partir de las variables IE_{25} , G y t , la ecuación 3.18 lo hace con las variables IE_{25} , G y H_o , lo que conceptualmente es más adecuado, dado que reemplaza la variable tiempo por la variable de estado altura dominante.

Como se expuso, la proyección del estado actual del rodal consiste en incrementar anualmente el G y la H_o , con las ecuaciones diferenciales 3.18 y 2.34 o 2.35, respectivamente.

Tabla 3.5: Estadísticos resultantes de la predicción del área basal al final del período, empleando las mediciones de las parcelas permanentes y la función 3.18 como predictora.

<i>Tamaño</i>	47
ΣEA	184
$\Sigma EA\%$	1807
EAM	2,0 m ² /ha
$EAM\%$	6,2 %
SM	4,3
$SM\%$	23,4

Los estadísticos para evaluar la precisión de las predicciones han resultado satisfactorios (Tabla 3.5), con valores levemente superiores a los obtenidos por el método de Pienaar (Tabla 3.4), pero con un sesgo contrario (positivo). Las mismas consideraciones realizadas para la verificación del modelo 3.16 son válidas aquí.

Modelos de Predicción II

Se emplearon las funciones de transición 3.7 y 3.8 que vinculan el FH y la DR . Los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Estadísticos resultantes de aplicar las funciones de transición 3.12 y 3.13, la primera columna de cada función corresponde al empleo de la altura dominante final observada, mientras que la segunda lo es para la correspondiente estimada por una función.

n = 47	FT (3.12)		FT (3.13)	
	Obs	Modelo II	Obs	Modelo II
ΣEA	431	300	437	342
$\Sigma EA\%$	3716	2223	3523	3088
EAM	3,0	2,5	3,1	2,7
$EAM\%$	8,9	6,9	8,7	8,1
SM	-50	-77	-77	-104
$SM\%$	-108	-210	-218	-316

Se puede observar con los estadísticos de la Tabla 3.6, que las precisiones de ambas funciones de transición 3.12 y 3.13, mejora cuando la altura dominante es estimada con las funciones específicas, aunque tiende a subestimar más frecuentemente el área basal final (valores de SM negativamente mayores).

Los errores relativos ($EAM\%$) del 7 al 9 %, señalan menores precisiones que las obtenidas con las variantes del Método de Predicción I, pero aun así se consideran satisfactorias. La Fig. 3.12 muestra un buen acercamiento entre los datos observados y estimados, a excepción de los puntos superiores, cuyas diferencias entre las observaciones y las estimaciones parecen ser grandes.

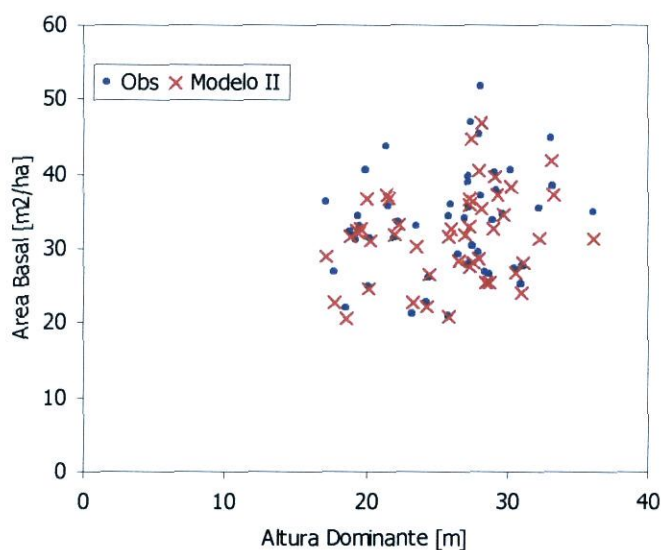


Figura 3.12: Datos de las áreas basales observadas y estimadas por el Modelo de Predicción II, para cada parcela permanente.

Todos los modelos han sido consistentes con la teoría del rendimiento final común y como todos derivan de las mismas curvas de crecimientos originales (para rodales sin intervención) las áreas basales asintóticas son similares. La coherencia a la que se hace referencia se puede apreciar en las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15, en las cuales se proyectan los modelos respectivos para diferentes densidades iniciales.

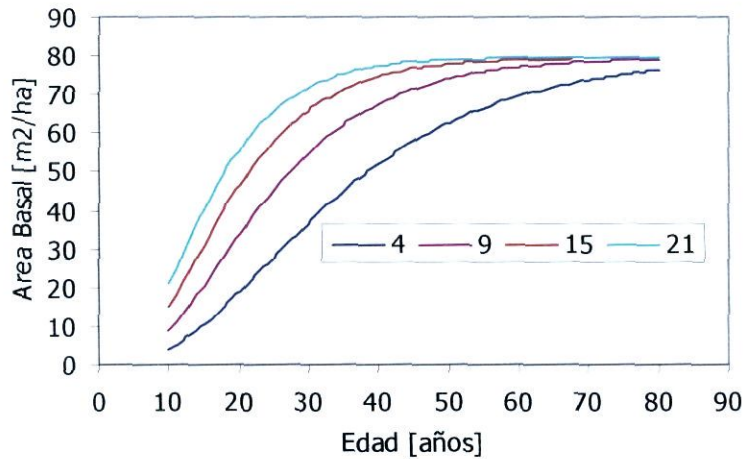


Figura 3.13: Proyección de las áreas basales por la función 3.16 para diferentes áreas basales de partida (4, 9, 15 y 21 m²/ha).

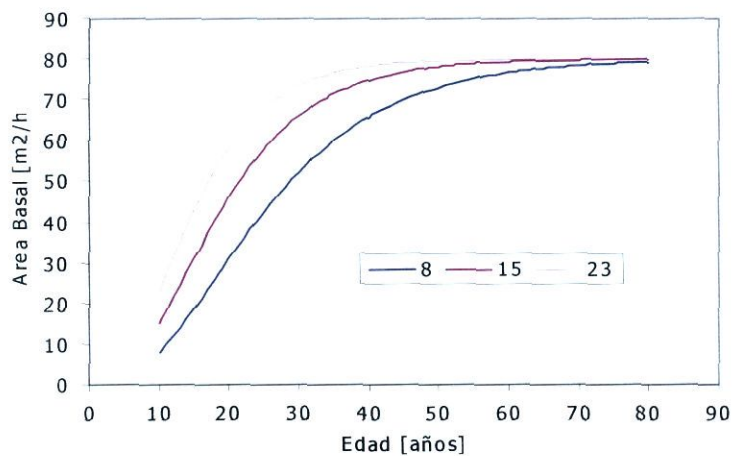


Figura 3.14: Proyección de las áreas basales por la función 3.18 para diferentes áreas basales iniciales (8, 15 y 23 m²/ha).

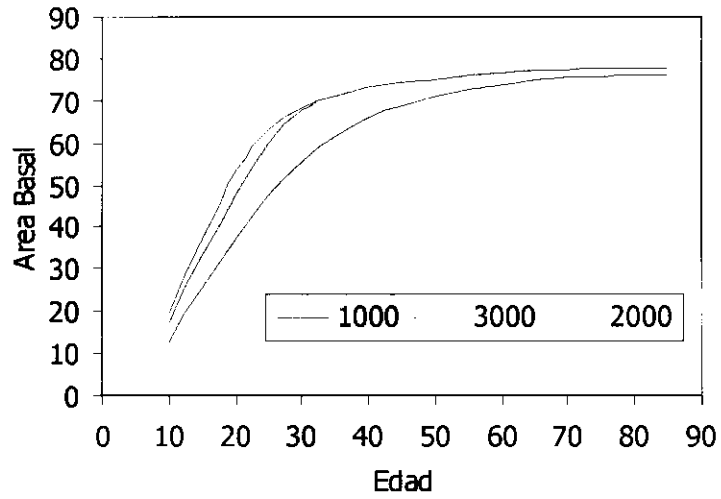


Figura 3.15: *Proyección de las áreas basales por la función 3.13 para diferentes densidades iniciales (1000, 2000 y 3000 árb/ha).*

4. CONCLUSIONES

Calidad de Estación

Se ha demostrado que el crecimiento de la altura dominante en *Pinus radiata* mantiene un patrón proporcional a partir de los 10-11 años, entre las diferentes calidades de estación de la provincia de Guipúzcoa. Ello se ve favorecido debido a las culminaciones tempranas del incremento corriente anual y a que estas culminaciones ocurren en un corto período de tiempo entre las diferentes estaciones.

Esta situación determina que tanto el sistema anamórfico como polimórfico de curvas altura dominante-edad puedan emplearse para la predicción del crecimiento en altura, siendo el último más preciso para la predicción temprana (hasta los 10-11 años).

Esta simplicidad en las formas de las curvas de crecimiento facilita la predicción del incremento y su aplicación en los modelos de crecimiento y producción a nivel de rodal.

A pesar del número limitado de árboles muestra con el que se contó, esta cantidad fue suficiente para caracterizar los patrones de crecimientos y desarrollar los sistemas de estimación del IE_{25} y de crecimiento en altura dominante. Las funciones han sido ajustadas para cada parcela con una óptima precisión (R^2 del 99 %) y las validaciones indican que la exactitud es muy satisfactoria con errores próximos al 1%; inclusive las validaciones gráficas, como las realizadas con los datos del *IFN* (Fig. 2.31), demuestran la buena aptitud de las curvas altura dominante-edad desarrolladas. Además las validaciones demostraron que los errores y variables correlacionadas obtenidos de los análisis troncales no afectaron la capacidad predictiva de los modelos seleccionados.

