

**UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO**

**DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES**

**PROGRAMA DE POSTGRADO**

**"ANALISIS DEL CRECIMIENTO DE PINUS PATULA SCH. ET  
CHAM. EN DIFERENTES NIVELES DE COMPETENCIA  
INTRAESPECIFICA, EN HUYACOCOTLA. VER."**

**TESIS DE MAESTRIA**

**Presentada como Requisito parcial**

**Para obtener el Grado de:**

**Maestro en Ciencias Forestales**



**BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.**

**POR**

**YADIRA ELISA ROMERO GUTIERREZ**

**DIRECCION ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

**CHAPINGO, MEXICO**

**1993**

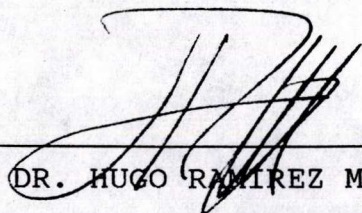




Esta Tesis fue realizada bajo la dirección del comité indicado,  
ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial  
para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES**

**PRESIDENTE:**

  
\_\_\_\_\_  
DR. HUGO RAMÍREZ MALDONADO

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
DR. JESUS VARGAS HERNANDEZ

**BIBLIOTECA CENTRAL II A. CH.**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
M. EN C. ARTEMIO CADENA MENESES

26093



El Jurado del Examen de Grado de Maestría en Ciencias Forestales,  
estuvo constituido por:

PRESIDENTE:

  
\_\_\_\_\_  
DR. HUGO RAMIREZ MALDONADO

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JESUS VARGAS HERNANDEZ

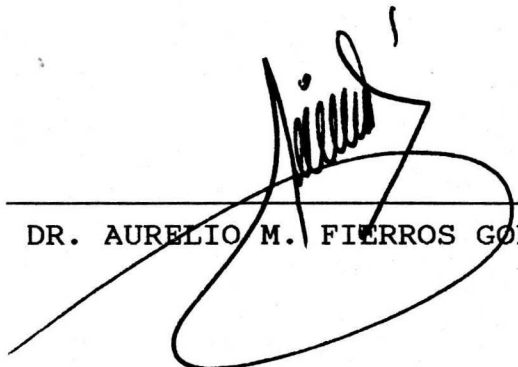
ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
M. EN C. ARTEMIO CADENA MENESES

REPRESENTANTE DE LA  
COORDINACION DE  
ESTUDIOS DE  
POSTGRADO DE  
LA UACH:

  
\_\_\_\_\_  
M. EN C. J. CARMEN AYALA SOSA

REPRESENTANTE DE LA  
COORDINACION DE  
ESTUDIOS DE  
POSTGRADO DE  
LA UACH:

  
\_\_\_\_\_  
DR. AURELIO M. FIERROS GONZALEZ

Cada uno de los cuales, revisó y aprobó la Tesis presentada.

Chapingo, Méx., 24 de agosto de 1993.



## DEDICATORIA

Esta Tesis está dedicada a los mejores amigos de mi vida, mis padres:

GILBERTO FEDERICO ROMERO VARGAS Y LUZ MARIA GUTIERREZ VARGAS

por ser la causa y mayor motivación de todos mis actos y de todos mis sueños.

A mis hermanas,

KIRA E ILSE

constantes pasajeras de mi corazón.

A la memoria de mi abuelo:

ING. LUIS ROMERO FLORES

con la gratitud de haberme enseñado a entenderlo, por aceptar y querer a las personas que amo y por brindarme la hospitalidad de su corazón.

A mi país,

MEXICO

a cuyos paisajes y gente debo mi felicidad y el mejor de mis esfuerzos.

**BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.**



## AGRADECIMIENTOS

Para que esta Tesis fuese realizada, conté con el apoyo de amigos, familiares y maestros.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado, por su paciencia y audacia al confiar en mi.

Al M. en C. Baldemar Arteaga Martínez, quien actuó como tutor académico en muchas de mis actividades.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa y a Francisco Pérez por su apoyo en el procesamiento del material biológico en el aserradero de la DiCiFo.

Al M. en C. Marcelo Zepeda, a quien agradezco sus consejos y el material de trabajo proporcionado.

A los Ingenieros Saúl Monreal Rangel, Servando Ramos Evaristo y Carlos Monroy Rivera por las facilidades brindadas.

Agradezco especialmente la ayuda prestada durante el trabajo de campo, a mis padres y a quienes considero como hermanos: Reymundo Ibarra Ramírez y Marco Antonio Zapata Benítez; así como a Gerardo Mesa.

A mi novio Ing. Roberto Rafael Muñoz Rivera, quien pacientemente me ha acompañado en las altas y bajas de mi estado de ánimo durante mi trabajo.

A mi tío Lorenzo Blásquez y a Alfonso Casarrubias Girón, quienes me brindaron todo lo que estaba a su alcance.

A los habitantes de Huayacocotla, Ver., por su confianza y apoyo.

A todos ellos agradezco además, la amistad que me han brindado.



PARTE DE LOS ANALISIS PRESENTADOS EN ESTA TESIS FUERON REALIZADOS  
EN EL CENTRO DE INVESTIGACION EN GENETICA Y AMBIENTE, DE LA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE TLAXCALA.



# C O N T E N I D O

	Pág.
CONTENIDO .....	i
INDICE DE CUADROS .....	iv
INDICE DE FIGURAS .....	vi
INDICE DE APENDICES .....	vii
RESUMEN .....	ix
 1. INTRODUCCION .....	 1
 2. ANTECEDENTES	
2.1. CRECIMIENTO .....	4
2.1.1. LA RELEVANCIA DE LA COPA EN EL CRECIMIENTO DE UN ARBOL .....	5
2.1.2. LA COPA FUNCIONAL .....	7
2.2. COMPETENCIA .....	8
2.2.1. CIERRE DE COPAS .....	11
2.2.2. CLASES DE COPA .....	12
2.3. INTERACCION DENSIDAD-COMPETENCIA CRECIMIENTO	
2.3.1. GENERALIDADES .....	15
2.3.2. EN PLANTACIONES .....	19
2.4. INDICES DE COMPETENCIA .....	21
2.4.1. EVOLUCION DE LOS INDICES DE COMPETENCIA ...	23
2.4.2. INDICES DE COMPETENCIA DEPENDIENTES DE LA DISTANCIA .....	27
2.5. MODELOS DE SIMULACION .....	30
2.5.1. MODELOS DE ARBOL INDIVIDUAL .....	31
2.6. FUENTES DE DATOS .....	33
2.6.1. ANALISIS TRONCALES .....	34
2.7. CARACTERIZACION DE LA ESPECIE <u>PINUS PATULA</u>	
2.7.1. TAXONOMIA Y DESCRIPCION .....	36
2.7.2. DISTRIBUCION GEOGRAFICA	
1. EN MEXICO .....	38
CARACTERISTICAS DEL AREA DE DISTRIBUCION..	41
2. EN OTROS PAISES .....	43
CARACTERISTICAS DE LAS AREAS PLANTADAS ...	44
2.7.3. DATOS SOBRE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO	
1. EN BOSQUE NATURAL .....	45
2. EN PLANTACIONES .....	46



	Pág.
2.7.4. USOS E IMPORTANCIA ECONOMICA .....	49
1. EN MEXICO .....	50
2. EN OTROS PAISES .....	50
 <b>3. METODOLOGIA</b>	
3.1. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	
3.1.1. UBICACION .....	51
3.1.2. OROGRAFIA .....	51
3.1.3. GEOLOGIA .....	51
3.1.4. HIDROLOGIA .....	52
3.1.5. CLIMA .....	52
3.1.6. VEGETACION .....	52
3.2. LAS PLANTACIONES CONSIDERADAS	
3.2.1. SELECCION DE LAS PLANTACIONES .....	53
3.2.2. PARTICULARIDADES DE LAS PLANTACIONES .....	55
3.3. MEDICIONES DE CAMPO	
3.3.1. ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS DE MUESTREO ...	59
3.3.2. LEVANTAMIENTO DE DATOS .....	60
3.3.3. CAPTURA DE DATOS .....	67
3.4. EDICION DE DATOS ORIGINALES Y CREACION DE OTRAS VARIABLES .....	67
 <b>4. ANALISIS Y RESULTADOS</b>	
4.1. <u>VOLUMEN</u>	
4.1.1. CALCULO DE VOLUMEN .....	68
4.1.2. ECUACIONES DE VOLUMEN .....	73
4.1.3. DISCUSION Y CONCLUSIONES .....	75
4.2. <u>DETERMINACION DEL INDICE DE SITIO DE LAS     PLANTACIONES</u>	
4.2.1. LA BASE DE DATOS .....	77
4.2.2. ESTIMACION DE LAS CURVAS DE INDICE DE SITIO .....	79
4.2.3. CALIFICACION DE LAS PLANTACIONES POR INDICE DE SITIO .....	84
4.2.4. DISCUSION Y CONCLUSIONES .....	85
4.3. <u>ANALISIS DE CORRELACION SIMPLE</u> .....	87
4.3.1. DISCUSION DE LOS RESULTADOS .....	88
4.3.2. CONCLUSIONES .....	92

4.4. <u>ECUACIONES DE CRECIMIENTO PARA ALGUNOS</u> <u>ATRIBUTOS DEL ARBOLADO</u>	
4.4.1. SELECCION DEL MODELO .....	95
4.4.2. OBTENCION DE ECUACIONES DE CRECIMIENTO ....	97
4.4.3. DISCUSION .....	100
4.4.4. CONCLUSIONES .....	105
4.5. <u>ANALISIS INDIVIDUAL SOBRE COMPETENCIA</u> <u>INTRAESPECIFICA</u>	
4.5.1. SELECCION DE PLANTACIONES .....	106
4.5.2. IDENTIFICACION DE ARBOLES COMPETIDORES ....	109
4.5.3. INDICADORES DE COMPETENCIA .....	114
4.5.4. ECUACIONES PARA LOS ATRIBUTOS DN, ALT Y VOL .....	120
4.5.5. DISCUSION .....	124
4.5.6. CONCLUSIONES .....	128
5. DISCUSION GENERAL .....	130
6. CONCLUSIONES GENERALES .....	133
7. LITERATURA CITADA .....	135
8. APENDICE .....	143

## INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Pág.
1. Porcentaje de ocupación de <u>Pinus patula</u> en las plantaciones de diferentes países .....	44
2. Crecimiento de árboles de <u>Pinus patula</u> en diferentes localidades de su distribución natural ...	46
3. Crecimiento de árboles de <u>Pinus patula</u> registrado en plantaciones de diferentes países .....	47
4. Plantaciones incluídas. Edad y clave asignada .....	56
5. Datos fisiográficos de las plantaciones .....	57
6. Datos dasométricos de las plantaciones .....	58
7. Variables medidas en las parcelas de muestreo .....	60
8. Parámetros estimados para cada ecuación de volumen ..	74
9. Número y origen de las relaciones altura-edad consideradas para calcular el índice de sitio (IS) de las plantaciones .....	77
10. Valores obtenidos a la edad base (11 años) para las curvas de índice de sitio .....	82
11. Alturas estimadas con el modelo de Chapman-Richards y el índice de sitio correspondiente a cada plantación.....	84
12. Variables utilizadas en el análisis de correlación simple .....	87
13. Criterios de clasificación de los datos para el análisis de correlación simple .....	87
14. Coeficientes de correlación obtenidos entre algunas variables relacionadas con la copa, el fuste y la edad del arbolado, en los ajustes 1 y 2 .....	88
15. Comparación entre los coeficientes de correlación mayores a 0.85 de los análisis realizados a) sobre todos los datos y b) excluyendo a las plantaciones PABECAB Y PABECPC (de densidades extremas) .....	89
16. Comparación entre algunos coeficientes de correlación obtenidos por índice de sitio .....	91



17. Modelos de crecimiento evaluados en un análisis preliminar para la selección de uno de ellos .....	95
18. Resultados del ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Backman .....	96
19. Variantes utilizadas en el ajuste del modelo de Schumacher para diferentes variables .....	97
20. Resultados obtenidos con el modelo de Schumacher utilizando en el primer caso (ajuste 1), la totalidad de las observaciones y exceptuando, en el segundo caso (ajuste 2) las plantaciones PABECAB y PABECPC por presentar densidades de establecimiento extremas ....	98
21. Resultados obtenidos con el modelo de Schumacher agrupando las observaciones por posición silvícola (PS) y exceptuando a las plantaciones de densidad extrema (ajuste 3) .....	99
22. Resultados del ajuste del modelo de Schumacher sobre diferentes atributos del arbolado. El análisis se hizo sobre los promedios de las variables por PS y por parcela (ajuste 4) .....	99
23. Resultados sobre el ajuste del modelo de Schumacher para diferentes variables promediadas por plantación (ajuste 5) .....	99
24. Coeficiente de proporción entre el área de las copas de los individuos de una parcela y la superficie de la misma (CP).....	108
25. Valores máximo, mínimo y promedio para el diámetro de copa media (CM) y el radio de búsqueda para la identificación de los árboles vecinos por plantación.	111
26. Relación de árboles competidores, vecinos y objetivo encontrados en cada plantación .....	112
27. Variables utilizadas para el análisis de competencia, algunas de ellas se citan en el capítulo 2 .....	115
28. Ecuaciones obtenidas con el modelo $Y = \beta_0 + \beta_1(AF)$ para las variables DN, ALT y VOL de los árboles analizados individualmente .....	120
29. Ecuación obtenida con el ajuste de los modelos $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$ y $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$ .....	122
30. Ecuaciones obtenidas con el ajuste de los modelos $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$ y $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$ ..	123

## INDICE DE FIGURAS

Figura No.	Pág.
1. Clases de copa .....	14
2. Mapa de distribución de la especie <u>Pinus patula</u> (Wormald, 1975) .....	40
3. Ubicación de las plantaciones .....	54
4. Rodajas obtenidas a 1.3 m de altura de árboles codominantes de 14 (A) y 11 (B) años de edad, desarrollados bajo diferentes densidades de plantación .....	66
5. Esquematización de los crecimientos anuales de un árbol y proyección de la longitud que se desconoce ..	69
6. Proyección geométrica utilizada para calcular la altura a la cual puede terminar el crecimiento anual de un árbol .....	70
7. Dispersión de datos altura-edad utilizados para obtener curvas de índice de sitio .....	78
8. Curva guía por la fórmula de Chapman-Richards .....	80
9. Curvas anomórficas de índice de sitio para las plantaciones estudiadas .....	83
10. Correlación entre el volumen (VOL) y algunos variables relacionadas con la competencia, a través de la edad .....	93
11. Relación entre la densidad de las existencias en crecimiento y el crecimiento por unidad de superficie por año (modificada de Fierros González, 1993) .....	102
12. Definición esquemática de los árboles considerados ..	110
13. Definición esquemática de algunas variables .....	113
14. Dispersión de los residuales para el modelo $AF = \beta_0 + \beta_1(DIP) + \beta_2(LCEXDI) + \beta_3(LCEXVSC)$ .....	119

## INDICE DE APENDICES

Apéndice No.	Pág.
1.1. Análisis de varianza para el ajuste del modelo $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$ y $V = \beta_0 + \beta_1 (DN^2 A)$ .....	143
1.2. Análisis de varianza para el ajuste de los modelos $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$ y $V = \beta_0 (DN)^{\beta_1} (A)^{\beta_2}$ ...	147
2.1. Datos de altura-edad obtenidos de parcelas temporales y análisis troncales, que fueron utilizados para obtener curvas de índice de sitio.....	148
2.2. Detalle del ajuste del modelo para índice de sitio de Chapman-Richards y parámetros obtenidos para la ecuación de la curva guía .....	150
3.1. Análisis de correlación simple entre variables relacionadas con el tamaño del árbol y con la competencia, incluyendo todas las observaciones .....	151
3.2. Análisis de correlación simple entre variables relacionadas con el tamaño del árbol y con la competencia, excluyendo a la plantaciones PABECAB y PABECPC .....	153
4.1. Detalle del ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Backman, por métodos no lineales, sobre todas las observaciones (TODOS) y excluyendo las plantaciones PABECAB y PABECPC (SINPABE) .....	155
4.2. Ajustes del modelo de Schumacher para diferentes atributos del arbolado y con las variantes corres- pondientes a los ajustes 1 y 2 .....	162
5.1. Análisis de correlación simple entre las variables que se presume pueden explicar la variación en superficie foliar (AF) .....	171
5.2. Ejemplificación de la secuencia del procedimiento STEPWISE para elegir un modelo que explique la variable superficie foliar (AF) .....	172
5.3. Análisis de varianza para el ajuste del modelo $AF = \beta_0 + \beta_1 (DIP) + \beta_2 (LCEXDI) + \beta_3 (LCEXVSC)$ .....	173

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.



- 5.4. Coeficientes de correlación simple obtenidos para 42 combinaciones entre variables indicadoras de competencia. Estas combinaciones fueron incluidas en el procedimiento STEPWISE, para seleccionar un modelo que explique la superficie foliar (AF) .... 174
- 5.5. Análisis de varianza para el ajuste del modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1(AF)$  sobre las variables DN, ALT y VOL, de árboles individuales ..... 180
- 5.6. Análisis de varianza del ajuste de los modelos  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$  y  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  para las variables DN, ALT y VOL, sobre todas las observaciones y excluyendo PABECAB y PABECPC ..... 181
- 5.7. Análisis de varianza para el ajuste de los modelos  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$  y  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  para las variables DN, ALT y VOL, de todas las plantaciones y excluyendo a las de densidades extremas ..... 187

## R E S U M E N

Pinus patula es una especie con gran valor económico debido a su velocidad de crecimiento. Esta especie, originaria de la República Mexicana, ha sido introducida a diferentes naciones de varios continentes con el fin de cultivarla intensivamente.

Dadas las características de su crecimiento, Pinus patula es considerada una especie relativamente intolerante, por lo que la silvicultura de las plantaciones establecidas con esta especie debe considerar a la competencia intraespecífica como un factor determinante en su cultivo.

Este trabajo se realizó en quince plantaciones de diferentes edades establecidas en Huayacocotla, Ver. y se enfocó al estudio de algunas de las variables relacionadas con el tamaño del árbol en función de la edad y de algunos indicadores de competencia relacionados con la distancia promedio entre individuos, la cobertura de las copas y el número de árboles interactuantes en un mismo espacio.

Como resultado del análisis realizado, se generaron:

1. Una ecuación para el cálculo del volumen de los árboles estudiados.
2. Curvas de índice de sitio para la calificación de las plantaciones.
3. Coeficientes de correlación entre dimensiones del arbolado.
4. Ecuaciones de crecimiento en función de la edad.
5. Ecuaciones de crecimiento incluyendo un indicador de competencia.

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

1. El cierre de copas de las plantaciones de Pinus patula establecidas a 2 x 2 m, se presenta a la edad de 6 años
2. En condiciones similares de densidad y calidad de sitio, el número máximo de competidores que puedan interaccionar con un árbol es de cinco individuos
3. La inclusión de un indicador de competencia dependiente de la distancia mejora sustancialmente los modelos de crecimiento para las variables diámetro normal y volumen
4. La superficie foliar representa satisfactoriamente el efecto de la competencia sobre el crecimiento de un árbol, por lo que se puede usar como un indicador de la misma.

## 1. INTRODUCCION

Pinus patula es una especie endémica de la República Mexicana con gran potencial económico debido a su alta velocidad de crecimiento. Es por ello que diferentes naciones la cultivan intensivamente como especie exótica; su importancia ha sido tal que las plantaciones establecidas con esta especie cubren superficies cada vez mayores; en 1975 se reportaron 438 000 ha (Wormald, 1975). El principal objetivo de tales plantaciones ha sido producir material celulósico. En nuestro país, en cambio, no se le ha dado importancia al establecimiento de plantaciones. El volumen que se obtiene de Pinus patula en México procede de bosques naturales cuya extensión es, por cierto, relativamente pequeña. Las plantaciones que se han establecido en nuestro territorio han sido con objetivos de reforestación y como parte de los requisitos exigidos por autoridades gubernamentales para autorizar volúmenes de extracción, no necesariamente como plantaciones industriales. Tal es el caso de las plantaciones que se encuentran en la región de Huayacocotla, Ver., en la Sierra Madre Oriental.

En ese municipio se ha dado impulso a la reforestación y forestación, inclusive reconvirtiendo áreas agrícolas. Como resultado, se ha establecido un gran número de plantaciones de Pinus patula en una amplia variedad de condiciones tanto físicas como de planeación; algunas de ellas se han desarrollado en forma muy satisfactoria.



Se ha derivado poca información de plantaciones establecidas dentro del área de distribución natural de la especie. Sin embargo, el crecimiento y el rendimiento de las plantaciones de Pinus patula establecidas en el extranjero es superior al registrado en México, lo cual estimula el estudio de diferentes aspectos relacionados con el crecimiento de la especie bajo tales condiciones.

Debido a que las plantaciones de la región de Huayacocotla, Ver. se encuentran dentro de una de las áreas de distribución natural de mayor productividad de la especie, constituyen material valioso para desarrollar trabajos sobre crecimiento.

Dado que la competencia intraespecífica es un factor determinante en el crecimiento de los individuos de cualquier especie, el presente estudio pretende analizar el diámetro normal, la altura y el volumen de los árboles en función de la edad y de la competencia que se ejerce sobre ellos. El estudio se enfoca en las plantaciones que se encuentran dentro del área de distribución natural de los bosques de Pinus patula en Huayacocotla, con edades de 2 a 15 años, por no existir mayores.

Los objetivos particulares del estudio son:

1. Obtener una ecuación para calcular el volumen de los árboles de cada plantación.
2. Determinar el índice de sitio en las áreas de las plantaciones estudiadas.
3. Analizar asociaciones alométricas entre las diferentes dimensiones de los árboles.

4. Analizar diferentes variables de crecimiento a través de la edad.
5. Identificar las variables relacionadas con la competencia que puedan explicar la variación del tamaño de árboles individuales.

Dada la naturaleza de las plantaciones por estudiar, se parte de las siguientes hipótesis :

- La edad tiene una asociación positiva y significativa con la mayoría de las variables relativas al tamaño, pues los árboles se encuentran en la etapa de crecimiento temprano.
- Dado que se seleccionarán las plantaciones con mejor crecimiento dentro de la región se espera que el índice de sitio sea similar entre ellas.
- Considerando la hipótesis anterior, el efecto de la competencia sobre los árboles individuales a diferentes edades se puede explicar por alguno de los atributos del árbol.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. CRECIMIENTO

El crecimiento se define como el aumento íntegro y gradual en biomasa, producto de la actividad biológica del individuo (Zepe-da, 1983).

En el crecimiento de un árbol influyen su constitución genética y el ambiente que le rodea. La información genética determina la respuesta del árbol a los diferentes ambientes, controlando sus manifestaciones y el ambiente proporciona los nutrientes, el agua, la iluminación, etc. Por lo tanto, el crecimiento del árbol es la respuesta a la acción conjunta de su información genética y de los factores del medio.

El crecimiento de un árbol es lento hasta que produce suficiente follaje, raíces y otros tejidos que llevan a una rápida asimilación de los nutrientes. El árbol crece rápidamente mientras el incremento en follaje y raíces es mayor que el de tejido consumidor.

El destino de los fotosintatos producidos por el follaje tiene el siguiente orden general de prioridades, de acuerdo con Oliver y Larson (1992):

1. Respiración del tejido vivo.
2. Producción de raíces finas y hojas. Las hojas no sólo incorporan carbohidratos sino que también consumen más fotosintatos en el proceso de crecimiento.



3. Floración y producción de semillas.

4. El crecimiento primario -crecimiento terminal, ramificación y extensión radicular- tiene una prioridad baja. El tejido de reacción -tensión y compresión- puede tener más importancia que el crecimiento en altura.

5. Si quedan fotosintatos disponibles, éstos se adicionan al xilema (crecimiento secundario en diámetro).

La sobrevivencia y el crecimiento de un árbol pueden ser relacionados con las dimensiones de su fuente respiratoria (área y profundidad del dosel foliar). En general, el crecimiento aumenta conforme se incrementa el tamaño de la copa.

#### 2.1.1. LA RELEVANCIA DE LA COPA EN EL CRECIMIENTO DE UN ARBOL

El crecimiento de un árbol está estrechamente relacionado con el tamaño de la copa, porque la cantidad de carbohidratos producidos depende principalmente de la superficie fotosintetizadora. A través de la fotosíntesis se obtiene la glucosa que es el material básico para la realización de todas las actividades estructurales y fisiológicas (Smith, 1962; citado por Rodríguez, 1987; Oliver y Larson, 1992).

De esta forma, la sobrevivencia y el crecimiento pueden ser considerados en términos de las relaciones entre la parte productora y la parte consumidora de carbohidratos.

Por ello se ha utilizado como un índice de vigor a la proporción de copa viva, que es la proporción del largo de la copa (un estimador del potencial fotosintetizador de la superficie foliar o parte productora) y la altura del árbol (estimación del área total que respira o consumidora).

La sombra que reciben las diferentes partes de la copa es un factor moldeador de las características de la copa. La sombra lateral afecta el crecimiento de las ramas sombreadas, ya que cada rama debe fotosintetizar al menos lo suficiente para su propia sobrevivencia y crecimiento. El crecimiento del brote lateral (extensión de la rama) se reduce si la sombra limita la fotosíntesis sobre ese lado de la copa. El crecimiento de la rama se hace significativamente menor, las yemas laterales se hacen pocas y pequeñas y se incrementa el número de ramas muertas en las partes inferiores de la copa sombreada. Así, la sombra lateral determina el largo de copa y puede eventualmente reducir el crecimiento en altura si restringe demasiado el tamaño de la copa fotosintetizadora. En este caso, los árboles se vuelven menos vigorosos y eventualmente la yema terminal pierde su control sobre la forma de la copa (Oliver y Larson, 1992).

Los árboles más altos con copas de tamaño medio son los que presentan la máxima eficiencia de crecimiento (Senda y Satoo, 1956; Satoo et al., 1959; Hamilton, 1969; Assmann, 1970; Ford, 1975; O'Hara, 1988; citados por Oliver y Larson, 1990). Es decir, aprovechan al máximo los fotosintatos producidos por sus hojas.

Un árbol con copa restringida permanece proporcionalmente delgado y menos resistente a plagas conforme crece en altura. Los árboles delgados (si no son eliminados por plagas) se doblan bajo su propio peso. Al parecer, un diámetro de menos del 1% de la altura total del árbol es muy inestable para la mayoría de las especies (Abetz, 1976; Kramer, 1977; Halle et al., 1978; citados por Oliver y Larson, 1990).

#### 2.1.2. LA COPA FUNCIONAL

Cada rama debe fotosintetizar lo suficiente para crecer y sobrevivir; cuando es reprimida, la fotosíntesis disminuye y la rama toma fotosintatos del fuste para su respiración en lugar de proporcionarlo. Estas ramas no son funcionales y reducen ligeramente el crecimiento total del fuste (Oliver y Larson, 1990).