Se ha desarrollado con éxito una metodología para clasificar la estación, que emplea como variable de respuesta el Índice de Estación y es independiente de las curvas altura dominante-edad. El método denominado de intercepción, se ha adaptado para la estimación del IE_{25} de una especie polidámica como *Pinus radiata* y ha mostrado una muy buena precisión, revelándose como una excelente herramienta para la clasificación de la estación a edades tempranas. Esta sólida herramienta sumada a la buena aptitud predictiva de las curvas de crecimiento en altura dominante abre las puertas para predecir fiablemente la producción final de rodales juveniles, hecho totalmente inédito en el país.

El hecho de haber desarrollado una técnica independiente de estimación del IE_{25} (y por ende de la calidad de estación), tanto para rodales jóvenes como para los adultos, le otorga al técnico la posibilidad de elegir cuales de los sistemas de curvas de calidad de estación quiere emplear, el

anamórfico o el polimórfico. Si bien el sistema polimórfico es más complejo desde el punto de vista matemático y computacional, su aplicación se facilita al poder estimar independientemente el IE_{25} .

En términos generales se ha demostrado que las especies como *Pinus radiata* pueden tener crecimientos proporcionales en altura dominante y ello permite utilizar las curvas anamórficas; siempre que se evite emplearlas para predecir el IE_{25} en rodales juveniles, etapa en que se manifiesta el polimorfismo. Pero también se ha demostrado el error que se puede cometer al no comprobar adecuadamente los patrones de crecimientos de las especies creciendo en diferentes estaciones. El hecho que la especie posea un patrón sensiblemente proporcional de crecimiento tardío en altura no significa que cualquier sistema anamórfico pueda expresarlo, la disponibilidad de buenos datos y la correcta utilización podrá garantizar un sistema anamórfico biológicamente consistente.

Se desarrolló un método de calibración de las funciones polimórficas de altura dominante, que superan a las propuestas publicadas por Ibañez (1989) y Álvarez *et al.* (1999). Se logró en forma simple una exactitud del 100% entre el IE_{25} y la altura predicha a los 25 años por la curva polimórfica de altura dominante-edad correspondiente.

Crecimiento a Nivel de Rodal en Área Basal

Se ha logrado expresar en forma original el crecimiento en área basal de *Pinus radiata* para la provincia de Guipúzcoa, aplicando la teoría del espacio de los estados. Ello ha resultado en dos modelos, uno aprovechando el vínculo desarrollado entre dos índices de densidad y otro ajustando la función diferencial de Bertalanffy-Richards.

Para desarrollar éstos se definieron las evoluciones de los índices de densidad relativa, registrando para la zona ecológica que integra la provincia los siguientes valores máximos: *I.D.R.*: 1450, Densidad Relativa: 14-15, Factor de Altura: 11-12 y el Factor de Espaciamiento: 8-9. Obviamente la experimentación tendrá la última palabra respecto a los valores máximos dados de los índices. Como se ha demostrado, estos valores de densidades relativas máximas constituyen datos sumamente importantes para delinear ciertos modelos de crecimientos a nivel de rodal.

Se ha perfeccionado el sistema que vincula los índices de densidad: Densidad Relativa (*DR*) y Factor de Altura (*FA*) partiendo de la propuesta de Andenmatten *et al.* (1997) y Andenmatten (1999). La excelencia de este vínculo se basa en que con funciones matemáticas muy simples se logran proyectar cuatro variables de estado (*N*, *H_α*, *D_g* y *G*) que describen en conjunto perfectamente la estructura de un rodal en cualquier momento.

El perfeccionamiento del método ha consistido en encontrar un vínculo no proporcional o de proporcionalidad logarítmica entre los índices, que hace más eficiente las proyecciones de corto y largo plazo. Trabajando con *Pinus radiata* se ha encontrado que la relación entre los índices no es proporcional directa, de la forma DR/FH , a lo largo de la vida del rodal, ya que dicho cociente muestra una clara tendencia decreciente con la edad; alcanzándose una proporcionalidad de ese tipo recién cuando ambos índices alcanzan su máximo. Ello genera que la utilización de un factor de proporcionalidad directa, denominado F por los autores, para expresar la relación en los ID , no sea tan eficiente como emplear una relación variable o una proporcionalidad entre los logaritmos de los índices.

El vínculo entre los índices ha permitido esbozar la hipótesis de crecimiento de las masas de *Pinus radiata* sin intervenciones y en cuatro calidades de estación. Se considera que las simulaciones de estos crecimientos tienen una base sólida no experimental. Sólida pues han entregado algunos parámetros, como el área basal máxima, sobre los cuales se han desarrollado los métodos de predicción del crecimiento. Estos métodos aplicados sobre la muestra, han obtenido errores muy bajos para las proyecciones de corto plazo (4 a 6 años). Se consideran datos no experimentales pues no provienen de series reales de crecimientos de rodales testigos.

Estos crecimientos de rodales no intervenidos representan un techo de las relaciones dasométricas y selvícolas, debajo del cual trabajan los modelos para predecir el crecimiento de los rodales intervenidos.

Las cuatro funciones de transición que se han desarrollado han dado resultados altamente satisfactorios. En las proyecciones de corto plazo se obtuvieron errores muy bajos (6 al 9 %), mientras que en las de largo plazo cumplen con la hipótesis biológica de base, que la producción bruta final de diferentes regímenes de manejo es común para cada calidad de estación. Finalmente son funciones que satisfacen las propiedades matemáticas y biológicas de compatibilidad, consistencia y composición.

Si bien en varias oportunidades se ha escrito sobre la teoría del espacio de los estados aplicada al crecimiento forestal de las masas españolas, la función de transición local 3.13 se puede considerar como la primera que cumpliendo eficientemente lo citado en el párrafo anterior, logra proyectar el estado actual del rodal a partir exclusivamente de variables de estado considerando la edad o el tiempo en forma implícita.

Por todo ello, se concluye que se ha entregado un conjunto de ecuaciones que abren el espectro disponible para la predicción del crecimiento y la producción de los montes de *Pinus radiata* en España, resultando en una serie de métodos cuya aplicación se puede extender a cualquier especie creciendo en masas regulares.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, J.; RODRÍGUEZ, R.; VEGA, G.; 1999. *Elaboración de un modelo de crecimiento dinámico para rodales regulares de Pinus pinaster Ait. en Galicia*. Inv. Agr. Sist. Rec. Ftale. 8 (2): 319-334.
- AMARAL, S.; 1978. *Studies in Growth and Yield Estimation for Pinus Taeda L. Plantation in the state of Paraná*. Brazil. Tesis doctoral. Inédita. Estados Unidos.
- AMARO, A.; REED, D.; TOME, M.; THEMIDO, I.; 1998. *Modeling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal*. For. Sc. 44 (1):37-46.
- ANDENMATTEN, E.; LETOURNEAU, F.; 1997. *Funciones de Intercepción de Crecimiento para predicción de Índices de Sitio en Pino Ponderosa de aplicación en la región Andino Patagónica de Río Negro y Chubut*. Quebracho 5:5-9. Argentina.
- ANDENMATTEN, E.; LETOURNEAU, F.; ORTEGA, A.; 1997. *Vínculo entre Densidad Relativa y Factor de Espaciamiento y su Relación con la Altura Dominante*. Actas Simposio IUFRO. Valdivia, Chile.
- ANDENMATTEN, E.; LETOURNEAU, F.; 1998. *Curvas de Índice de Sitio para Pinus ponderosa (Dougl.) Law de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina*. Rev. Univ.Nac.La Plata (2). La Plata, Argentina.
- ANDENMATTEN, E.; 1999. *Proyección de Tablas de Rodal para Pino Oregon en la Región Andino Patagónica de la Provincias de Chubut y Río Negro, Argentina*. Tesis de Magister en Ciencias. Inédito. Valdivia, Chile.
- ASCASIBAR, J.; 1997. *La situación forestal de cara al siglo XXI*. Rev. Inv. Est. Vascos 42 (2): 309-323.
- ASCASIBAR, J.; 1998. Comunicación personal.
- BAILEY, R.; CLUTTER, J.; 1974. *Base-Age invariant polymorphic site curves*. For. Sc. 20 (2):155-159.
- BECK, D.; 1971. *Height – Growth pattern and site index of white pine in the southern Appalachians*. For Sc. 17 (2): 252-260.
- BECKING, J.; 1954. *Einige Gesichtspunkte für die Durchführung von vergleichenden Durchforstungsversuchen in gleichaltrigen Beständen*. Proc. IUFRO. Roma, Italia.
- BRAVO, F.; GRAU, J.; GONZÁLEZ, F.; 1996. *Análisis de Modelos de Producción para Populus X euroamericana en la Cuenca del Duero*. Inv. Agr. Sist.y Rec. For. 5(1): 77-95. España.
- BRAVO, F.; MONTERO, G.; MIREN DEL RÍO; 1997. *Índice de densidad de las masas forestales*. Ecología 11: 177-187.
- BROWN, J.; STIRES, J.; 1981. *A modified growth intercept method for predicting site index in young white Pine stands*. For. Sc. 27 (1):162-166.
- BRUCE, D.; WENSEL, L.; 1987. *Modelling Forest Growth: approaches, definitions, and problem*. Forest Growth Modelling and Prediction, Volume 1.IUFRO Conference. Soc. of Amer. For. Pub. N° SAF-87.12:1-8p.
- BUCKMAN, R.; 1962. *Growth and Yield of Red Pine in Minnesota*. U.S.D.A. For. Ser. Tech. Bull. 1.272.
- BURKHART, H.; GREGOIRE, T.; 1994. *Forest Biometrics*. G. Patil and Rao eds. Handbook of Statistics. 12: 377 – 407.
- CALVO, R.; GONZÁLEZ, J.; PÉREZ, S.; 1994. *Manual de modelos no lineales en los ámbitos agronómico, ganadero y forestal*. INIA. 58 p. Madrid, España.
- CAMERON, I.; 1988. *An Evaluation of the Density Management Diagram for Coastal Douglas -fir*. B.C. Min. Of For. Lands, Res. Branch. 17 p. Canadá.