La copa viva que está por arriba de las ramas no funcionales hace una contribución positiva al crecimiento del fuste y se conoce como copa funcional. El número de ramas que va a morir depende de la distancia al árbol próximo (Bennett, 1960; Smith et al., 1965; Abetz, 1970; Drolet et al., 1972; van Laar, 1973; Carter et al., 1986a y 1986b; citados por Oliver y Larson, 1990). Así, la distancia y la altura de los árboles vecinos determinan los tamaños de copa y rangos de crecimiento de un individuo.

## 2.2. COMPETENCIA\*

La disponibilidad de los recursos esenciales para un árbol se ve limitada por las condiciones físicas, químicas y biológicas del lugar y por la competencia que se desarrolla entre los árboles para obtener esos recursos.

Competencia es la "lucha" que se establece entre dos o más individuos, de igual o diferente especie (competencia intraespecífica e interespecífica, respectivamente) por un recurso esencial para su sobrevivencia en un mismo tiempo y espacio.

La competencia se presenta "cuando la disponibilidad de recursos cae por debajo de la suma de los requerimientos necesarios para el crecimiento óptimo de una población" (Brand y Magnussen, 1988, citados por Biging y Dobbertin, 1992).

Cuando la competencia se hace presente, el desarrollo de un individuo se modifica. Si se trata de organismos de tamaño y requerimientos fijos, la intensidad de la competencia varía con la densidad, expresada ésta como número de individuos. Pero en las especies arbóreas el caso es más difícil, un árbol puede incrementar su tamaño en forma más o menos indefinida lo cual cambia sus dimensiones y su capacidad para utilizar los recursos del sitio.

Inicialmente se consideraba al mutualismo como el patrón primario de interacción entre las especies arbóreas del hemisferio norte.

---

(\*).- La principal fuente de información de este capítulo es la de Oliver y Larson, 1990; por lo que sólo se cita la literatura complementaria.



En el mutualismo, ambas especies se benefician de su asociación. Sin embargo, la competencia, a diferencia del mutualismo, no desarrolla dependencia entre los organismos y sí puede impedir que uno u otro crezca.

Algunas de las observaciones que apoyan el que las interacciones arbóreas sean competitivas y no mutualistas son:

1. La adaptación de la regeneración natural a un medio recién alterado. La repoblación de las plantas en rodales manejados o aprovechados es por regeneración natural, donde los árboles pequeños no se comportan como organismos especializados e interdependientes en un ambiente completamente diferente al que habían experimentado previamente sus predecesores.
2. La migración de especies y la longevidad de las comunidades boscosas. Las comunidades boscosas presentan algunas características que hacen improbable el desarrollo del mutualismo entre sus especies: a) el mutualismo requiere que las especies hayan coevolucionado a través de muchas generaciones. Para que una nueva generación se presente en las especies arbóreas se requiere de un disturbio muy grande y aún así mucha de la regeneración es asexual; b) los períodos impredecibles y largos que pasan entre los estados de fecundidad de un árbol; y c) muchas especies han migrado y se han separado de aquéllas con las cuales habían constituido comunidades. Se ha visto que comunidades aparentemente estables son de reciente integración y que no involucran especies que necesariamente hayan vivido juntas en el pasado.

3. La introducción de especies exóticas y la eliminación de especies nativas. Cuando existe mutualismo la eliminación de una especie puede afectar a otra; sin embargo, en especies arbóreas se ha observado que cuando esto ocurre, ya sea por actividad de patógenos o del hombre, las especies que permanecen no sufren alteración alguna y en cambio crecen mejor. Además, la capacidad de las plantas introducidas para vivir con especies nativas -sin ser excluidas por las mismas- demuestra que el mutualismo no es una fuerza interactuante dentro de las comunidades.
4. Distribuciones etáneas y disturbios en bosques. Se pensaba que después de un disturbio, diferentes especies se establecían progresivamente en un proceso en el cual la primer especie creaba un ambiente adecuado para el crecimiento de la segunda, ello permitía apreciar estratificaciones verticales dentro de las comunidades arbóreas, donde se asumía que las poblaciones de menor tamaño incluían a los árboles más jóvenes. Sin embargo, se ha demostrado que esto no necesariamente ocurre, pues tales árboles pueden haber sido suprimidos por la especie dominante y por ello crecen muy lentamente.

De manera general se ha concluido que las especies tienden a crecer donde puedan competir fácilmente, no necesariamente donde puedan crecer mejor.

La competencia generalmente inicia a nivel radicular, y poco después entre las copas de los árboles (competencia aérea), la

cual se ha definido como el momento en el que las copas de dos árboles se tocan (cierre de copas).

#### 2.2.1. CIERRE DE COPAS

Si un árbol en expansión toca árboles adyacentes las ramas se traslapan y entretejen y por la sombra ejercida disminuyen su extensión lateral. Las ramas que están por arriba de este traslape crecen sobre las ramas restringidas y sombrean el follaje inferior. El ritmo de crecimiento de los árboles en un espacio confinado es reducido si se compara con el de los árboles que crecen en condiciones abiertas, ya que la fotosíntesis disminuye en las ramas sombreadas. Eventualmente estas ramas mueren y la base de la copa viva se retrae hacia arriba. El período en el que las ramas empiezan a decaer por causa del confinamiento lateral se conoce como el principio del cierre de copas. El cierre completo de copas ocurre cuando las ramas sombreadas inferiores mueren y la copa comienza a reducirse de abajo hacia arriba.

El cierre de copas está relacionado directamente con la competencia que surge entre los individuos vecinos por un espacio de crecimiento, subterráneo y aéreo, el cual representa la fuente de luz y nutrientes que pueden aprovechar para sobrevivir y crecer.

El cierre de copas ocurre desigualmente alrededor de un árbol cuando las distancias existentes entre el árbol y las fuentes de sombra no son iguales; es por ello que el tiempo del cierre de copas y el tamaño de la copa viva están directamente relacionadas

con la distancia de las copas vecinas, es decir, el espaciamiento entre los árboles (Stiell, 1982; citado por Oliver y Larson, 1990).

La modificación de la forma del árbol ha sido referida como una "respuesta plástica" (Harper, 1977; Hutchings y Budd, 1981; citados por Oliver y Larson, 1990). Consecuentemente al cierre de copas, la distribución del follaje de los árboles entra a la fase plástica, las áreas de competencia también se describen como zonas de supresión.

Aún cuando los árboles continúan su crecimiento normal en altura después del cierre de copas, la cantidad de follaje y las dimensiones de su copa permanecen constantes; la cantidad de fotosintatos no se modifica mientras que la totalidad del tejido demandante se incrementa conforme el fuste crece más alto y delgado.

La influencia de la competencia puede manifestarse tan pronto como ésta inicie o bien un tiempo después, dependiendo de la especie.

#### 2.2.2. CLASES DE COPA

La competencia intraespecífica provoca la diferenciación en tamaño entre los individuos de una población (Rodríguez, 1987), suponiendo un acervo genético similar. El signo visible de la competencia aérea intraespecífica en los árboles es la posición relativa y el estado de sus copas (Hawley y Smith, 1972).



Debido a la combinación de los factores del ambiente con los genéticos, algunos árboles se desarrollan rápidamente y exhiben grandes copas bien formadas. Otros lo hacen más lentamente y sus copas se encuentran relativamente restringidas. Esto provoca que con el tiempo algunos árboles sean gradualmente dominantes mientras que otros son suprimidos. Una clasificación general de las clases de copa es la siguiente (Dengler, 1944; citado por Spurr y Barnes, 1980) (ver Figura 1):

**Dominantes:** los árboles con copas que se extienden sobre el nivel general del dosel y reciben luz total por arriba y parte por los costados; son más grandes que los árboles de tamaño promedio en el lugar; tienen copas bien desarrolladas pero posiblemente algo entrelazadas y muy densas.

**Codominantes:** los árboles cuyas copas forman el nivel general del dosel o se encuentran un poco más abajo; reciben luz solar total por arriba pero sólo cantidades moderadas lateralmente; normalmente tienen copas de tamaño medio y algo agrupadas en los costados.

**Intermedios:** son árboles más bajos que las clases precedentes pero con las copas dentro del dosel formado por los dominantes y codominantes; reciben luz directa por la parte superior pero escasa en los costados; normalmente tienen copas pequeñas y muy comprimidas lateralmente.

Suprimidos: árboles cuyas copas están completamente por debajo del nivel general del dosel; no reciben luz directa ni por arriba ni por los costados.

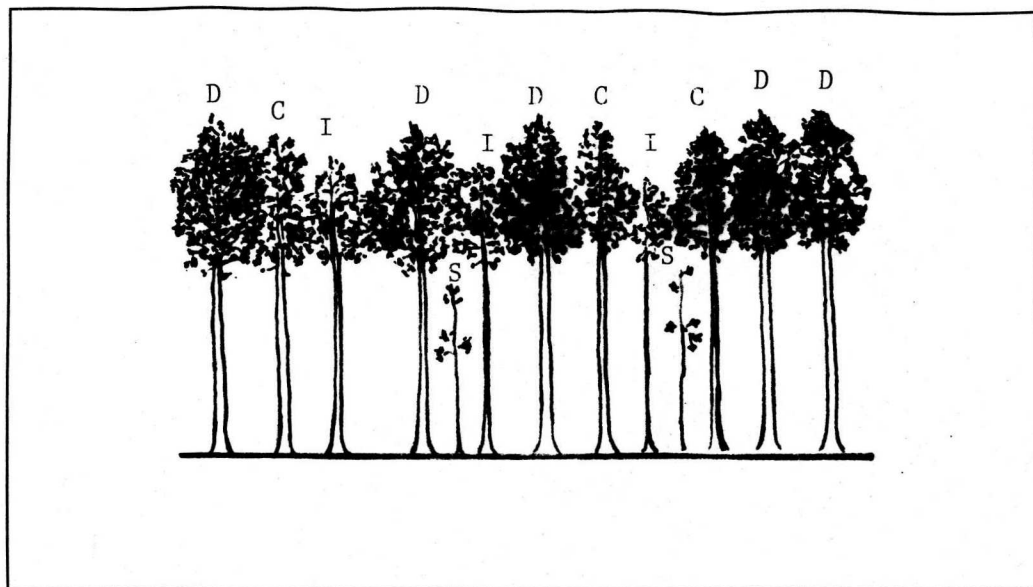


Figura 1. Diferenciación de clases de copa como respuesta a la competencia intraespecífica. D = dominante, C = codominante, I = intermedio y S = suprimido (Tomado de Spurr y Barnes, 1980).

Conforme la población continúa su desarrollo, los árboles suprimidos comienzan a morir. Este es el primer evento de la mortalidad inducida por la densidad y competencia (Spurr y Barnes, 1980; Long y Smith, 1984, citados por Rodríguez, 1987).

## 2.3. INTERACCION DENSIDAD-COMPETENCIA-CRECIMIENTO

### 2.3.1. GENERALIDADES

La densidad puede cuantificarse por una unidad de medición que se refiere a la presencia de árboles sobre un área determinada: número de árboles y volumen de los árboles o parte de ellos por unidad de superficie (Becerra, 1986).

La densidad de una comunidad o población determina directamente la demanda sobre uno o varios recursos, es decir, determina el nivel de competencia que puede existir entre dos o más organismos por sobrevivir. En la silvicultura ciertas características de crecimiento son propiciadas al regular la competencia mediante el control directo de la densidad: densidad de establecimiento, aclareos y podas (Oliver y Larson, 1990).

La densidad y , como efecto de ella, la competencia influyen en el crecimiento de un árbol a través de las dimensiones de la copa. Es decir, a densidades mayores, las copas de los árboles son más pequeñas y estrechas y sus troncos son más cilíndricos que aquéllos que se desarrollan al descubierto, cuyas copas de mayor longitud hacen que el tronco sea más cónico.

Los árboles que presentan dominancia apical definida son más eficientes a espaciamientos amplios, exhibiendo una copa claramente excurrente. En árboles con control apical débil los brotes compiten por la posición terminal y por espacios abiertos, creando árboles con hábitos de crecimiento decurrente.

En espaciamientos cerrados, los árboles crean sombra sobre brotes que están fuera del espacio abierto de la copa, haciéndolos débiles y provocando que el control apical sea adquirido por el lado de la copa que esté completamente expuesto a la luz.

Si un árbol es liberado la respuesta en su incremento será mayor tanto más confinado haya estado (hasta ciertos límites de edad y supresión), pues antes de la liberación crecía muy por debajo de su potencial.

Aparentemente, los árboles con copas largas usan el espacio de crecimiento ineficientemente porque sus ramas inferiores no aportan fotosintatos (Woodman, 1971; citado por Oliver y Larson, 1990) y su gran cantidad de cambium lleva a coeficientes de respiración altos (Sprugel, 1989; citado por Oliver y Larson, 1990). Los árboles pequeños que no ocupan mucho espacio de crecimiento no son eficientes porque su follaje no está en buena posición para recibir luz solar. Los rodales más productivos aclareados no se caracterizan necesariamente por una cierta cantidad de follaje, pero si por una distribución vertical eficiente del follaje en el dosel (O'Hara, 1989; citado por Oliver y Larson, 1990).

Los tiempos de cierre de copas y del decaimiento del crecimiento en diámetro pueden ser controlados a través del espaciamiento inicial de los árboles. Un espaciamiento cercano y regular puede llevar al manejador a ganar más volumen en menos tiempo en árboles jóvenes, delgados y pequeños.



Las altas densidades pueden resultar en pérdidas y daños por viento. Los árboles se vuelven delgados e inestables y la fuerza del tallo se reduce, esto provoca lesiones mecánicas que pueden llegar hasta el rompimiento de los tallos. El crecimiento en altura no está muy influenciado por la densidad dentro de los límites usuales; en cambio, el crecimiento en diámetro, tamaño de copa y desarrollo radicular disminuyen al aumentar la densidad, esto favorece un incremento en el número de árboles suprimidos que pueden dañarse fácilmente por vientos fuertes.

Sobrepasando los límites usuales de densidad, puede generalizarse que los niveles extremos de competencia disminuyen el crecimiento en altura, diámetro y volumen de la masa (Aguirre y Winter, 1990; Hawley y Smith, 1972; Evans, 1982).

Conforme se da el crecimiento aumenta la demanda de fotosintatos para mantener la respiración por lo que están menos disponibles para el crecimiento en diámetro. Es por ello que el crecimiento en diámetro refleja estrechamente el tamaño de copa y por ende el espaciamiento.

Como ya se ha indicado anteriormente, el crecimiento en altura es relativamente independiente del grado de espesura y de la cantidad de follaje excepto a espaciamientos muy pequeños. Esto se debe a que fisiológicamente el suministro de fotosintatos para el crecimiento en altura tiene prioridad sobre el crecimiento en diámetro. Algunas evidencias sugieren que los árboles bajan su crecimiento en altura a espaciamientos muy amplios, aunque otras evidencias no lo confirman (Evans, 1982), por ejemplo Biging y

Dobbertin (1992), demostraron que la competencia tiene un enorme impacto no sólo en el crecimiento del diámetro cuadrático, sino también en la altura, aún cuando los sitios estudiados no presentaban densidades extremas.

No obstante que los crecimientos en altura dentro de una especie son más constantes que el crecimiento en diámetro, éstos varían con la sombra, el vigor y la elevación sobre el fuste, así como entre individuos y sitios; tanto la sombra a los lados como por arriba puede reducir el crecimiento en altura. Lo anterior es más acentuado cuando se trata de árboles jóvenes.

El crecimiento en volumen decrece conforme el volumen de tejido respiratorio incrementa. La curva sigmoideal de crecimiento en volumen es común en el crecimiento de los árboles, sin embargo, su forma exacta varía mucho.

Eventualmente todos los árboles reducen el crecimiento en altura y expansión de copa aún cuando la fotosíntesis y el crecimiento en diámetro y volumen continúen.

En espaciamientos amplios, la diferenciación del rodal, con algunos árboles dominando a otros ocurre más despacio y el incremento en diámetro lleva a árboles más estables. Cuando el crecimiento en altura se reduce pero el del diámetro continúa, la altura dominante puede no ser un sustituto adecuado de la edad en la estimación de volúmenes de árbol y rodal.

Como puede verse, el efecto de la densidad no es el mismo sobre las diferentes variables del crecimiento, pero de manera general

se sabe que la altura no está muy influenciada por la variación en la densidad del sitio, a diferencia del diámetro pues este se incrementa al disminuir la densidad. La competencia afecta el crecimiento en diámetro a muy bajas densidades sobre todo en especies de rápido crecimiento e intolerantes a la sombra. Se ha visto que los sitios más densos tienen árboles dominantes y codominantes de la misma altura pero con menor diámetro que sitios menos densos, lo cual tiene gran impacto comercial sobre la producción en volumen por árbol individual. La densidad no influye en el área basal neta de la población o en el crecimiento en volumen por hectárea a menos que el vigor de los árboles se vea afectado (Spurr, 1952; citado por Rodríguez, 1987).

#### 2.3.1. EN PLANTACIONES

En una plantación los árboles interactúan unos con otros y compiten entre sí. El inicio de esta competencia intraespecífica depende de la velocidad de crecimiento de la especie y del espaciamiento inicial. Los espaciamientos amplios llevan a una pérdida en la producción de volumen total por hectárea, pero los individuos crecen más grandes pues tienen mayor capacidad de desarrollar y mantener copas grandes y su sistema radicular ocupa un gran volumen de tierra antes de que la competencia se inicie (Evans, 1982).

La densidad es el principal factor que puede manipular un silvicultor, pues a través de su manejo mediante aclareos se puede influir en el establecimiento de las especies durante el periodo

de regeneración, modificar la calidad de los fustes, la tasa de crecimiento en diámetro e incluso la producción en volumen (Clutter, et al., 1983).

La competencia se dá temprano con establecimientos de plantación cerrados y es tardía en espaciamientos amplios (Harvey, 1983; citado por Zobel et al., 1987). Las plantaciones forestales en zonas tropicales se iniciaron empleando altas densidades, pero por consideraciones empíricas y con base en la experiencia se tiende a incrementar el espaciamiento. Las primeras densidades para pinos y eucaliptos variaban entre 1700 y 6900 árboles por hectárea. Una densidad inicial alta rinde la máxima cantidad de madera en turnos cortos, pero después de cierto límite el volumen del rodal comienza a declinar (Zobel et al., 1987). El valor más alto de la madera se obtiene únicamente a densidades iniciales más bajas o a través de regímenes de aclareo apropiados.

La competencia por luz es muy importante para las especies demandadoras de luz. Esto explica el porqué más de un clon en una mezcla clonal lleva a rendir menos madera que un rodal monoclonal, a menos que en el primer caso todos los clones mantengan exactamente el mismo ritmo de crecimiento. Cuando un clon disminuye su ritmo de crecimiento, la competencia ejercida por el clon más fuerte llevará a la supresión del primero en el caso de una mezcla de dos clones. Por esto, la competencia de copas y la resultante variación en diámetro de fustes es muy importante (Zobel et al., 1987).

Los beneficios de crecimiento a baja densidad durante los primeros años es permanente. Los rodales originados a bajas densidades no alcanzan valores altura-diámetro tan altos como los dados en altas densidades, no importa cuánto se haya dejado sin aclarar. La tendencia en los valores altura-diámetro enfatiza la importancia general del espacio de crecimiento temprano en la vida del rodal (Evans, 1982).

Las actividades silvícolas de preparación de sitio y control de maleza en plantaciones de coníferas intentan proporcionar ventaja competitiva a las coníferas más productivas sobre las especies latifoliadas que de otra forma podrían competir (Oliver y Larson, 1990)

#### 2.4. INDICES DE COMPETENCIA

La competencia no es directamente medible en un punto dado en el tiempo. Como se ha mencionado, sus manifestaciones visibles y medibles son la reducción en el ritmo de crecimiento del árbol y el cambio en la distribución del crecimiento entre sus partes, comparados éstos con el potencial de crecimiento en ausencia de competencia.

Los índices de competencia (IC) buscan cuantificar el estrés competitivo (o capacidad competitiva) experimentada por un árbol particular, ocasionado por árboles adyacentes que parecen afectar el crecimiento del mismo. En la mayoría de los casos se utilizan para representar el efecto total de la competencia por recursos escasos (luz, agua, nutrientes y espacio de crecimiento) (Biging y Dobbertin, 1992).



Las relaciones entre el crecimiento y las medidas de densidad buscan expresar la ocupación y competencia de los árboles con base en características medibles como número de árboles, tamaño y a veces distribución (Curtis, 1970).

Como el potencial de crecimiento generalmente se desconoce, no es factible comparar en términos del tamaño total posible del árbol; lo que sí es viable es comparar dimensiones de copa o áreas ocupadas por árboles de diámetro o altura semejantes como expresiones de efectos acumulados de competencia (Curtis, 1970).

Existen dos condiciones estándar que explícita o implícitamente se usan como base para la mayoría de las medidas:

- a) Sin competencia, para árboles que crecen en espacios abiertos.
- b) Competencia máxima promedio, representada por el rodal normal.

Estas condiciones son aproximaciones a límites biológicos de densidad en un rodal sin hacer alusión al crecimiento óptimo del rodal o a objetivos de manejo.

Las medidas de densidad de rodal tales como número de árboles por hectárea, área basal por hectárea y el factor de competencia de copas (FCC) han sido consideradas para reflejar competencia. Sin embargo, esto no puede aplicarse en los modelos de simulación que buscan reflejar el efecto de la competencia sobre el crecimiento de árboles individuales (Curtis, 1970).

#### 2.4.1. EVOLUCION DE LOS INDICES DE COMPETENCIA

La primer medida del estrés competitivo de árboles individuales fue la de Staebler (1950) (Gerrard, 1969; citado por Daniels y Burkhardt, 1975). En ella se asume que la capacidad competitiva por todos los recursos puede ser representada con un círculo de influencia o competencia alrededor de cada árbol con radio

$$r = a + b \text{ (DN)}$$

donde:         $r$  = radio  
          $a$  y  $b$  = coeficientes de regresión  
         DN = diámetro normal

Staebler pensó que la competencia ejercida sobre un árbol es directamente proporcional al área de traslape de su círculo de competencia con aquél de sus vecinos. Sin embargo, debido a que el tiempo de cálculo manual del área de traslape fue mucho, asumió traslapes lineales y aplicó un grupo de factores ponderadores.

La mayoría de los índices de competencia se basan casi por completo en el trabajo de Staebler, con cambios en la definición del radio de competencia y en la medición del traslape de las copas. Como ejemplos se pueden citar a los siguientes:

Newnham (1964; citado por Daniels y Burkhardt, 1975), construyó su índice basando el radio de competencia en el radio de la copa y considerando los ángulos subyacentes al traslape de las copas.

Gerrard (1969) consideró el área de traslape, pero dividió la suma de las áreas sobrelapadas entre el área de competencia del

árbol para un índice al que llamó cociente competitivo (IC), tal que

$$0 \leq IC \leq 1$$

La fórmula es:

$$IC_i = (1/A_i) (\sum a_j)$$

Donde:

$IC_i$  = índice de competencia para el árbol i

$A_i$  = área del círculo de competencia para el árbol i

$a_j$  = área de traslape del j-ésimo competidor

(Daniels y Burkhardt, 1975; Clutter, et al., 1982).

Keister (1971) (citado por Daniels y Burkhardt, 1975), definió su radio de competencia de la siguiente forma

$$R = rc ( AT/ACV )$$

donde:      R = radio de competencia  
              rc = radio de copa  
              AT = altura total  
              ACV = altura a la base de la copa viva

Brown (1965; citado por Daniel y Burkhardt, 1975), introdujo un índice llamado Area Potencialmente Disponible (APA por sus siglas en inglés) que viene siendo el inverso del número de árboles por hectárea. El APA se calcula bisectando distancias entre árboles para formar un polígono de área disponible de crecimiento. Este índice fue modificado por Moore y Budelsky (1973; citados por Daniels y Burkhardt, 1975) quienes ponderaron la división de distancias por un coeficiente de las dimensiones de los árboles. Mitchell (1969), usó una técnica similar para modelar la expansión desigual de las copas (Daniels y Burkhardt, 1975).

El índice de espacio de crecimiento de Lin (1969; citado por Daniels y Burkhardt, 1975) se basa en el ángulo más grande extendido por un árbol en cada cuadrante alrededor de un árbol. Estos ángulos son ponderados y sumados por cuadrante para producir el índice de competencia con valores de 0 a 100 para cada árbol.

El índice de Hatch (1971; citado por Daniels y Burkhardt, 1975), considera la capacidad competitiva sólo en función de la luz y se basa en la proporción de superficie de copa viva expuesta a la luz directa por unidad de altura. Para este caso deben añadirse altitudes solares en la simulación del crecimiento de los árboles de un rodal. Hatch, Gerrard y Tappeiner (1975; citados por Daniels y Burkhardt, 1975) describieron una modificación a este índice en el cual la capacidad competitiva está dada por el radio del área basal del árbol elegido y de sus competidores.

Con el fin de disminuir el tiempo de cálculo y las dificultades en el mismo, Hegyi (1974) (citado por Daniels y Burkhardt, 1975) calculó la competencia entre los árboles a través del radio de sus diámetros dividido por su distancia de separación:

$$IC_i = \sum^n (D_j/D_i)/DIST_{ij}$$

Donde:

$IC_i$  = índice de competencia para el árbol i

$D_j/D_i$  = diámetro normal del competidor j expresada como una proporción del diámetro normal del árbol i

$DIST_{ij}$  = Distancia entre el árbol i y el competidor j

n = número de competidores

Algunos intentos para cuantificar la competencia en árboles individuales han sido adaptados de medidas de densidad del rodal. Spurr (1962; citado por Daniels y Burkhardt, 1975) ideó su punto de densidad como una extensión de la metodología del muestreo puntual aplicada de alguna medida del rodal (área basal) a árboles individuales.

El uso de índices de competencia en la predicción del crecimiento ha seguido tres vías:

1) Algunos autores consideraron que el incremento en diámetro es una función del crecimiento en diámetro de un árbol en condiciones abiertas reducido por competencia (Newnham, 1964; Lee, 1967 y Arney, 1972; citados por Daniels y Burkhardt, 1975).

2) Otros han usado el índice de competencia en ecuaciones de regresión junto con otras variables independientes para predecir incrementos en diámetro (Bella, 1971; Gerrard, 1969; Keister, 1971; Moore y Budelsky, 1973; citados por Daniels y Burkhardt, 1975). Este método proporciona estimaciones consistentes (por ejemplo en el coeficiente de determinación y errores estándar), los cuales son útiles en la estimación de predicciones de crecimiento, determinando la naturaleza de una variabilidad inexplorable y aplicando un componente aleatorio a tales predicciones de crecimiento.