- CANTERO, A.; 1998. *Perspectiva de los Pinares de Radiata del País Vasco*. Euskadi Ftal. 55:6-9.
- CANTERO, A.; ESPINEL, S.; SÁENZ, D.; 1995. *Un modelo de gestión para las masas de Pinus radiata en el País Vasco*. Cuad. S.E.C.F. Nº 1 : 193- 198. España.
- CARMEAN, W.; 1972. *Site index for upland Oaks in the central States*. For. Sc. 18 (2):109-120.
- CASTILLA, G.; PRIETO, A.; 1992. *Desarrollo y utilización de un simulador de Producción de madera para masas de Pinus radiata en el País Vasco*. Montes Nº48: 34-38. Madrid.
- CHAUCHARD, L.; 1991. *Modelos de Crecimiento Individual de Raulí*. Actas VI Jor. Téc. : Inventario, Modelos de Producción y Crecimiento Forestales, Eldorado, Argentina.
- CHAUCHARD, L.; DÍAZ BALTEIRO, L.; PRIETO, A.; 1999a. *Repoblaciones con Pinus radiata en Guipúzcoa: Posibles Mejoras en cuanto a la Gestión*. II Reunión del Grupo de Trab. Repoblaciones Ftal-Soc. Esp. Cs. Ftal. Inédito. Lourizán, España.
- CHAUCHARD, L.; SBRANCIA, R.; GONZÁLEZ P., M.; MARESCA, L.; RABINO, A.; 1999b. *Aplicación de las leyes fundamentales de la densidad de bosques de Nothofagus: Regla de los $-3/2$ o ley de autorraleo*. Bosque. 20 (2): 79-94. Chile.
- CHAUCHARD, L.; PRIETO, A.; CANTERO, A.; FERNÁNDEZ, R.; 2000. *Growth intercept meted for polycyclic species: the case of Pinus radiata D.Don*. Enviado a For. Eco. Manag., pendiente de evaluación.
- CLUTTER, J.; 1963. *Compatible Growth and Yield Models for Loblolly Pine*. For. Sc. 9 : 354-371.
- CLUTTER, J.; FORSTON, J.; PINEAAR, L.; BRISTER, G.; BAILEY, R.; 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. Ed. Krieger Pub. Com. (reditado): 333 p.
- CURTIS, R.; 1964. *A Stem - Analysis approach to site - index curves*. For. Sc. 10 (2):241-256.
- CURTIS, R.; 1982. *A simple index of stand density for Douglas -fir*. For. Sc. 27 (1):92-94.
- CURTIS, R.; CLENDENEN, G. ; DeMARS, D.; 1981. *A New Stand Simulator for Coastal Douglas-fir. DFSIM Users Guide*. U.S.For. Serv. General Tech. Report PNW-128.
- CURTIS, R.; HERMAN, F.; De MARS, D.; 1974. *Height growth and site index for Douglas - fir in high elevation forests of the Oregon - Washington Cascades*. For. Sc. 20 (4):307-316.
- DAHMS, W.; 1963. *Correction for a possible bias in developing site index. Curves from sectioned tree data*. Jour.For.:25-27.
- DANIEL, P.; HELMS, U.; BAKER, F.; 1982. *Principios de Silvicultura*. Ed. Mc Graw-Hill. 492 p.
- DAVIS, L. ; JOHNSON, K. ; 1987. *Forest Management*. 3^{ra} Ed, Mc Graw-Hill. 790 p. Estados Unidos.
- DAY, R.; 1985. *Crop Plans in Silviculture*. Lakehead Univ. Sch. For. Rep. W.S.I. 2975 (F-4) ODC 624. Ontario, Canadá.
- DAY, R.; GONDA, H.; 1987. *The Crop Planning Method Improve the Yield of Slash Pine Plantations in Misiones*. CIEF. Simp. Silvicultura y Mejoramiento y Genético. 28p.
- DORRONSORO, V.; 1999. Comunicación personal.
- DRAPER, N.; SMITH, H.; 1981. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons 2^o Ed. 673 p. Estados Unidos.
- DREW, T.; FLEWELLING, J.; 1977. *Some Recent Japanese Theories of Yield-Density Relationships and Their Application to Monterrey Pine Plantations*. For. Sc. 23: 517-534.
- DREW, T.; FLEWELLING, J.; 1977. *Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas -fir plantations*. For. Sc. 25:518-532.

- DUPLAT, P.; TRAN-HA, M.; 1986. *Modeles de croissance en hauteur dominante*. Of. Nat. For.- Sect. Tech. Doc 86:38 p. Francia.
- DYER, M.; BAILEY, R.; 1987. *A test of six methods for estimating true heights from stem análisis data*. For. Sc. 33 (1):3-13.
- ECHEVERRÍA, I.; 1942. *Ensayo de Tabla de Producción de Pinus insignis D. en el norte de España*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. N°22. Madrid. 67 p.
- ECHEVERRÍA, I.; 1943. *Tratamiento de Pinus insignis: espesura, podas y claras*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. N° 26. Madrid. 153 p.
- ECHEVERRÍA, I.; DE PEDRO, S.; 1944. *El pinus insignis D. en el norte de España*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. N° 31. Madrid. 54 p.
- ERVITI, J.; 1991. *Desarrollo de Modelos de Crecimiento y Producción de las Masas Forestales de Pinus halepensis Mill*. España. Tesis Doctoral. U.P.M. inédito. Madrid.
- ESPASA; 1985. *Diccionario Enciclopédico*. Espasa-Calpe, tomo 3: 1.120 p.
- ESPINEL, S.; CANTERO, A.; SÁENZ, D.; 1987. *Un modelo de simulación para rodales de Pinus radiata en al País Vasco*. Montes 48:34-38.
- FERNÁNDEZ, J.; GOLFIN, S.; 1977. *Reflexiones sobre las interacciones entre la Silvicultura y la Calidad de la Madera (Coníferas)*. Montes 47: 49-51.
- GARCÍA, O.; 1974. *Sobre modelos matemáticos de rodal*. Inst. Ftal Inf. Téc. 48. Chile.
- GARCÍA, O.; 1983. *A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stand*. Biometrics 34(4) : 1059-1072.
- GARCÍA, O.; 1988. *Growth Modelling -A Review*. N.Z. For. 33 (3): 14-17. Traducción del autor.
- GARCÍA, O.; 1984. *New Class of Growth Models for Even-Aged Stands: Pinus radiata in Golden Down Forests*. New Zeland forum. For. Sc. 14(1): 65-88.
- GARCÍA, O.; 1987. *Experience with an Advance Growth Modelling Methodology*. IUFRO Conference: Forest Growth Modelling and Prediction, Volume 1, Soc. of American For. Pub. N° SAF-87: 668-675.
- GARCÍA, O.; 1990. *Growth of thinned and pruned stands*. Proceedings of a IUFRO Symp. Min. of For. N.Z. Bulletin 1451 : 84-97.
- GARCÍA, O.; 1994a. *The State -Space approach in Growth Modelling*. Can. Jour. For. Res. 24: 1984-1903.
- GARCÍA, O.; 1994b. *Minimum data for forest plantation management*. IUFRO Conf. Sudáfrica. 15 p.
- GARCÍA, O.; 1995. *Índices de sitio preliminares para Eucalypto*. Ciencia e Inv.Ftal 9 (1):3-21. Chile.
- GARCÍA, O.; 1998. Comunicación personal.
- GOBIERNO VASCO, 1997. *Inventario Forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco-1996*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- GÓMEZ, J.; 1996. *Pinus nigra Arn en el Sistema Ibérico:Tablas de crecimiento y producción*. INIA-Monografías:106 p.
- GÓMEZ, J.; 1998. *Modelos de Crecimiento y Producción para Pinus nigra Arn. en el Sistema Ibérico*. Montes 54(4): 5-18.
- GONDA, H.; 1999. *Raleos en plantaciones de Pino Ponderosa*. Informe Final CIEFAP-gtz. Inédito. Argentina.
- GONDA, H.; TESCH, S.; MARSHALL, D.; CORTÉS, G.; 1988. *A growth intercept index for Unthinned young-growth Ponderosa Pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina*. Tesis doctoral Oregon State University. Inédita, 198 p.