3) La tercer vía es la empleada por Hatch (1971; citado por Daniels y Burkhardt, 1975) para generar estocásticamente el incremento en diámetro a partir de una distribución diamétrica, habiéndose utilizado para ello la distribución de Bertalanffy, con



parámetros expresados como una función del diámetro normal, de un índice de competencia y del índice de sitio.

No obstante lo anterior, Clutter, et al., (1983), señalan que existen reservas sobre la utilidad de las medidas de densidad puntual para la predicción del crecimiento de árboles individuales. Contrario a las observaciones de Daniels y Burkhardt (1975), considera que los modelos de crecimiento de árbol individual que usan densidad puntual como una variable de predicción frecuentemente no son más precisas en sus predicciones que en modelos similares en los que no se incluyen. Al respecto Stone (1974; citado por Clutter, et al., 1983) sugiere que considerando las diferencias de micrositio y la ramificación de las raíces podría aumentarse la capacidad predictiva de tales modelos.

Daniels y Burkhardt (1975), indican que la falla de un índice de competencia para predecir crecimiento de árboles individuales puede deberse más a alguna función del modelo elegido que al modelo de competencia en si.

#### 2.4.2. INDICES DE COMPETENCIA DEPENDIENTES DE LA DISTANCIA

Se han desarrollado dos tipos de índices de competencia, los dependientes e independientes de la distancia.

Los IC independientes de la distancia son insensibles a diferencias en el arreglo espacial de los árboles de una muestra. Los IC dependientes de la distancia requieren la ubicación de los árboles para su estimación. Los modelos que incluyen este tipo de IC

pueden ser sensitivos a diferencias en el arreglo espacial de los árboles de la muestra.

La implementación de los IC dependientes de la distancia requiere restricciones apropiadas sobre la distancia máxima dentro de la cual los árboles son incluidos como competidores de un árbol objetivo (Martin y Ek, 1984).

Las zonas de influencia definidas para cada árbol corresponden al radio de copa de un árbol de la misma altura en espacio abierto. Ek y Monserud (1974) incluyeron al árbol vecino como competidor si y sólo si su zona de influencia sobrelapaba a la del árbol objetivo (Martin y Ek, 1984). Hegyi (1974) incluyó a todos los árboles que estaban dentro de un radio de 3.05 m del árbol objetivo, mientras que Martin y Ek (1984) en la determinación de sus IC dependientes de la distancia incluyeron como competidor al árbol j si y sólo si

$$d_{ij} < (D_i + D_j)/8$$

donde  $d_{ij}$  = distancia en m,  $D_i$  y  $D_j$  = diámetros normales en cm y  $1/8$  = constante que produce aproximadamente el mismo número de competidores para un árbol objetivo que el ángulo de medición de  $2.3 \text{ m}^2/\text{ha}$  empleado por Daniels (1976).

De esta forma, los índices dependientes de la distancia se pueden dividir en tres grupos (Doyle, 1983; citado por Biging y Dobbertin, 1992):

1. Proporción de tamaños
2. Sobrelape de copas o zona de influencia
3. Espacio de crecimiento

Así como no se ha definido la tendencia general en la utilidad de los índice de competencia, también se ha indicado que no existe una diferencia definitiva entre los IC dependientes o independientes de la distancia (Lorimer, 1983; citado por Biging y Dobbertin, 1992; Martin y Ek, 1984).

En general podría decirse que los IC proporcionan mayor o menor información con formas matemáticas diferentes dependiendo de la especie. Aparentemente los IC tienen mayor importancia cuando se trata de especies intolerantes (Lorimer, 1983; Biging y Dobbertin, 1992).

En algunos estudios realizados por Martin y Ek (1984), se concluyó que los modelos empíricos con índices de competencia independientes de la distancia son más precisos para las proyecciones del crecimiento en diámetro en plantaciones manejadas, también se afirma que los modelos semi empíricos con un índice de competencia independiente de la distancia parecen ser más precisos para sitios no manejados y para extrapolar más allá del rango de datos. Mientras que Biging y Dobbertin (1992), encontraron que los IC dependientes de la distancia y en función de algunos parámetros de la copa superaron a los índices de competencia que no consideraron distancia entre los vecinos.

## 2.5. MODELOS DE SIMULACION.

"Un modelo matemático se define como una expresión matemática de la relación entre variables las cuales pueden ser explicadas lógicamente, mientras que un modelo biológico es una expresión adicional de una hipótesis lógica concerniente a los procesos de crecimiento biológico" (Acosta, 1991).

La ventaja de un modelo es la síntesis de la información; un buen modelo reúne los hechos relevantes acerca de un sistema y los relaciona (junto con el error) de una manera válida para la lógica científica. "Debido a que un modelo cuantifica las hipótesis que se encuentran dentro de él, también es un vehículo de escrutinio y prueba de las aseveraciones sobre el sistema" (Graham, et al., 1986).

Los modelos también tienen desventajas: generalmente predicen lo que el modelador pensó que el modelo podría predecir antes de construirlo, particularmente cuando se hacen supuestos sobre datos perdidos. Debe recordarse que son los datos los que verifican las hipótesis y no los modelos. Los modelos se construyen bajo ciertas bases que constituyen al mismo tiempo sus restricciones; así cada modelo debe ser aplicado e interpretado bajo los supuestos con los que fue construido.

Hay cierta tendencia para incluir en el modelo todo lo que se conoce acerca del fenómeno que se desea estudiar, ya sea porque los objetivos para construir un modelo no están bien definidos o porque el modelador desea una ecuación más crítica. Los peligros

de incluir toda la información disponible en un modelo son: el modelo tal vez nunca sea terminado porque siempre hay algo que añadir; estos modelos son difíciles de probar porque son muy largos y si se detectan errores es bastante laborioso determinar cuál parte del modelo los está produciendo. Es mejor que el tiempo que se dedica a crear modelos demasiado extensos se utilice en el levantamiento de datos o en la experimentación (Graham, et al., 1986).

Al paso del tiempo, los modelos han sido desarrollados de la siguiente manera (Ek, 1975; citado por Zepeda, 1990):

1. Funciones de crecimiento y metodologías tradicionales de construcción de tablas de rendimiento.
2. Ecuaciones diferenciales.
3. Procedimientos estocásticos.
4. Métodos distribucionales.
5. Modelos de simulación de árbol individual.

#### 2.5.1. MODELOS DE ARBOL INDIVIDUAL

Los modelos de árbol individual proporcionan directamente el incremento por árbol, la estimación del incremento bruto por unidad de área es dada indirectamente al sumar los volúmenes individuales y multiplicando por el factor apropiado de expansión. Estos modelos evalúan y proveen información detallada acerca de la dinámica y estructura del rodal (Aguirre, 1989; Zepeda, 1990).



Los modelos para árbol individual se subdividen en aquéllos que no incluyen información sobre la ubicación espacial del individuo dentro del arbolado y aquellos que sí la incluyen. Los primeros son conocidos como modelos independientes de la distancia y los segundos como modelos dependientes de la distancia.

Algunos modelos independientes de la distancia se basan en un vector de diámetros o de clases dentro del rodal, este modelo supone una correlación estrecha entre el árbol y el estatus competitivo del rodal. Estos modelos se usan en la simulación de producción e incremento de plantaciones coetáneas y monoespecíficas principalmente (Aguirre, 1989).

Los modelos pueden ser empíricos si su poder descriptivo se basa en las correlaciones observadas entre la variable dependiente y las independientes o predictoras, o semi-empírico si su poder descriptivo se deriva tanto de las correlaciones observadas como de suposiciones teóricas acerca del comportamiento biológico del crecimiento y rendimiento de los árboles individuales (Martin y Ek, 1984).

## 2.6. FUENTES DE DATOS

La evaluación del incremento de árboles debe considerar el cambio de dimensiones en función del paso del tiempo (árboles individuales y masas coetáneas) o el "paso" de los árboles a través de las diferentes categorías que constituyen una estructura diamétrica determinada (masas disetáneas), para ello se reconocen tres alternativas para estimar, proyectar o predecir el incremento de los árboles y la producción de las masas forestales (Zepeda, 1983):

1. A través de mediciones únicas con datos de cilindros de madera o análisis troncales (parcelas temporales únicas).
2. Empleando grupos independientes de mediciones (parcelas temporales sucesivas).
3. Utilizando árboles y parcelas permanentes de medición con identificación o no de los sujetos que la constituyen.

En aquellos estudios de crecimiento que se basan en parcelas permanentes de muestreo, la edad se usa como variable de predicción y las características de crecimiento como variables dependientes. La edad sin embargo, no es una variable aleatoria sino que representa una cantidad fija. Los modelos de crecimiento son útiles para obtener una visión dentro del proceso real de crecimiento del bosque y para dar una interpretación biológica significativa para todos o algunos de los parámetros del modelo.

En otros estudios de crecimiento la base de datos se deriva de parcelas de muestreo temporales. Los modelos de regresión múltiple son usados entonces para relacionar características del rodal

con la edad, el índice de sitio y la densidad del rodal, posiblemente con la inclusión de términos cuadráticos y lineales basados en el supuesto de que algunos de los regresores interactúan. Tales modelos son menos útiles para explicar los procesos de crecimiento; pero por la posibilidad de obtener los estimadores de mínima varianza para los parámetros del modelo y almacenar esta información, juegan un papel creciente en el manejo de información computarizada y la planeación forestal (Villiers y van Laar, 1986).

En la estimación del crecimiento e incremento de árboles individuales se usan métodos que incluyen registros anteriores (disecación y análisis troncal) y métodos que incluyen las remediciones de árboles muestra en periodos sucesivos.

#### 2.6.1. ANALISIS TRONCALES

Los análisis troncales proporcionan datos directos de incremento en el pasado de un árbol y ayudan a determinar con mayor precisión índices de sitio, turnos, tiempos de paso, coeficientes mórficos, tablas de producción, intervenciones silvícolas y planes de manejo forestal. A través de ellos se puede definir la capacidad natural del recurso forestal, su dinámica de desarrollo, su relación con el ambiente y la reacción a los estímulos naturales y de cultivo.

La metodología puede dividirse en tres fases (Productos Forestales de la Tarahumara, 1981; Zepeda, 1983):

1. De campo, en esta fase se seleccionan los árboles que cumplen criterios previamente definidos, se derriban y se obtienen secciones de madera transversales al fuste. La altura a la cual deben obtenerse las secciones es determinada por el investigador. El material se identifica y en libretas de campo se registran las características del entorno que interesen al estudio.
2. De captura, en este punto se identifican y contabilizan los anillos de crecimiento, se mide el diámetro de los mismos y se anotan los datos en hojas de registro. Para determinar la edad de la sección se utiliza la expresión:

$$E.S. = \left[ A. S. A. - A. S. I. + E \right]$$

donde: E.S. = edad de sección

A.S.A = número de anillos de la sección anterior

A.S.I = número de anillos de la sección de interés

E = edad de la sección anterior

3. De análisis, los datos se capturan y procesan en la computadora para posteriormente representar en forma gráfico-numérica las cuatro formas típicas de crecimiento (altura, diámetro, área basal y volumen).

Al emplear la técnica de los análisis troncales deben considerarse las siguientes limitaciones (Spurr, 1952, citado por Zepeda, 1983).

- a) Debido a que los análisis troncales evalúan el crecimiento del árbol en el pasado, una proyección del mismo al futuro no posee la seguridad de que los factores que controlan el creci-

miento influyan de la misma manera y con la misma intensidad que en el pasado.

- b) Como las observaciones se apoyan en la medición y conteo de los anillos pueden presentarse problemas por la ausencia de alguno de ellos durante uno o varios periodos de crecimiento del árbol o por su presencia múltiple.

## 2.7. CARACTERIZACION DE LA ESPECIE PINUS PATULA SCHL. ET CHAM.

### 2.7.1. TAXONOMIA Y DESCRIPCION

Esta especie pertenece al género Pinus, Sección Pinus, Subsección Oocarpae: "Hojas verticalmente caídas, 3-5 por fascículo, de 15 a 30 cm de largo. Conos sésiles, a menudo casi insertos en la rama, de 7-9 cm de largo, oblicuos, reflejados y puntiagudos, de color amarillo ocre o rojizos, lustrosos" (Zavala, 1990).

De acuerdo con Wormald (1975), el nombre taxonómico de la especie es Pinus patula Schiede y Deppe in Schlecht y Cham., describiéndola de la siguiente forma: "Árbol de 20 a 30 m de altura, ocasionalmente de 30 a 40 m. Fuste usualmente recto y cilíndrico. Ramas laterales verticiladas. La corteza de las ramas y de la parte superior del tallo es de color rojizo, un poco escamosa, áspera y fisurada en árboles viejos". Se señala que esta especie alcanza de 30 a 35 m de altura y de 50 a 90 cm de diámetro, cuyo fuste limpio puede ser de hasta 20 m. Las ramas son horizontales formando una copa redondeada y abierta.



Los mejores árboles tienen fustes cilíndricos y rectos, con dominancia apical hasta la edad de 30 años o más. Entre los defectos más comunes se citan árboles bifurcados, torcidos, curveados, inclinados, sinuosos y con abultamientos nodales (Wormald, 1975; Sáenz, 1991).

Algunos observadores (Look, 1950; citado por Wormald, 1975), reportaron que el hábito de ramas en México es irregular, mientras que en plantaciones exóticas las ramas nacen de verticilos regulares, con cuatro ramas por verticilo aunque llegan a tener hasta ocho. Posiblemente las observaciones reportadas para México fueron hechas dentro de bosques naturales y no sobre plantaciones, lo cierto es que con base en observaciones de la que escribe, la frecuencia de verticilos por año es también muy regular presentando de 2 hasta 6 verticilos.

"Las ramas de los árboles jóvenes de plantaciones exóticas comúnmente nacen en un ángulo por arriba de la horizontal. Paterson (1967) (citado por Wormald, 1975), estimó la media del ángulo en  $21.5^{\circ}$ , pero notó que el ángulo tiende a incrementarse hasta  $30^{\circ}$  hacia la punta" (Sáenz. 1991).

La forma y dimensiones de la copa son muy variables de acuerdo a las condiciones del sitio, principalmente la densidad, en las que se desarrolle el árbol.

De acuerdo con las apreciaciones de Vela (1980), Pinus patula se relaciona principalmente con Pinus greggii ya que ambas especies presentan una distribución fisiográfica muy semejante y a que morfológicamente tienen el cono oblicuo.

La madera temprana es casi blanca y la tardía es café pálido con numerosos canales resiníferos pequeños, aunque su contenido de resina es bajo (1 a 3% del peso total) (Wormald, 1975; Vela, 1980).

La longitud de fibra varía de 2 a 5 mm, con una media de 3.2 mm (Paterson, 1967; citado por Wormald, 1975).

Para la densidad de la madera se tienen varios valores. En los bosques naturales de México, se han estimado valores que oscilan entre  $0.47 \text{ g/cm}^3$  y  $0.48 \text{ gr/cm}^3$ , (Quiñones, 1974; citado por Sáenz, 1991). En las plantaciones de Angola, Kenia, Madagascar, Sudáfrica, Suazilandia, Tanzania y Uganda los valores encontrados van de  $0.369$  a  $0.609 \text{ gr/cm}^3$ , con una media de  $0.452 \text{ gr/cm}^3$  (Wormald, 1975).

Las semillas son color café oscuro a casi negras, muy pequeñas, cerca de 5 mm de largo, con un ala café de 17 mm de largo. El número de cotiledones va de 4 a 5, la mayoría de 5. El número de semillas por kilogramo es de 115,000 (Wormald, 1975).

## 2.7.2. DISTRIBUCION GEOGRAFICA

### 2.7.2.1. EN MEXICO

Ubicacion. Pinus patula se distribuye principalmente sobre la Sierra Madre Oriental (exposición noreste principalmente) en un rango que va desde los  $18^\circ$  (Teotitlán, Oax.) hasta los  $23^\circ 20'$  (Molango, Hgo.) latitud norte y entre los  $97^\circ$  y  $99^\circ 45'$  longitud

oeste. Se señala que el principal cinturón de su distribución se localiza en la pequeña región comprendida entre Honey, Pue. (20° N) y Molango, Hgo. (20° 50'), por lo que atraviesa las regiones de Huayacocotla, Ver. y Agua blanca, Hgo. La especie ha sido reportada para los Estados de Nuevo León, Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Oaxaca, Distrito Federal y Tlaxcala (Wormald, 1975, Perry, 1991) (Figura 2).

El rango altitudinal de la especie oscila entre los 1600 y 3000 msnm. Los principales bosques están entre los 2000 y 3000 msnm (Madrigal, 1967; Perry, 1991).

Clima. La especie se distribuye en sitios con climas C(fm), C(m), C(w2) y C(w2'') (de acuerdo con las modificaciones realizadas por García a la clasificación de Köppen, 1964). En donde prospera mejor es bajo el clima C(fm), templado subhúmedo con temperaturas del mes más frío entre -3 y 18 °C, precipitación del mes más seco mayor a 40 mm y lluvia invernal con respecto a la anual menor del 18%; y en el clima C(w2), templado subhúmedo con lluvias en verano (Vela, 1980; Wormald, 1975).

Dentro de la zona en que se distribuye principalmente se registran lluvias procedentes del Golfo de México, las cuales disminuyen marcadamente hacia el oeste. La precipitación anual oscila entre 1000 y 1500 mm concentrándose en verano. A la precipitación anual directa debe sumársele el efecto de la niebla, que parece muy importante, al punto que Vela (1980), observó que el límite inferior de la zona de niebla coincide con el límite inferior de Pinus patula.

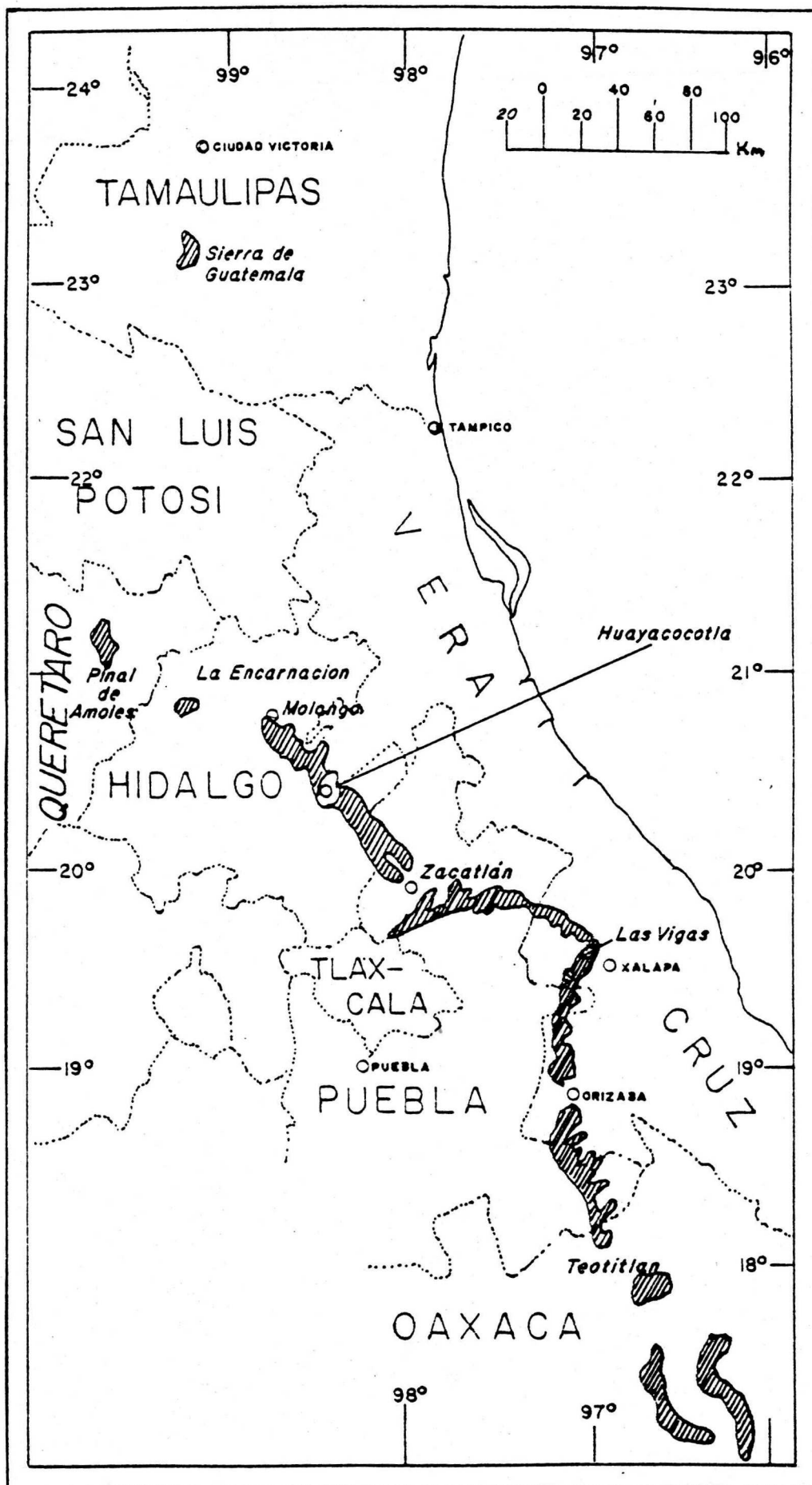


Figura 2. Mapa de distribución de la especie *Pinus Patula* (Wor-mald, 1975)

El invierno es relativamente corto y constituye la estación seca, aunque la falta de humedad es aminorada por algunas neblinas. En promedio se presentan 44.2 heladas entre los meses septiembre a mayo.

Las temperaturas medias anuales van de 10 a 16 °C; las medias del mes más frío de 7.6 a 12 °C, y las del mes más caliente entre 12.7 y 20 °C; máximas extremas de 26 °C (Jalancingo) a 38 °C (Zacualtipán), y mínimas extremas de 6 °C (Teziutlán) y -0.3 °C (Altotonga) (Wormald, 1975; Eguiluz, 1978; Vela, 1980; INEGI, 1987; Sáenz, 1989; citados por Sáenz, 1991).

#### 2.7.2.1.1. CARACTERISTICAS DEL AREA DE DISTRIBUCION

Pinus patula forma masas puras y densas, pero también se le encuentra mezclada con Pinus pseudostrobus, Pinus teocote, Pinus ayacahuite y Abies religiosa (Vela, 1980), además de Pinus maximoi, Pinus greggii, Pinus leiophylla, Pinus patula var. longepedunculata, Pinus montezumae y Quercus, sp (Perry, 1991).

Algunos de los bosques que forma no parecen ser clímax climático, pero se mantienen como tales por perturbaciones como incendios; el clímax climático podría ser un bosque de Quercus. En este sentido, se sugiere que la especie se comporta como colonizadora de áreas desprovistas de vegetación. Por ejemplo, se ha observado que la presencia de vegetación abundante ya sea arbórea, arbustiva o herbácea, impide o dificulta la regeneración natural (Vela, 1980; Mastache, 1988, citado por Sáenz, 1991); en cambio, los

incendios ligeros, al eliminar la hojarasca y al aumentar la dehiscencia de los conos en el suelo, ayudan a la regeneración natural (Vela, 1980; Sáenz, 1991).

Pinus patula se presenta tanto en terrenos planos como muy accidentados. Debido a que se distribuye naturalmente donde se reciben los vientos húmedos del Golfo de México, esta especie se asocia a los tipos de vegetación de Bosque de Neblina y Bosque Siempre Verde de la clasificación de Rzedowsky (1978).

Los suelos de los bosques naturales de la especie son de profundos a moderadamente profundos, cafés en capas superficiales tendiendo a amarillo y rojo hacia los horizontes profundos. Su textura es franco migajoso dentro del horizonte A y arcillosa en las partes más profundas; presentan escaso contenido de rocas y gravas. Estos suelos son generalmente ácidos y con mayor contenido de materia orgánica y nitrógeno que el resto de los suelos de coníferas estudiadas en México (Vela, 1980).

La intensidad de la luz de acuerdo con la latitud en la que se encuentran los bosques de Pinus patula corresponde a una iluminación diaria de 10.9 a 13.3 horas recibiendo entre 610 y 934 cal/cm<sup>2</sup>/día, con los valores más bajos el 31 de diciembre y los más altos el 31 de junio (Vela, 1980). Debido a que Pinus patula crece en zonas de niebla, con frecuencia sólo recibe 1/3 de la luz total emitida por el sol, esta disminución de la intensidad lumínica (de acuerdo con Vela y Hernández, 1968) contribuye favorablemente al incremento en altura de la especie.



En muchas ocasiones puede parecer contradictorio que se encuentre a la especie en suelos delgados o a altitudes que sobrepasan los extremos citados, sin embargo, la humedad es un factor al parecer determinante en su distribución. Así, mientras que en la vertiente Este de la Sierra Madre Oriental puede verse sustituida por Pinus rudis, Pinus teocote o Pinus pseudostrobus a causa de que la humedad disminuya (no obstante haya suelos profundos) en la vertiente Oeste de la misma cadena montañosa puede aparecer si por algún capricho del relieve se forman barrancas o laderas que acumulen humedad, inclusive si los suelos son delgados.

#### 2.7.2.2. EN OTROS PAISES

De los pinos nativos de México y el Caribe, Pinus patula es el que más se ha utilizado a elevadas altitudes en países tropicales y subtropicales. Su éxito ha sido tal que las plantaciones de pinos exóticos como Pinus patula están ganando terreno a los bosques naturales, suprimiendo especies nativas de gran valor botánico (Zobel et al., 1987; citado por Sáenz, 1991).

Pinus patula fue introducida por primera vez en Nueva Zelanda en 1877 sin registro de procedencia, hasta ahora se ha especulado sobre tres lugares: Las Vigas, Ver., Los Reyes, Hgo. y el Norte de Oaxaca. Posteriormente, la especie fue llevada a diferentes países como Sudáfrica (1907), Australia (1915), Rodesia (1920), Malawi (1923), Kenia y Tanzania (1926), India (1930), Angola (1942), Suazilandia (1947) y Brasil (1957), entre otros (Wormald, 1975). Perry (1991) indica que la primera plantación fue establecida en Tokai, Sudáfrica, en 1907).

La introducción de la especie a África ha resultado en la adaptación de la misma a un área geográfica más amplia. Actualmente crece desde el ecuador hasta 31° Sur de África y hasta 42° latitud Sur en Nueva Zelanda, en países como Madagascar, Sudáfrica, India, Kenia, Nueva Guinea, etc., (Wormald, 1975).

En el Cuadro 1 se presenta el porcentaje que ocupa Pinus patula dentro de la superficie destinada a plantaciones forestales en diferentes países.