- GOULDING, C.; 1994. *Development of growth models for Pinus radiata in New Zealand- Experience with management process models.* For. Eco. Manag. 69: 331-343.
- GONZÁLEZ, J.; MEYA, D.; ARRUFAT; *Primeras tablas de selvicultura a la carta para masas regulares de Pinus nigra Arn. del Prepirineo Catalán.* INIA: Sist. Rec. For. 8 (1):49-61.
- HÄGGLUND, B.; 1981. *Evaluation of forest site productivity.* For. Abst. Review Art. C.F.B. 42 (11):515-527.
- HOYER, G.; HERMAN, F.; 1989. *Height-age and site index curves for Pacific silver in the Pacific Northwest.* Res. Pap. PNW-RP-418. US Dep. Agr. For. Ser. Pacific Northwest Res. St.: 33 p.
- HUMMEL, F.; 1954 *Definition of thinning treatments.* Proc. IUFRO. Roma, Italia.
- IBAÑEZ, J; 1989. *El Haya (Fagus sylvatica) en La Rioja. Selvicultura y Ordenación.* Tesis Doctoral. ETSI Montes, U.P.Madrid.
- ITO, T.; OSUMI, S., 1984. *An Analysis of the Basal Area Growth in Even-Aged pure Stand Based on the Richards Growth Function.* Jour. Japan. For. Soc. 66(3) : 99-108.
- JOHNSON, F.; CARMEAN, W.; *Sampling error in the estimation of site index.* Fotoc. Jour. For.
- KNOWE, S.; FOSTER, S.; ROUSSEAU, R.; NANCE, W.; 1998. *Height -age and height - diameter relationships for monocultures and mixtures of eastern cottonwood clones.* For. Eco. Manag. 106:115-123.
- KLEPAC, D.; 1983. *Crecimiento e Incremento de Árboles y Masas Forestales.* Univ.Aut. Chapingo. 365p. México.
- LARSON, B.; CAMERON, I., (s/r). *Guidelines for Thinning Douglas-fir: Uses and limitations.* Cap. 36:310-316. Canadá.
- LENHART, D. ; 1972. *An alternative procedure for improving height/age data from stem analysis.* For. Sc. 18:332.
- LONG, J.; Mc CARTER, J.; 1984. *Density Management Diagram: A Practical Approach.* Growth and Yield and Mensurational Tricks: Reg. Tech. Conf.: 25-29. Logan, Estados Unidos.
- LONG, J.; SMITH, F.; 1984. *Relation Between Size and Density in Developing Stands: A Description and Possible Mechanisms.* For. Eco. Manag. 7: 191-206.
- LUNDGREN, A.; DOLID, W.; 1970. *Biological growth functions describe published site index curves for Lake States timber species.* USDA For. Serv. Research Paper N C36: 9 p.
- MADRIGAL, A.; TOVAL, G.; GARCÍA, J.; LOZANO, A.; ORTEGA, C.; TELLA, G.; VIZCAY, V.; 1975. *Tablas de Producción de Pinus radiata D.don. en las Provincias Vascongadas.* Mrio. Agr. Serv. Prod. Ftal. UMBRO SA Tomo I y II: 213 p. España.
- MADRIGAL, A.; ÁLVAREZ, J.; RODRÍGUEZ, R.; ROJO, A.; *Tablas de producción de los montes españoles.* Fund. Conde del Valle de Salazar. Madrid, España.
- MAGNUSSEN, S.; PENNER, M.; 1996. *Recovering time trends in dominant height from stem analysis.* Can. Jour. For. Res. 26:9-22.
- MESA INTERSECTORIAL DE LA MADERA, 1997. *El sector de la Pasta y Papel en el País Vasco.* Euskadi ftal. 50:34-39.
- MESA INTERSECTORIAL DE LA MADERA, 1997. Folleto. 4 p.
- MITCHELL, K.; CAMERON, I.; 1985. *Managed Stand Yield Tables for Coastal Douglas-fir: Initial Density and Precommercial Thinning.* B.C. Min. Of For. Res. Branch. Victoria. 69p.
- MONSERUD, R.; 1984. *Height growth and site index curves for inland Douglas -fir based on stem analysis data and forest habitat type.* For. Sc. 30 (4):943-965.
- MONSERUD, R.; 1987. *Variations on a theme of site index.* IUFRO Conference: Forest Growth Modelling and Prediction, Volume 1, Soc. of American For. Pub. N° SAF-87:419-427.

- MONSERUD, R.; REHFELD, G.; 1987. *Genetic and environmental components of variation in inland Douglas -fir site index*. Intermountain Res. St. Rep. 18p. Moscow, Estados Unidos.
- MORALES, R.; WEINTREAU, P.; PETERS, R.; GARCÍA, J.; 1979. *Modelos de simulación y manejo para plantaciones forestales. Conceptos y revisión bibliográfica*. CONAF-OEA-FAO, Doc. Trab. N°30: 114 p.
- NIGH, D.; 1996. *Growth intercept models for species without distinct annual branch whorls: Western Hemlock*. Can. Jour. For. Res. 26:1407-1415.
- ORTEGA, A.; MONTERO, G.; 1988. *Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión*. Ecología 2:155-184.
- ORTEGA, A.; 1989. *Modelos de evolución de masas de Pinus sylvestris L.* Tesis doctoral ETSI Montes, U.P.Madrid. Inédita. 230 p.
- OSUMI, S.; 1983. *Applicabilité de la fonction de Richards al'analyse de Croissance de l'arbre*. Les colloques INRA. 17:77-886. Orleans, Francia.
- OTAZUA, F.; 1998. *Invertir en el Monte*. Euskadi Ftal. 51-52:9-14.
- PAYANDEH, B.; WANG, Y.; 1994. *Modified site index equations for mayor Canadian timber species*. For. Eco. Manag. 64:97-101.
- PIENAAR, L.; 1969. *Towards the Development of Forest Management Tables*. For. S. Afr. 10: 15-19.
- PIENAAR, L.; TURNBULL, K.; 1973. *The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth in even - aged stands*. For Sc. 19:2-22.
- PIENAAR, L.; 1979. *An approximation of Basal Area Growth after Thinning Based on Growth in Unthinned Plantations*. For Sc. 25 (2): 223-232.
- PIENAAR, L.; SHIVER, B.; 1984. *An Analysis and Models of Basal Area Growth in 45 - Year - Old Unthinned and Thinned Slash Pine Plantation Plots*. For. Sc. 30(4):933-942.
- PIENAAR, L.; SHIVER, B.; 1986. *Basal Area Prediction and Projection Equations for Pine Plantations*. For. Sc. 32 (3): 626-633.
- PITA, A.; 1965. *Clasificación provisional de las calidades de estación en las masas de Pino Laricio y Pino Carrasco en la península ibérica*. Anales IFIE 10-Año 38:35-60. España.
- PRIETO, A.; DÍAZ BALTEIRO, L.; HERNANDO, A.; ASCASIBAR, J.; DORRONSORO, V.; 1996a. *Gestión de las masas de Pinus radiata en Guipúzcoa*. Inf. Final Convenio ETSI Montes-Diputación Foral Guipúzcoa. Inédito. Madrid.
- PRIETO, A.; DÍAZ BALTEIRO, L.; HERNANDO, A.; ASCASIBAR, J.; DORRONSORO, V.; 1996b. *Gestión de las masas de Pinus radiata en Guipúzcoa*. II Reunión Gr. Trab. Ord. Montes. Soc. Esp. Cs. Ftal. Inédito.
- PRIETO, A.; DÍAZ BALTEIRO, L.; HERNANDO, A.; DORRONSORO, V.; GILABERT, H.; RÍOS INSUA, V.; 1997. *"GESRAD". Software para calcular la rentabilidad financiera de masas de Pinus radiata en Guipúzcoa*. Acta II Cong. Ftal. Español-Iratí, (4):447-452.
- PRIETO, A.; DÍAZ BALTEIRO, L.; HERNANDO, A.; DORRONSORO, V.; GILABERT, H.; 1998. *Gestión de masas de Pinus radiata en Guipúzcoa*. II Reunión Gr. Trab. Ord. Montes. Soc. Esp. Cs. Ftal. Cuad. 6:169-176.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P.; 1997. *Mensura Forestal*. IICA. 512 p.
- REINEKE, L.; 1933. *Perfecting a Stand density index fro even-aged forests*. J. Agric. Res. 46 : 627-638.
- RICHARDS, F.; 1959. *A Flexible Growth Function for Empirical Use*. Journal of Exp. Bot. 10 (29) : 290-300.
- RODRÍGUEZ, R.; ÁLVAREZ, J.; VEGA, G.; TOVAL, H.; RUIZ, P.; 1993. *Revisión de las curvas de calidad de estación de Pinus pinaster Ait. en Galicia*. Cong. Ftal Español. Tomo II:587-592. Lourizan, España.
- ROJO, A.; 1994. *Crecimiento y producción de Pinus sylvestris L. en la Sierra de Guadarrama*. Tesis doctoral. ETSI Montes, U.P.Madrid. Inédito.