**Cuadro 1.** Porcentaje de ocupación de Pinus patula en las plantaciones de diferentes países (Wormald, 1975).

PAIS	SUPERFICIE OCUPADA (%)
Angola	60
Rodesia	74
Madagascar	60
Kenia	33
Malawi	76
Uganda	37
Australia	< 5
Suazilandia	80

#### 2.7.2.2.1. CARACTERISTICAS DE LAS AREAS PLANTADAS

Al igual que en la República Mexicana, Pinus patula crece mejor en lugares donde las lluvias son más frecuentes en verano. Sin embargo y aún cuando exista el régimen de precipitación adecuado, no crece satisfactoriamente en lugares donde la sequía es muy severa. Al parecer el crecimiento de la especie se retarda cuando la temperatura es tan baja como -10 °C, a esta temperatura la

especie entra en latencia. Por debajo de los 30° de latitud, Pinus patula crece adecuadamente sin que las bajas temperaturas que se registran en algunos lugares sean un factor limitante. Los suelos favorables son los ácidos, húmedos y profundos (Wormald, 1975)

### 2.7.3. DATOS SOBRE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

#### 2.7.3.1. EN BOSQUE NATURAL

La variación intraespecífica en el crecimiento de Pinus patula es muy grande. Algunos datos sobre ello pueden derivarse de los estudios realizados para determinar el índice de sitio de la especie en diferentes localidades de México; con este fin Castaños (1962) registró alturas que variaban de 26 a 42 m en árboles con diámetro normal de 60 cm en Oaxaca. En Cofre de Perote, Aguirre (1984) reportó una variación entre 16 y 32 m de altura a una edad base de 25 años; Arteaga (1985) trabajó con árboles cuya altura variaba entre 15 y 31 m a la edad de 35 años, en la zona de Zacatlán, Pue.; finalmente, Monroy (1989) abarcó un rango de alturas entre 18 y 39 m a la edad de 40 años en la zona de Huayacocotla, Ver. En el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos por Vela (1980) en los estado de Hidalgo, Puebla y Veracruz.

**Cuadro 2.** Crecimiento de árboles de Pinus patula en diferentes localidades de su distribución natural (Vela, 1980).

LUGAR	EDAD (años)	ALTURA (m)	DN (cm)
Encarnación, Hgo.	18	21	29
	19	19	20
	20	18	23
	24	20	29
	27	22	25
Honey, Pue.	17	12	14
	19	13	14
	19	15	25
	22	17	28
La Joya, Ver.	40	11	30
	54	15	22
	55	15	37
	57	15	35
	76	15	27

#### 2.7.3.2. EN PLANTACIONES

El crecimiento de Pinus patula ha sido estudiado principalmente en los países interesados en explotar sus excelentes rendimientos. Wormald (1975), indica que el crecimiento de la especie como plantación exótica ha superado el reportado para México en condiciones naturales. Ello se atribuye a que las nuevas condiciones a las que se ha adaptado han permitido la manifestación de características genéticas latentes, provechosas al hombre.

En México, la mayor parte de las plantaciones de Pinus patula que han sido evaluadas fueron establecidas con fines de repoblación, protección o recreación pero no comerciales, es por ello que muchas de ellas son multiespecíficas y de densidad variable.

El Cuadro 3 compila datos sobre el crecimiento de la especie en plantaciones de diferente edad, indicando (si fue reportada) la densidad del establecimiento.

**Cuadro 3.** Crecimiento de árboles de Pinus patula registrado en plantaciones de diferentes países.

PAIS	EDAD (años)	ALTURA (m)	DN (cm)	DENSIDAD (árb/ha)
México	2 (1)	1.5	3.3	2500
	3 (1)	2.7	6.2	2500
	16 (2)	14.2	.	2500
	17	12.0	14.0	.
	18 (3)	.	21.0	.
	19	13.0	14.0	.
	19	15.0	25.0	.
	20 (4)	12.0	35.0	1750
	22	17.0	28.0	.
	25	23.0	.	.
	30	30.0	.	.
	50	35.0	35.0	.
Madagascar	13	18.0-20.0	60.0	.
	16	22.0-24.0	75.0	.
Zaire	13	28.0	22.9	.
Nueva Zelanda	42	31.7	43.9	270
India	11	10.4	19.3	.
	21	21.0	27.3	.
	30	22.0	40.0	.
-----				
(1) Sáenz, 1991; (2) Flores, 1986; (3) Valenzuela, 1980; (4) Carreño, 1973. Los datos restantes fueron obtenidos de Wormald (1975).				

Como se observa en el Cuadro 3, la variabilidad en altura y diámetro normal alcanzados es muy alta, esto se debe principalmente a las diferencias en la calidad de estación de los diferentes lugares y al manejo de la densidad. Wormald (1975), menciona

que en los mejores sitios de Tanzania, donde la precipitación es muy elevada, el rendimiento anual en volumen es de  $40 \text{ m}^3/\text{Ha}$ .

Debido a que Pinus patula es una especie intolerante, la competencia por luz es un factor muy importante en su crecimiento. Evans (1976), encontró que la competencia intraespecífica en plantaciones de esta especie, establecidas a  $2.7 \times 2.7 \text{ m}$ , se presentaba entre los 5 y 6 años de edad cuando los árboles alcanzaban una altura aproximada de 7 m. Como se ha señalado, la influencia de la competencia sobre el crecimiento puede darse tan pronto como ésta se inicie o bien, un tiempo después.

Actualmente los espaciamientos para las plantaciones de Pinus patula en el extranjero van de 2.4 a 2.75 m, estos espaciamientos son muy pequeños considerando la rapidez con la que la especie cubre el espacio. Sin embargo, ello obedece a razones económicas. Donde no existe mercado para los productos del primer aclareo, donde la cubierta está constituida por pastos cortos o donde el cultivo mecánico es posible, y donde la mano de obra es cara y las plantaciones inaccesibles, es mejor un espaciamiento amplio tanto como de 3.5 m ( $815 \text{ árb/ha}$ ). De manera general, es conveniente incrementar el espaciamiento en circunstancias desfavorables para mejorar el crecimiento y la uniformidad de la plantación, (Evans, 1984).

En México, la mayor parte de las plantaciones están establecidas a  $2.0 \times 2.0 \text{ m}$ , sin importar si la calidad de sitio es buena o mala. Esto y los pocos cuidados silvícolas que se les proporcionan llevan a una baja en la tasa de crecimiento de las plantaciones. La razón principal de la falta de atención en el desarrollo



de las plantaciones de México es que en la mayoría de ellas no se pretende obtener beneficios económicos.

En un estudio realizado por Aguirre y Winter (1990), en el que compararon el crecimiento de Pinus patula en rodales naturales con el crecimiento registrado en plantaciones de Sudáfrica, se comenta que a excepción del crecimiento en área basal, las diferencias del crecimiento y rendimiento en altura y diámetro normal son significativas; señalan además que el crecimiento de la especie en México podría mejorarse significativamente si hubiese un control oportuno de la densidad inicial del rodal y que si bien el potencial de los rodales naturales estaba subutilizado podría considerarse la experiencia obtenida en las plantaciones de Sudáfrica como una guía preliminar para diseñar estrategias de manejo silvícola más eficientes.

#### 2.7.4. USOS E IMPORTANCIA ECONOMICA

Pinus patula es una especie que debe su importancia a su vigor, crecimiento, forma, resistencia a patógenos, tolerancia edáfica y calidad maderable (Arteaga, 1985). Debido a que su madera es limpia y de color claro, a que tiene bajo contenido de resina y de madera de corazón y a que tiene mayor longitud de traqueidas (44-47 mm), es muy utilizada como material celulósico (Vela, 1980).

#### 2.7.4.1. EN MEXICO

A pesar de que los bosques de esta especie se distribuyen en un área pequeña, es la que mayor volumen aporta a los aserraderos locales, entre ellos puede citarse una importante industria maderera establecida en la región de Zacatlán-Chignahuapan, Pue. y dos más que se encuentran en el Municipio de Huayacocotla, Ver., que proporcionan trabajo a gran parte de la población.

La madera se utiliza en la elaboración de postes, tablas, polines, cimbras, cajas de empaque, contenedores para productos de exportación, duela, muebles y construcciones ligeras. Ocasionalmente se venden trozas de cortas dimensiones a algunas fábricas de celulosa y papel, como la de Tuxtepec, Oax. (Wormald, 1975; Sáenz, 1991).

#### 2.7.4.2. EN OTROS PAISES

La principal finalidad de las plantaciones de Pinus patula en el extranjero es la de producir material celulósico. Wormald (1975), señala que la madera es demasiado blanda para la fabricación de muebles a menos que se use en piezas pequeñas y delgadas que se terminen con un acabado resistente; indica que puede usarse para fines decorativos y como paneles pues tiene una apariencia atractiva por el color contrastante entre las maderas temprana y tardía. La madera también es utilizada en la fabricación de techos, cajas de empaque, tablones para la construcción, duela, etc.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

##### 3.1.1. UBICACION

Las plantaciones incluidas en esta investigación se encuentran en la región de Huayacocotla, Ver., en la Sierra Madre Oriental. Se ubican entre las coordenadas geográficas 20° 23' y 20° 32' latitud Norte y entre los 98° 23' y 98° 34' longitud Oeste (Figura 3). Huayacocotla forma parte de la Huasteca Veracruzana y limita con el Estado de Hidalgo en sus fronteras Sur, Este y Oeste.

##### 3.1.2. OROGRAFIA

La región presenta un relieve irregular, profundamente quebrado, con anticlinales y sinclinales formando grandes cañadas y, entre ellas, pequeños y angostos valles. Sus laderas son escarpadas con pendientes que van desde 5 hasta más del 60%. La altitud sobre el nivel del mar oscila entre los 950 m en el río Vinazco y 2270 m en el Cerro del Corcovado. La orientación general de los principales macizos montañosos es NNO - SSE.

##### 3.1.3. GEOLOGIA

Huayacocotla está ubicada dentro de la provincia geológica VI Noreste de México (Ramírez y Palma, 1980). Sus afloramientos corresponden a la formación Huayacocotla constituida por capas de arenisca, conglomerados y pocas lentes de calizas. Debido a la inestable historia de la región su geología es muy compleja (Dewey, 1972; Pedrazzini y Basañez, 1978; citados por Ramírez y Palma, 1980).

**BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH.**

#### 3.1.4. HIDROLOGIA

El área está en la cuenca alta del río Tuxpan, casi en el límite del parteaguas y pertenece a la región hidrológica Pánuco - Tuxpan.

Debido a las altas precipitaciones y a los numerosos manantiales se forman muchas corrientes intermitentes y varias constantes. Las aguas subterráneas son abundantes y afloran durante la época de lluvias, muchas de ellas fluyen a lo largo del año y forman arroyos tributarios de los ríos Vinazco y Hormigueros que son afluentes del Río Tuxpan (Ramírez y Palma, 1980).

#### 3.1.5. CLIMA

Según la clasificación de Köppen modificada por García (1964), los climas de la zona corresponden al grupo C: templados húmedos, con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C y la del mes más caliente mayor a 16.5 °C con verano fresco y largo y nieblas frecuentes (Ramírez y Palma, 1980).

#### 3.1.6. VEGETACION

Debido a lo accidentado de su superficie, Huayacocotla cuenta con una gran variedad de coníferas y latifoliadas, la Comisión Nacional Forestal (1988) reporta 30 mil ha de pino y 40 mil ha de latifoliadas en un área agropecuaria-forestal de 188 mil ha. Entre las especies presentes se encuentran Pinus patula, Pinus ayacahuite, Pinus cembroides, Pinus pseudostrobus, Pinus rudis, Cupressus sp., Abies religiosa, Pseudotsuga sp., Alnus sp., y Quercus spp.

### 3.2. LAS PLANTACIONES CONSIDERADAS

#### 3.2.1. SELECCION DE PLANTACIONES

Para seleccionar las plantaciones se hizo un reconocimiento de las establecidas en los 11 ejidos de la región. En 40 de ellas se obtuvo información sobre localización, altitud, pendiente, orientación, espaciamiento de plantación, edad, vegetación original y observaciones del suelo. Tal información se condensó en hojas de registro y actualmente forman parte del archivo de la Dirección Técnica de la Unidad de Producción Ejidal Adalberto Tejeda.

De las 40 plantaciones visitadas se escogieron 15 con el fin de incluir las que mostraran las mejores características de crecimiento de la especie. Los criterios utilizados en la selección fueron:

- a) Encontrarse dentro del área de distribución natural de la especie.
- b) No presentar evidencia de daños por plagas, enfermedades o acciones mecánicas.
- c) Presentar un espaciamiento de plantación regular.
- d) Ausencia de regeneración natural que se confundiera con los árboles plantados.
- e) Cubrir, con las plantaciones seleccionadas, un rango de edades amplio.

En la Figura 3 se señala la ubicación de las plantaciones seleccionadas.

### 3.2.2. PARTICULARIDADES DE LAS PLANTACIONES

En los Cuadros 4, 5 y 6 se indican las características generales de las plantaciones seleccionadas para este estudio, de los mismos se resume que las plantaciones seleccionadas cubren un rango de 2 a 15 años de edad y que el espaciamiento de las 13 primeras es de 2 x 2 m.

Las plantaciones 14 y 15 fueron incluídas porque no sólo cubrían los criterios de selección, sino porque además presentaban condiciones de densidad muy diferentes a las plantaciones restantes lo que permitió comparar el crecimiento entre ellas.

La plantación 14 se originó de una población de plántulas que una vez transplantadas a bolsas de polietileno nunca fueron removidas del vivero. Debido a que las bolsas aún son visibles fue posible inferir que los individuos habían sido ordenados en grupos de 15 x 100 bolsas, ocupando un área de 1.20 x 8.40 m, de estos grupos se excluyeron los extremos del área para evitar la inclusión de los individuos que recibían mayor o menor luz (por el efecto de la sombra de otros árboles) que el promedio de la población; la superficie resultante es de 70 m<sup>2</sup>.