- ROJO, A.; MONTERO, G.; 1994. *Tablas de Producción Españolas*. Montes 38:35-42.
- SÁNCHEZ, F.; ROJO, A.; RODRÍGUEZ, R.; 1997a. *Silvicultura de Pinus radiata D. Don. en montes gestionados por la administración en la zona central de la Provincia de Lugo*. II Congreso Forestal Español-Irati 97:493-498.
- SÁNCHEZ, R.; RODRIGUEZ, S.; ROJO, A.; 1997b. *Primeros Datos de Crecimiento y Producción de Pinares de Pinus radiata D. Don. en montes Gestionados por la Administración en la zona central de la provincia de Lugo*. II Congreso Forestal Español-Irati 97:487-492.
- SCHUMACHER, F.; 1939. *A new growth curve and its application to timber-yield studies*. J. For. 37 : 819-820.
- SPURR, S.; 1952. *Forest inventory*. Ronald Press Co. New York, 476 p.
- STRUB, M.; SPRINZ, P.; 1987. *Comparisons of southern pine height growth*. IUFRO Conference: Forest Growth Modelling and Prediction, Volume 1, Soc. of American For. Pub. N° SAF-87:428-434.
- SULLIVAN, A.; CLUTTER, J.; 1972. *A simultaneous growth and yield model for Loblolly Pine*. For. Sc. 18(1): 76-86.
- THROWER, J.; 1989. *Site quality evaluation using site index*. Note of silviculture Inst. Of Br. Columbia: 11 p. Canadá.
- THROWER, J.; 1990. *Growth intercepts for estimating site index*. Workshop E.P. 703: 6 p. Victoria, Canadá.
- THROWER, J.; GOUDIE, J.; 1992. *Development of height - age and site index functions for even-aged interior Douglas -fir in British Columbia*. Min. For. of Br. Columbia, Note 109:21 p.
- THROWER, J.; KOZAK, R.; 1990. *Interior Lodgepole Pine Planting Density Chart*. Sil. Inst. of B. C. Workshop. 17 p. Prince George, Canadá.
- VANCLAY, J.; 1992. *Assessing site productivity in tropical moist forests: a review*. For.Ec. and Manag. 54:257-287.
- VANCLAY, J.; 1994. *Modelling Forest Growth and Yield-Application to Mixed Tropical Forests*. CAB International. 312 p.
- VANCLAY, J.; 1995. *Growth Model for Tropical Forest: A synthesis of models and Methods*. For. Sc. 41, 1 p. 7-42.
- VÁZQUEZ, G.; 1983. *Crecimiento de un bosque de guadal explotado en el litoral pacífico colombiano: Estudio de crecimiento diamétrico (1)*. Crónica Ftal y Medio Amb. Junio:35-62. Colombia.
- VERGARA, N.; FLORES de la C.; 1985. *Análisis del índice de productividad del sitio de Pino Radiata. Elaboración de funciones de sitio para la VII Región*. INFOR-CORFO: 100 p. Chile.
- von GADOW, K; HUI, G.; 1999. *Modelling forest Development*. Kluwer Ac. Pub. For. Sc. N° 57. 213P. Londres.
- WANG, G.; MARSHALL, P.; KLINKA, K.; 1994. *Height growth pattern of White Spruce in relation to site quality*. For Eco. Manag. 68:137-147.
- WILSON, F.; 1979. *Thinning as Orderly Discipline: A graphic Spacing Schedule for Red Pine*. Jour. For. Agosto: 438-786. Estados Unidos.
- WOOLOONS, R.; HAYWARD, W.; 1985. *Revision of Growth and Yield Model for Radiata Pine in New Zeland*. Forest Eco. Manag. 11: 191-202.
- ZEIDE, B.; 1987. *Analysis of the -3/2 power law of self thinning*. For. Sc. 33: 517-537.
- ZEIDE, B.; 1989. *Accuracy of equations describing diameter growth*. Can. Jour. For. Res. 19 : 1238-1286.
- ZEIDE, B.; 1991. *Self - Thinning and Stand Density*. For. Sc. 37 (2):517-523.
- ZEIDE, B.; 1993. *Analysis of Growth Equations*. For Sc. 39 (3):594-616.

ANEXO I

TABLAS DE PRODUCCIÓN: APLICACIÓN PRÁCTICA

Una de las acciones de muy difícil implementación es la transferencia de los resultados de una investigación. Esta transferencia es el proceso de extensión, el cual algunos investigadores no llegan a discutir -pueden no tener razones para hacerlo- y otras veces arriban a productos de directa aplicación práctica, pero los mismos no ofrecen soluciones superadoras o los cambios esperados.

Quizás en el desarrollo de las tablas de producción encontremos ejemplos de estos problemas. Puede considerarse que una investigación aplicada es exitosa, cuando sus resultados coadyuvan en la mejora de la realidad que la involucra.

Es usual que las investigaciones sobre crecimiento y producción concluyan en las típicas tablas de selvicultura media o variable, a través de una actualización de sus relaciones fundamentales, sin analizar y mejorar la aplicabilidad de la misma. Ya son conocidas las limitaciones que estas estructuras poseen hoy en día, aunque a veces ello pareciera ignorarse en pos de una tradición. Estas estructuras fueron útiles, pero los tiempos cambian y ellas deben adecuarse a estos cambios. Por otro lado a veces se hacen grandes esfuerzos en cambiar la estructura y el funcionamiento de las tablas desarrollando herramientas avanzadas de planificación como lo son los simuladores del crecimiento y la producción. Éstos, si poseen las relaciones funcionales adecuadas y debidamente validadas, permiten la liberalización en el establecimiento de los regímenes selvícolas, posibilitando adecuar la toma de decisiones a los objetivos del propietario forestal.

Estos simuladores tienen dos observaciones, una se refiere al empleo de algoritmos y funciones correctas desde los puntos de vistas matemático y biológico, ya que al hacer innumerable los regímenes factibles de establecer, cualquier inconveniente con las propiedades de las mismas propagará errores a las salidas. La otra observación es que, en general, no es una herramienta amigable sin el debido proceso de transferencia (extensión). Esto último se acentúa si los esquemas tradicionales de trabajo se basan en la rutina establecida con las tablas de producción de selviculturas media y variable.

Para tratar de identificar el problema se han llevado a cabo varias reuniones entre los distintos actores: técnicos de la ETSI Montes, de la Diputación Foral de Guipúzcoa, de IKT SA y con los forestales del País Vasco. Los técnicos del Servicio Forestal de la Provincia, principales receptores de los productos de la investigación, han dejado trascender que éstos deben ser básicamente simples, en su funcionamiento y en su estructura. Ello llevó a que los resultados obtenidos deberían traducirse en una tablas de producción que, manteniendo la estructura tradicional, permitan planificar con cierta

flexibilidad diferentes regímenes selvícolas. Ello se logra merced a establecer un nuevo esquema de decisiones y a mejorar y reducir las relaciones funcionales tratando de reducir al mínimo las mismas.

Otra de las necesidades detectadas ha sido la de poder adecuar cualquier tabla de producción teórica a las condiciones reales de cualquier monte que se está gestionando. Actualmente ello se logra corrigiendo los valores de la tabla de producción, por intermedio de una serie de cálculos de coeficientes de adecuación o calibración, los cuales son tediosos y erráticos.

Actualmente en el País Vasco existen dos tablas de selvicultura media y dos simuladores, estos últimos son los que permiten realizar la gestión a la carta; aunque en la actividad rutinaria de gestión forestal es frecuente que se emplee alguna de las tablas de selvicultura media. La razón de ello es que todavía no se ha realizado la debida extensión de los simuladores desarrollados, pero también influye que a los mismos todavía se los puede considerar en etapa de validación y perfeccionamiento.

Entre tanto, la presente investigación pretende por un lado aportar información para el perfeccionamiento de cualquier simulador de *Pinus radiata* y por el otro aportar los productos que en la actualidad requieren los profesionales forestales que trabajan en la actividad pública y privada. Estos productos consisten en:

1. Tabla de Producción de Selvicultura Variable.
2. Tabla de Producción a la Carta.

Las peculiaridades de las mismas son:

- Requieren para su uso de un programa de ordenador de fácil manipulación y muy extendidos como una planilla de cálculo.
- Mejoran el funcionamiento y la precisión, a través de reducir las relaciones funcionales y aumentar la eficiencia de las mismas.
- No cambian la estructura o cara de la tabla típica de producción o la modifica levemente, ya que esta es la que todos conocen y usan.

Con todo ello se espera lograr:

- Una simplificación en el proceso de planificación sin alterar demasiado los elementos que comúnmente se manejan.
- Una mejora en la exactitud de las estimaciones de las producciones de los distintos regímenes selvícolas que se establezcan.

- Facilitar el camino para la introducción de simuladores más potentes en la comunidad vasca forestal.

Lo expuesto no se presentará en forma completa, en el sentido de que hay aspectos importantes como las funciones de salida de los volúmenes de los diferentes productos factibles de obtener, que quedan fuera de la presente tesis. De todas maneras en una primera etapa se debe evaluar las aptitudes de la presente propuesta y luego si terminar de completar o mejorar el grupo de relaciones funcionales de salida.

I.1. INTRODUCCIÓN A LAS TABLAS DE PRODUCCIÓN PROVISIONALES DE *PINUS RADIATA*

Como se expuso, las presentes tablas de producción pretenden incorporar los nuevos desarrollos manteniendo en lo posible la estructura tradicional que poseen.

Con la incorporación de las nuevas funciones además se propone un nuevo esquema de funcionamiento, disminuyendo el número de variables funcionales (aquellas estimadas por funciones) y aumentando las variables decisionales (las que escoge el técnico). Justamente este esquema le otorga flexibilidad para la definición de los regímenes selvícolas a diferencia de la rigidez de tablas conocidas.

Se han diferenciado dos tipos de tablas de producción, que son las siguientes:

- a) **Tablas de Producción de Selvicultura o Densidad Variable:** su objetivo es la exploración y el establecimiento de alternativas teóricas de producción. Es teórica pues trabajaría sobre un rodal hipotético o no presente y se la denomina de selvicultura variable pues permite variarla a través de regular la oportunidad, el tipo y la intensidad de cada clara. Se presenta en dos formatos:
 - i. Formato típico.
 - ii. Formato simulador.

- b) **Tabla de Producción a la Carta:** su objetivo es la exploración y selección de alternativas concretas de producción, es decir, aplicables a un rodal o conjunto de rodales particulares. Se denomina a la carta pues permite incorporar las variables de estado de un rodal presente como fuente de partida de la simulación. Obviamente permite regular los parámetros de cada clara y también se presenta en dos formatos de salidas:
 - i. Formato típico.
 - ii. Formato simulador.

Estas tablas permiten predecir la producción para diferentes alternativas de manejo con base a administrar los siguientes parámetros:

- 1) La densidad inicial de plantación.
- 2) Los ciclos de cortas o las oportunidades de las claras y corta final.
- 3) El tipo de clara.
- 4) La intensidad de la clara.
- 5) La tasa de mortalidad temprana en los ciclos de cortas.

Todas estas constituyen variables decisionales cuyas características son:

Densidad Inicial de Plantación: a falta de datos experimentales las funciones desarrolladas se basan en una densidad máxima de plantación de 2.500 plantas/ha.

Ciclos de Cortas y Turno: las edades máximas de la base de datos no superan los 39 años, de manera que por encima de los 40 años deben controlarse las salidas. Respecto al largo del ciclo de cortas no se presentarían restricciones.

Tipo de Clara: se define con el Índice de Corta (*IC*) y obviamente se deben administrar claras por lo bajo o neutras. En términos generales se pueden definir los tipos de claras en función de los siguientes valores del *IC*:

ÍNDICE DE CORTA (<i>IC</i>)	TIPO DE CLARA
< 0,85	Por lo bajo
0,85 a 1,15	Neutra
> 1,15	Por lo alto

El tipo de clara puede variar de una a otra, dependiendo del régimen productivo. El *IC* además es el que permite discriminar entre las áreas basales de la corta y en pie posterior a la clara. El algoritmo es el siguiente:

$$IC = \frac{G_c / N_c}{G_a / N_a} = \frac{G_c \cdot N_a}{G_a \cdot N_c} \quad (1)$$

De (1) se despeja G_c que es la variable incógnita:

$$G_c = \frac{IC \cdot G_a \cdot N_c}{N_a} \quad (2)$$

Donde:

- IC*: Índice de Corta.
G_a, N_a: Área basal y número de pies antes de la clara.
G_c, N_c: Idem de la clara.

Las variables *IC*, *N_a* y *N_c* son variables decisionales, mientras que *G_a* es una variable funcional. Como la función de salida del volumen de la tabla es una función que depende del *G_c*, con este procedimiento ya se estaría en condiciones de estimar los volúmenes correspondientes por hectárea.

Intensidad de la Clara: se establece decidiendo el número de árboles que quedarán en pie después de la clara, ya que por diferencia se obtiene el número de árboles que se extraerán. En la decisión sobre el número de árboles que se extraerán en cada clara se puede seguir algún criterio o simplemente considerar lo que se acostumbra o es tradición. Para la regulación de las intensidades de las cortas se han incorporado dos índices de densidad: el factor de espaciamento (*FE*) y el índice de densidad del rodal (*IDR*). Éstos se pueden emplear para definir o explorar las zonas de manejo del rodal que permitirían alcanzar los objetivos productivos planteados.

Tasas de Mortalidad: debe establecerse con adecuados ensayos experimentales, por ahora queda como una variable decisional, pero en el futuro puede expresarse por una función. En las tablas figuran dos campos en los que se debe definir la tasa de mortalidad, una es la que se espera ocurra hasta la primera clara (mortalidad temprana si corresponde) y otra es la que se espera ocurra en cada ciclo de corta.

I.1.1. Procedimiento

I.1.1.1. Tabla de Producción de Selvicultura Variable (Mejora de la 3^{ra} generación)

- 1) Se establecen los parámetros iniciales (cabecera de la tabla):
 - a. *IE*: elegido o establecido por algún método.
 - b. Densidad inicial.
 - c. Tasa de mortalidad hasta la primera clara.
 - d. Nombre del régimen: simplemente para identificarlo o diferenciarlo de otros.
- 2) Se definen la edades de las claras (Columna 1).
- 3) Definir el tipo de cada clara estableciendo el índice de corta.(Columna 15).

- 4) Definir la intensidad de cada clara decidiendo el número de árboles remanentes posterior a la misma (Columna 17).
- 5) Ingresar la tasa de mortalidad entre claras (ciclo de cortas) si corresponde (Columna 21).

Para el ejemplo se presenta una tabla en formato típico con un régimen tradicional y otra en formato de salida de un simulador con un régimen de ciclo de cortas variables, ambos extraídos del artículo de Espinel et al. (1997).

I.1.1.2. Tabla de Producción a la Carta (4^{ta} generación)

Básicamente esta tabla opera de la misma manera que la anterior, la diferencia básica la constituye en que inicia el proceso de simulación desde los parámetros de estado de un rodal particular. Estas variables de estado son: edad (t), altura dominante (H_0), número de árboles (N) y área basal (G). A partir de estas variables trabajan las funciones de transición en altura dominante y área basal y las correspondientes funciones de salida.

TABLA DE PRODUCCION SELVICULTURA VARIABLE

FORMATO TÍPICO

Variables Decisionales

FUENTE: Parcelas Permanentes tratadas y Análisis Troncales

IDR máximo: **1450/75**

ESPECIE: *Pinus sp.* DENSIDAD Inicial: **1850** árb/ha

Tasa de MORTALIDAD: **2.78%** (árb/ha)

Régimen: **Típico**

ESTACION: **Variables Funcionales**

LOCALIDAD:

Edad [años]	RODAL PRE-CLARA										MASA EXTRAIDA					RODAL POST-CLARA				
	Ho [m]	Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Hart-Becking [%]		IDR		Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Indice Corta(Ab)	Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Vol. Acum.	TasaMort. CicloCorta
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
10	10.6	11.9	1406.32	15.68	58.06	25.2	30.4	437	321	10.6	443.3	3.93	14.64	0.80	12.4	963	11.65	43.42	58.06	23.9825
15	16.7	18.9	963.00	27.09	159.29	19.2	24.0	622	428	17.4	341.0	8.15	47.94	0.85	19.7	622	18.94	111.34	173.93	
20	21.8	26.1	622.00	33.39	255.07	18.4	22.2	667	474	24.8	195.0	9.42	71.97	0.90	26.7	427	23.97	183.10	317.65	
25	25.6	33.0	427.00	36.48	327.90	18.9	21.4	660	524	31.3	95.0	7.30	65.66	0.90	33.4	332	29.17	262.24	462.45	
30	28.4	38.4	332.00	38.51	384.71	19.3	21.4	652	530	38.4	62.0	7.19	71.84	1.00	38.4	270	31.32	312.86	584.92	
35	30.5	43.1	270.00	39.31	421.17	19.9	---	634	---	43.1	270.0	39.31	421.17	1.00	---	---	---	---	693.22	

PRODUCCION DEL REGIMEN

AREA BASAL TOTAL	75.31 m2/ha	
VOLUMEN p.f. 7 cm	693.22 m3/ha	
VOLUMEN p.f. 20 cm	557.12 m3/ha	80.4%

Crecimiento en Volumen [m3/ha.año]

Edad [años]	Volumen Total			Volumen Maderable	
	Crec.Medio Principal	Crec. Total	Crec. Corr.	Crec.Medio Principal	Crec. Total
0					
10	4.34	5.81	23.17	0.00	0.00
15	7.42	11.60	28.75	1.93	2.23
20	9.16	15.88	28.96	5.71	7.88
25	10.49	18.50	24.49	8.61	12.36
30	10.43	19.50	21.66	9.41	14.69
35	12.03	19.81	---	11.38	15.92
0	---	---	xxx	---	---

**TABLA DE PRODUCCION DENSIDAD VARIABLE
FORMATO SIMULADOR**

PROYECCIÓN: MÉTODO PIENAAR (1979)

FUENTE: Parcelas Permanentes tratadas y Análisis Troncales

IDR máximo: **1450/75**

DENSIDAD **árb/h**

2.7

ESPECIE: *Pinus sp.*

Inicial: **1850a**

Tasa de MORTALIDAD: **8% (árb/ha)**

Régimen: **IKT**

ESTACION: II

I.E.: **25.6**

LOCALIDAD:

Edad [años]	RODAL PRE-CLARA					Hart-Becking [%]				MASA EXTRAIDA					RODAL POST-CLARA						
	Ho	Dg	N	AB	Volumen	Hart-Becking [%]		IDR		Dg	N	AB	Volumen	Indice	Dg	N	AB	Volumen	Vol.	TasaMort.	IncDp
	[m]	[cm]	[Arb/ha]	[m2/ha]	[m3/ha]	Pre	Post	Pre	Post	[cm]	[Arb/ha]	[m2/ha]	[m3/ha]	Corta(Ab)	[cm]	[Arb/ha]	[m2/ha]	[m3/ha]	Acum.	CicloCorta	
0	0	0	1850	0	0					0	0	0	0		0	0	0	0			
10	10.6	11.9	1406.32	15.58	58.06	25.2	29.3	437	341	10.6	366.3	3.25	12.10	0.80	12.3	1040	12.33	45.96	58.06	23.9825	
11	11.9	13.6	1040.00	15.01	62.78	26.1	26.1	398	398	0.0	0.0	0.00	0.00		13.6	1040	15.01	62.78	74.88		1.27
12	13.2	14.8	1040.00	17.83	82.50	23.5	23.5	455	455	0.0	0.0	0.00	0.00		14.8	1040	17.83	82.50	94.60		1.22
13	14.4	15.9	1040.00	20.75	104.99	21.5	21.5	513	513	0.0	0.0	0.00	0.00		15.9	1040	20.75	104.99	117.09		1.16
14	15.6	17.0	1040.00	23.73	130.00	19.9	19.9	570	570	0.0	0.0	0.00	0.00		17.0	1040	23.73	130.00	142.10		1.11
15	16.7	18.1	1040.00	26.75	157.26	18.5	18.5	626	626	0.0	0.0	0.00	0.00		18.1	1040	26.75	157.26	169.36		1.05
16	17.8	19.1	1040.00	29.75	186.42	17.4	21.2	681	484	17.6	340.0	8.27	51.80	0.85	19.8	700	21.49	134.61	198.52		0.99
17	18.9	20.9	700.00	23.97	159.01	20.0	20.0	528	528	0.0	0.0	0.00	0.00		20.9	700	23.97	159.01	222.91		1.11
18	19.9	21.9	700.00	26.46	184.87	19.0	19.0	570	570	0.0	0.0	0.00	0.00		21.9	700	26.46	184.87	248.77		1.06
19	20.8	22.9	700.00	28.95	211.97	18.1	18.1	612	612	0.0	0.0	0.00	0.00		22.9	700	28.95	211.97	275.87		1.01
20	21.8	23.9	700.00	31.42	240.06	17.4	17.4	653	653	0.0	0.0	0.00	0.00		23.9	700	31.42	240.06	303.96		0.96
21	22.6	24.8	700.00	33.86	268.89	16.7	16.7	692	692	0.0	0.0	0.00	0.00		24.8	700	33.86	268.89	332.79		0.91
22	23.4	25.7	700.00	36.26	298.23	16.1	16.1	730	730	0.0	0.0	0.00	0.00		25.7	700	36.26	298.23	362.13		0.86
23	24.2	26.5	700.00	38.60	327.86	15.6	19.7	767	482	26.5	260.0	14.34	121.78	1.00	26.5	440	24.26	206.08	391.76		0.82
24	24.9	27.5	440.00	26.12	228.53	19.1	19.1	511	511	0.0	0.0	0.00	0.00		27.5	440	26.12	228.53	414.20		1.00
25	25.6	28.5	440.00	27.97	251.46	18.6	18.6	539	539	0.0	0.0	0.00	0.00		28.5	440	27.97	251.46	437.13		0.96
26	26.2	29.4	440.00	29.82	274.78	18.2	18.2	567	567	0.0	0.0	0.00	0.00		29.4	440	29.82	274.78	460.46		0.92
27	26.8	30.3	440.00	31.65	298.38	17.8	—	594	—	30.3	440.0	31.65	298.38	1.00	—	—	—	—	484.06		0.89

**TABLA DE PRODUCCION SELVICULTURA A LA CARTA
FORMATO TÍPICO**

Variables del Rodal Actual						es tratadas y Análisis Troncales				IDR máximo: 1450/75	Tasa de MORTALIDAD: 2.78% (árb/ha)				Régimen: ETSI Montes				
ESTACION: II → I.E.: 25.6						NSIDAD Inicial: 1850 árb/ha				LOCALIDAD:									
RODAL PRE-CLARA						MASA EXTRAIDA					RODAL POST-CLARA								
Edad [años]	Ho [m]	Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Hart-Becking [%]		IDR		Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Indice Corta(Ab)	Dg [cm]	N [Arb/ha]	AB [m2/ha]	Volumen [m3/ha]	Vol. Acum.
						Pre	Post	Pre	Post										
11	11.6	14.6	1460	24.4	99.62	22.5	30.4			12.2	660	7.72	31.52	0.70	16.3	800	16.68	68.1	99.62
17	18.9	20.6	916.02	30.52	202.51	17.5	20.0	676	541	18.4	216.0	5.76	38.21	0.80	21.2	700	24.77	164.30	202.51
18	19.9	23.6	700.00	30.71	214.58	19.0	23.7	641	439	21.8	250.0	9.32	65.14	0.85	24.6	450	21.39	149.44	252.78
27	26.8	33.6	450.00	39.91	376.18	17.6	21.5	716	496	31.9	150.0	11.97	112.85	0.90	34.4	300	27.94	263.33	479.53
30	28.4	39.6	300.00	36.99	369.45	20.3	24.9	618	428	37.6	100.0	11.10	110.83	0.90	40.6	200	25.89	258.61	585.61
38	31.5	48.2	200.00	36.42	402.40	22.5	---	560	---	48.2	200.0	36.42	402.40	1.00	---	---	---	---	729.44
	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

PRODUCCION DEL REGIMEN			
AREA BASAL TOTAL	82.29	m2/ha	
VOLUMEN p.f. 7 cm	760.96	m3/ha	
VOLUMEN p.f. 20 cm	609.93	m3/ha	80.2%

Crecimiento en Volumen [m3/ha.año]					
Edad [años]	Volumen Total			Volumen Maderable	
	Crec.Medio Principal	Crec. Total	Crec. Corr.	Crec.Medio Principal	Crec.Medio Total
11					
17	9.66	11.91	50.28	3.44	3.79
18	8.30	14.04	25.19	4.43	6.14
27	9.75	17.76	35.37	8.19	12.62
30	8.62	19.52	17.97	7.98	15.26
38	10.59	19.20	---	10.31	16.05
0	---	---	---	---	---
0	---	---	xxx	---	---

ANEXO II

DATOS DE LAS PARCELAS PERMANENTES

ESPECIE:		<i>Pinus radiata.</i>			IDR máx: 1430	árboles/ha con Dp= 25 cm										
AÑO:		1988			PRE-CLARA						CLARA					
PNº	IS	Hd	Edad	NºArboles	Dp	ABasal	Vol.pf20	Volpf7,5	F.E	IDR	%IDR	NºArboles	Dp	ABasal	Vol.pf20	Volpf7,5
		[m]	[años]	[Arb/ha]	[cm]	[m2/ha]	[m3/ha]s/c	[m3/ha]s/c	[%]		máx	[Arb/ha]	[cm]	[m2/ha]	[m3/ha]s/c	[m3/ha]s/c
1	28,1	13,7	11	1700,0	14,1	26,44	0,00	123,24	17,7	968,7	68	700,0	11,9	7,75	0,00	31,64
2	26,4	13,8	12	1492,9	15,3	27,46	5,22	131,19	18,8	972,9	68	535,7	12,3	6,35	0,00	25,50
3	25,5	13,2	12	784,6	16,6	17,02	0,00	81,06	27,0	583,4	41	253,8	15,6	4,83	0,00	21,98
4	24,6	13,8	13	1400,0	15,7	27,20	9,50	131,56	19,4	953	67	506,7	12,2	5,95	0,00	24,06
5	26,6	15,2	13	1266,7	16,7	27,66	13,90	152,37	18,5	946,8	66	466,7	12,7	5,93	2,35	27,76
6	21,4	11,5	13	1214,3	14,0	18,71	0,00	66,78	25,0	686,8	48	371,4	12,4	4,50	0,00	14,58
7	25,3	15,4	14	988,9	16,6	21,46	1,42	112,76	20,6	735,5	51	316,7	15,1	5,64	0,00	27,72
8	24,6	14,9	14	2446,9	10,9	22,75	0,00	87,25	13,6	923,7	65	1030,7	9,1	6,72	0,00	21,78
9	23,2	15,0	15	1166,7	20,7	39,26	61,20	227,82	19,5	1232	86	477,8	17,5	11,53	1,39	60,37
10	22,4	16,3	17	1838,9	16,2	37,93	28,17	200,81	14,3	1313	92	783,3	12,9	10,27	3,22	46,09
11	24,7	18,2	17	1344,4	14,0	20,68	5,85	113,86	15,0	759,4	53	650,0	9,9	4,99	0,00	20,74
12	25,9	20,1	18	316,7	26,3	17,16	81,60	134,79	28,0	489,8	34	50,0	22,7	2,02	3,89	14,93
13	16,8	13,4	19	1069,2	18,5	28,59	16,71	134,60	22,8	939,8	66	330,8	15,4	6,19	2,47	25,15
14	18,8	15,1	19	1370,6	16,6	29,76	23,53	146,23	17,9	1020	71	564,7	11,8	6,21	0,00	21,83
15	28,5	23,3	19	404,5	29,1	26,99	178,60	246,55	21,3	739,1	52	140,9	23,6	6,18	21,12	50,71
16	28,6	24,4	20	308,7	35,7	30,93	264,01	301,44	23,3	780,7	55	47,8	27,3	2,81	16,16	25,82
17	23,8	22,5	23	365,2	32,0	29,31	205,72	255,21	23,3	773,3	54	60,9	26,0	3,24	15,47	26,11
18	29,6	28,0	23	324,0	33,5	28,50	248,87	299,58	19,8	738,4	52	48,0	25,6	2,47	10,89	24,30
19	26,1	25,4	24	619,2	25,0	30,37	140,33	266,64	15,8	884,2	62	253,8	19,9	7,86	7,48	62,01
20	26,7	26,7	25	1010,7	23,1	42,39	209,85	380,34	11,8	1274	89	517,9	16,0	10,42	0,00	77,15
21	26,0	26,0	25	696,4	29,0	46,13	316,14	432,09	14,6	1265	88	189,3	20,7	6,36	18,03	52,32
22	29,0	29,0	25	283,3	40,8	36,99	372,60	402,68	20,5	885,6	62	43,3	35,5	4,29	40,18	45,85
23	27,5	28,2	26	473,3	30,4	34,26	259,09	342,65	16,3	922,9	65	120,0	22,9	4,94	15,16	44,78
24	23,5	24,1	26	288,5	37,3	31,56	266,61	294,62	24,4	782,7	55	30,8	34,1	2,81	22,33	25,67
25	22,1	22,7	26	391,7	31,2	29,94	197,33	256,08	22,3	797,8	56	62,5	22,5	2,48	7,98	18,39
26	27,4	28,7	27	387,5	34,6	36,44	319,89	377,53	17,7	931,5	65	75,0	24,9	3,67	16,22	34,52
27	22,9	24,0	27	276,0	33,1	23,78	180,45	213,18	25,1	618,6	43	44,0	27,0	2,53	12,95	21,03
28	22,4	23,5	27	348,0	35,0	33,42	258,09	300,38	22,8	850,7	59	48,0	27,4	2,82	14,14	23,17
29	22,8	23,9	27	308,0	32,5	25,58	187,63	228,70	23,8	670,3	47	48,0	22,8	1,97	8,00	15,31
30	23,3	24,9	28	219,2	37,2	23,84	202,59	225,21	27,1	591,9	41	38,5	31,9	3,07	22,42	27,72
31	24,3	26,0	28	691,7	31,8	54,79	413,63	512,87	14,6	1450	101	316,7	25,2	15,77	83,46	136,47
32	23,4	25,0	28	280,8	37,7	31,36	268,83	298,05	23,9	774,6	54	42,3	32,6	3,53	26,51	32,20
33	25,2	27,5	29	366,7	32,6	30,55	239,36	296,77	19,0	800,2	56	63,3	23,3	2,70	7,28	23,01
34	23,5	25,6	29	485,7	31,3	37,43	267,35	340,12	17,7	995,6	70	114,3	25,5	5,86	24,64	48,89
35	21,8	23,7	29	211,5	35,5	20,88	164,62	187,87	29,0	528,7	37	19,2	25,9	1,01	3,23	7,96
36	24,5	27,2	30	255,6	43,6	38,23	367,15	390,38	23,0	890,6	62	37,0	33,6	3,28	26,24	31,57
37	17,1	18,8	30	685,0	28,8	44,51	234,36	323,23	20,3	1225	86	245,0	24,2	11,27	31,58	73,13
38	22,1	24,8	31	307,7	40,3	39,21	345,16	372,74	23,0	943,2	66	30,8	34,2	2,83	22,35	25,70
Media	24,4	21,4	22,1	747,1	27,2	30,8	167,2	247,1	20,5	885,2	61,9					

Anexo II: Datos de Parcelas Permanentes

AÑO:	1993											PRE-CLARA					CLARA				
	PN°	IS	Hd	Edad	N°Arboles	Dp	ABasal	Vol.pf20	Volpf7,5	F.E	IDR	%IDR	N°Arboles	Dp	ABasal	Vol.pf20	Volpf7,5				
		[m]	[años]	[Arb/ha]	[cm]	[m2/ha]	[m3/ha]s/c	[m3/ha]s/c	[%]		máx	[Arb/ha]	[cm]	[m2/ha]	[m3/ha]s/c	[m3/ha]s/c					
1	30,5	20,4	15	1000,0	20,0	31,30	46,20	241,02	15,5	697,6	49										
2	28,0	19,7	16	957,1	20,9	32,9	62,90	242,24	16,4	719,6	50										
3	26,6	18,6	16	530,8	23,0	22,1	57,26	159,23	23,3	465,1	33	130,8	20,8	4,43	4,38	30,63					
4	25,7	19,0	17	893,3	21,4	32,2	79,50	226,90	17,6	697	49	360,0	18,5	9,66	9,14	62,52					
5	26,1	19,3	17	800,0	22,2	31,0	82,97	224,72	18,3	662,7	46	306,7	19,3	8,93	12,30	60,65					
6	24,2	17,8	17	842,9	20,1	26,7	21,00	169,97	19,4	594,5	42	500,0	18,2	13,06	3,90	78,48					
7	26,0	20,2	18	672,2	21,7	25,0	46,69	182,83	19,1	537,9	38	277,8	19,0	7,86	5,55	53,75					
8																					
9	24,8	20,1	19	688,9	27,3	40,4	206,56	319,14	18,9	794,7	56										
10	24,6	21,7	21	1044,4	20,9	35,7	90,68	263,74	14,3	781,6	55										
11	26,4	23,3	21	677,8	20,0	21,2	35,67	164,16	16,5	473,2	33										
12	28,3	25,9	22	266,7	31,6	20,9	166,10	205,41	23,6	388	27										
13	17,7	17,2	24	738,5	25,0	36,2	124,19	236,07	21,4	737,7	52										
14	20,0	19,5	24	811,8	23,2	34,3	107,30	234,95	18,0	720,6	50	352,9	18,9	9,91	9,91	59,59					
15	28,2	27,4	24	245,5	38,1	27,9	261,76	290,48	23,3	481	34	72,7	33,3	6,35	54,03	64,79					
16	28,2	28,2	25	256,5	42,8	37,0	370,67	395,01	22,1	607	42										
17	25,2	27,0	28	300,0	38,0	34,0	306,32	339,91	21,4	585,6	41										
18	30,8	32,3	27	276,0	40,4	35,5	378,82	413,26	18,6	595,8	42										
19	25,8	28,1	29	365,4	32,1	29,5	235,20	289,87	18,6	544,3	38	150,0	28,3	9,44	61,61	88,78					
20	26,9	29,3	29	482,1	31,6	37,9	297,19	383,90	15,5	702,5	49	28,6	26,0	1,52	8,54	14,57					
21	25,4	28,2	30	500,0	36,3	51,7	455,60	523,57	15,9	907,9	63	228,6	30,2	16,40	114,22	158,09					
22	30,5	33,3	29	236,7	45,4	38,3	430,73	454,26	19,5	614,2	43										
23	26,7	29,7	30	353,3	35,3	34,5	311,82	359,66	17,9	612,5	43										
24	24,6	27,3	30	253,8	42,1	35,3	337,13	360,03	23,0	584,4	41										
25	23,4	25,9	30	329,2	36,3	34,2	283,83	325,84	21,3	599	42										
26	26,4	30,3	32	312,5	40,6	40,4	400,66	434,14	18,7	677,8	47										
27	24,9	28,5	32	232,0	38,4	26,9	249,25	274,63	23,0	461,6	32	24,0	35,6	2,39	21,20	23,91					
28	24,0	27,4	32	300,0	41,0	39,6	368,08	398,23	21,1	661,4	46										
29	24,2	27,6	32	260,0	38,5	30,3	272,44	302,13	22,5	518,6	36										
30	22,7	25,5	31	180,8	39,8	22,5	200,93	217,42	29,2	381,1	27										
31	23,8	27,5	33	375,0	39,9	47,0	431,80	469,95	18,8	793,8	56	187,5	40,3	23,93	220,11	239,49					
32	22,6	26,0	33	238,5	43,8	35,9	336,00	355,55	24,9	584	41										
33	24,8	29,1	34	303,3	37,6	33,7	305,73	342,74	19,7	582,4	41										
34	23,4	27,3	34	371,4	36,5	38,8	335,92	375,97	19,0	679,2	47										
35	21,7	24,0	30	192,3	37,5	21,2	177,09	195,03	30,0	367,9	26										
36	23,6	26,5	31	218,5	46,2	36,6	353,94	370,84	25,5	583,8	41										
37	18,6	21,5	35	440,0	35,5	43,5	327,19	368,25	22,2	770,9	54										
38	23,7	28,1	35	276,9	45,6	45,2	445,58	468,39	21,4	724,2	51										
Media	25,1	33,3	26,5	465,5	33,4	33,7	243,3	313,0	20,4	618,7	43,3										

PNº	AÑO:		1999	PRE-CLARA		Sobreviviente			F.E	IDR	%IDR
	IS	Hd	Edad	NºArboles	Dp	ABasal	Vol.pf20	Volpf7,5			
	[m]	[m]	[años]	[Arb/ha]	[cm]	[m2/ha]	[m3/ha]s/c	[m3/ha]s/c	[%]		máx
1											
2											
3	29,0	26,6	22	400,0	30,4	29,1	221,35	290,58	18,8	548,1	38
4	23,3	22,0	23	466,7	29,2	31,3	185,68	260,74	21,0	599,8	42
5	23,7	22,4	23	486,7	29,6	33,6	211,67	283,84	20,2	638,7	45
6	25,8	24,4	23	335,7	29,3	22,7	146,67	204,79	22,4	433,9	30
7	25,2	24,5	24	388,9	29,2	26,0	169,34	232,57	20,7	498	35
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14	21,7	23,6	29	447,1	30,6	32,9	210,62	280,20	20,0	617,5	43
15	28,0	30,6	29	172,7	44,8	27,2	285,80	302,00	24,9	438,7	31
16											
17											
18	30,9	36,1	33	176,0	50,1	34,7	413,13	428,70	20,9	535,9	37
19	26,3	31,0	34	215,4	38,7	25,3	246,22	271,09	22,0	432,9	30
20	27,7	33,2	35	428,6	36,4	44,7	428,57	494,23	14,5	783,2	55
21	24,6	29,2	35	264,3	43,9	40,1	397,88	422,21	21,1	651,6	46
22											
23											
24											
25											
26											
27	25,6	31,2	37	204,0	41,5	27,5	276,33	296,66	22,4	458,3	32
28											
29											
30											
31	23,5	28,8	38	170,8	44,4	26,4	259,10	274,11	26,6	427,9	30
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
Media	25,8	28,0	29,6	319,8	36,8	30,9	265,6	310,9	21,2	543,4	38,0