La plantación 15 fue establecida a 4 x 4 m en una superficie de 864 m<sup>2</sup> y se incluyeron a todos los individuos.



**Cuadro 4.** Plantaciones incluidas. Edad y clave asignada

EJIDO	PARAJE	EDAD	CLAVE
Arroyo Prieto	Las estacas	2	APRESTA
	Lote 24	2	APRLODC
	Lote 22	4	APRLODD
Viborillas-Ojo de Agua	Pozo de Ojo de agua	3	VOAPOAG
Ampliación Canalejas de Otates	El encino (1)	6	ACOENUN
	El encino (2)	6	ACOENDO
	Las agujas	7	ACOAGUJ
	La joya	11	ACOTZJO
Naranjo	Naranjo	8	NARANJO
Tejocotes	La mina	8	TEJOCOT
Tzocohuite	La joya del toronjil	11	ACOJOTO
La Selva	Tejocotes *	11	SELTEJO
San José Acantilado	Vinazco	11	SJAVINA
Palo Bendito	Camas de vivero abandonadas	14	PABECAB
	Vivero (4 x 4 m)	15	PABECPC
-----			
(*) Este paraje también es conocido como "El mirador"			

**Cuadro 5. Datos fisiográficos de las plantaciones**

CLAVE	ASNM	EXPOSICION (rumbo)	PENDIENTE (grados)	SUELO	PEDREGOSIDAD	CONDICION ORIGINAL
APRESTA	2200	50 SO	10	Profundo	Nula	Bosque Patula-Encino
APRLODC	2300	15 NE	9	Profundo	Nula	Bosque Patula-Encino
VOAPOAG	2350	54 NE	5	Profundo	Nula	Bosque Patula-Encino
APRLODD	2200	25 SO	8	Profundo	Nula	Bosque Patula-Encino
ACOENUN	2150	S	4	Mediano	Moderada	Bosque Patula-Encino - Oyamel
ACOENDO	2150	7 SO	12	Profundo	Moderada	Bosque Patula-Encino - Oyamel
ACOAGUJ	2500	S	15	Profundo	Nula	Area de cultivo
NARANJO	2480	SE	18	Profundo	Moderada	Bosque Pino-Encino
TEJOCOT	2500	SO	4	Mediano	Moderada	Bosque Pino-Encino
ACOTZJO	2500	10 NO	5	Mediano	Nula	Bosque Patula-Encino -Ayacahuite
ACOTZJO	2500			Mediano	Nula	Bosque Patula-Encino -Ayacahuite
SELTEJO	2285	NE	17	Delgado	Abundante	Bosque Patula-Encino -Ayle
SJAVINA	2330	SE	15	Profundo	Nula	Bosque de Encino
PABECAB	2400			Profundo	Nula	Llano
PABECPC	2400	SO	3	Profundo	Nula	Llano

---

Nota 1: Las cifras omitidas indican terrenos planos  
 Nota 2: Pino se refiere a mezcla de especies del género Pinus

Cuadro 6. Datos dasométricos de las plantaciones

CLAVE	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	ARBOLES (#)	ARBOLES (#/ha)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	DNP (cm)	AP (m)	DND (cm)	AD (m)
APRESTA	900	134	1489	.	.	0.9	.	2.2
APRLODC	900	175	1944	.	.	0.7	.	1.2
VOAPOAG	900	117	1300	0.11	0.7	1.3	1.7	2.0
APRLODD	900	140	1555	0.19	3.0	2.8	4.3	3.9
ACOENUN	900	232	2578	5.48	4.7	4.2	6.5	5.7
ACOENDO	900	181	2011	7.99	6.5	5.5	8.7	7.1
ACOAGUJ	895	243	2715	25.44	10.2	7.2	15.2	10.9
NARANJO	900	219	2433	19.85	9.8	8.1	12.6	10.4
TEJOCOT	900	196	2177	19.82	10.4	7.4	13.9	9.8
ACOTZJO	900	200	2223	23.79	11.1	8.4	15.7	11.4
ACOJOTO	900	207	2300	27.09	11.7	8.9	16.5	11.7
SELTEJO	900	126	1400	30.16	16.1	11.3	19.3	14.3
SJAVINA	1000	196	1960	28.76	13.0	10.7	17.8	14.3
PABECAB	70.5	149	21117	65.08	6.3	9.2	9.6	11.7
PABECPC	864	87	949	40.27	22.7	12.8	29.4	16.5
<hr/>								
AB = área basal		DNP = diámetro normal promedio			AP = altura promedio			
DND = diámetro normal dominante				AD = altura dominante				

### 3.3. MEDICIONES DE CAMPO

#### 3.3.1. ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS DE MUESTREO

En cada una de las 13 plantaciones seleccionadas con espaciamiento de 2 x 2 m, se trazaron tres parcelas rectangulares de 300 m<sup>2</sup> (15 x 20 m) y se enumeraron de manera consecutiva los individuos que estaban incluidos en cada una de ellas. También se indicó el número de la parcela correspondiente. Para definir el árbol que sería identificado con el número 1 y por lo tanto el punto de partida para realizar las mediciones, no se siguió un criterio fijo pues la ubicación de las parcelas y su orientación dependió de la extensión y de la irregularidad del trazo de la plantación; sin embargo, cada árbol fue marcado con el número correspondiente usando pintura vinílica.

Con respecto a la regeneración natural, sólo se incluyeron árboles con altura igual o mayor que la altura promedio de la plantación. Estos individuos fueron señalados con una línea perpendicular al fuste para, en su momento, registrar las variables indicadas de manera especial dentro del Cuadro 7 y que son sólo algunas de la totalidad de variables consideradas en la medición de los árboles de la plantación.

Como ya se mencionó antes, las dos plantaciones restantes fueron consideradas en su totalidad debido a que una de ellas, de 14 años de edad, se desarrolló en camas de crecimiento abandonadas, mientras que la segunda, de 15 años de edad, corresponde a una plantación establecida a 4 x 4 m.

### 3.3.2. LEVANTAMIENTO DE DATOS

Se obtuvo información de tres fuentes:

a) Información sobre el arbolado.

Se obtuvo información de cada uno de los individuos que integran cada parcela. Ello se realizó entre los meses de Noviembre de 1991 y Febrero de 1992. La información registrada en libretas de campo se especifica en el Cuadro 7.

**CUADRO 7.** Variables medidas en las parcelas de muestreo

MEDICION	SIMBOLO	OBSERVACIONES
A. Sobre el arbolado		
NUMERO DE ARBOL*	N	La numeración de los árboles de la plantación inició con el uno y la correspondiente a los individuos de regeneración natural con el número 200.
POSICION SILIVICOLA	D,C,I,S	El símbolo corresponde a la primera letra de las categorías Dominante, Codominante, Intermedio y Suprimido.
CIRCUNFERENCIA NORMAL*	CN	Registrada en centímetros y aproximada a milímetros. Tomada a 1.3 m de altura.
CIRCUNFERENCIA DEL CUELLO	CC	Registrada en centímetros y aproximada a milímetros. Tomada al nivel del suelo.

Continúa ...

Cuadro 7. Variables medidas .... (continuación).

ALTURA TOTAL*	ALT	Registrada en metros con aproximación a centímetros.
DIAMETRO DE COPA MAXIMO*	DCM	Registrado en metros con aproximación a centímetros
DIAMETRO DE COPA PERPENDICULAR*	DCP	Perpendicular al DCM, registrado en metros con aproximación a centímetros
GROSOR DE CORTEZA	GC	Aproximado a décimas de pulgada.
LONGITUD DE COPA EXPUESTA	LCE	Largo de copa libre del contacto con el ramaje de árboles vecinos y expuesta a la luz solar. Registrada en metros
ALTURA DE FUSTE LIMPIO	AFL	Considerado desde la base del fuste hasta justo antes de la primera rama viva. Registrada en metros.
DISTANCIA AL SIGUIENTE ARBOL*	D	Medida en metros, el siguiente árbol fue el correspondiente al número consecutivo inmediato
RUMBO AL SIGUIENTE ARBOL*	R	Registrado en grados de circunferencia con una brújula Brunton.
B. Variables creadas		
DIAMETRO NORMAL*	DN	Obtenido del cociente: $CN/3.1416$
DIAMETRO PROMEDIO DE COPA*	CM	Promedio aritmético del DCM y DCP

Continúa ...



Cuadro 7. Variables medidas .... (continuación).

LONGITUD MAXIMA DE COPA	LCM	Obtenida de la diferencia: ( ALT - AFL )
INDICE DE COMPETENCIA	IC	Obtenida del cociente: ( ALT / AFL )
AREA PROMEDIO DE COPA*	ACM	Cálculo del área de un círculo con diámetro igual al diámetro promedio de copa registrado en cada parcela.
AREA BASAL POR HECTAREA*	AB	Calculado con la fórmula: $AB = 0.7854 \cdot DN^2$ para cada árbol, acumulada para cada parcela y proyectada a hectárea
RELACION AREA-ARBOLES*	RAA	Obtenida de sumar el área de las copas de los árboles de una parcela y dividirla entre la superficie que ocupa tal parcela.
ALTURA DOMINANTE PROMEDIO	ADP	Altura promedio de los cinco árboles más altos de cada parcela.
DIAMETRO DOMINANTE PROMEDIO	DND	Diámetro promedio de los cinco árboles más altos por parcela.
VIGOR	VI	Definido por la relación aritmética: ( LCM / ALT )
AREA FOLIAR	AF	Definida como la superficie de un cono (m <sup>2</sup> ).
-----		
(*).- Sólo estas variables fueron consideradas para los árboles de regeneración natural presentes en las parcelas.		

A continuación se hacen algunas observaciones sobre ciertas variables incluídas en el Cuadro 7:

Posición silvícola.- Se consideraron las siguientes categorías silvícolas:

- Dominante, árbol cuya altura sobrepasa el promedio de la población.
- Codominante, árbol que forma parte del dosel de altura promedio de la población y que porta características tan buenas como los árboles dominantes.
- Intermedio, árbol cuya altura es ligeramente inferior a la del promedio. Son árboles generalmente delgados en fuste y de copas estrechas.
- Suprimido, árbol cuya altura está muy por debajo del promedio de la población. Estos árboles se distinguen por su aspecto poco vigoroso y copas poco desarrolladas.

Altura total.- En la medición de esta variable se utilizaron un "metro", varas graduadas y un clinómetro marca Suunto. La selección entre estos instrumento dependió de la altura y espesura de la plantación.

Diámetros de copa.- Esta medición se realizó con dos personas, cada una sujetaba un extremo de la cinta métrica y ubicaban aquél diámetro de copa que fuese mayor, el dato se registraba como diámetro máximo de copa. Después se midió el diámetro perpendicular al tomado inicialmente y se anotó como diámetro perpendicular de copa.

Longitud de copa expuesta.- Su longitud fue determinada en metros, con la ayuda de las varas graduadas utilizadas para obtener la altura y con un clinómetro si el caso lo requería.

Grosor de corteza.- Fue determinado con un medidor de corteza graduado en pulgadas con aproximaciones a décimas de pulgada. El medidor es marca JIM GEM (Jackson Miss).

Distancia y rumbo al árbol más cercano.- Fueron registrados de acuerdo con la numeración. Para el caso de los individuos de regeneración natural se consideró su proximidad con los árboles de la plantación. Cuando se notaba que las distancias variaban por escasos centímetros se registraba una distancia común a todos los individuos de la muestra.

Superficie foliar.- Para su cálculo se consideró la fórmula empleada por Sarukhán y Franco (1981), la cual proporciona la superficie lateral de un cono. Su expresión es la siguiente:

$$AF = \pi \cdot r \cdot \sqrt{(a^2 + r^2)}$$

donde AF= superficie foliar de un árbol (m<sup>2</sup>)

π= 3.1415927

r= radio de copa (m)

a= longitud de la copa (m)

b) Información de árboles particulares.

Estas mediciones se realizaron de Marzo a Abril de 1992, cubriendo las actividades que a continuación se describen.

Considerando sólo las once plantaciones con edad mayor a los cinco años, en cada parcela se seleccionó un representante por

posición silvícola para su derribo. De este modo se identificaron 12 individuos por plantación, exceptuando a la plantación ACOENDO donde sólo se derribaron 4 árboles, uno por cada posición silvícola, para un total de 124 árboles seleccionados.

#### Derribo y medición de los árboles seleccionados

Una vez que los árboles fueron derribados desde su base, se registró la altura total de cada uno de ellos.

#### Troceo, identificación y transporte

Utilizando una motosierra se extrajeron rodajas de 5 cm de grosor aproximadamente, la primera se extrajo de la base, la segunda a 0.3 m de altura y las restantes con un metro de distancia entre ellas. Cada rodaja fue identificada con crayón (marcador de cera) y guardada en costales. Estos fueron etiquetados con el nombre de la plantación, el número de parcela, el número de individuo y el número total de rodajas.

El material fue llevado al aserradero de la División de Ciencias Forestales donde se sumergió en agua para evitar que las rodajas se secaran y se abrieran antes de ser cepilladas.

#### c) Información de análisis troncales.

La tercera parte corresponde al análisis troncal de los árboles derribados y fue realizada durante los meses de Mayo y Junio de 1992.

Para iniciar se cepilló la cara superior de las rodajas para hacer más visibles todos los anillos de crecimiento. Si era necesario los anillos de crecimiento se identificaban con la ayuda de una lupa de 20X de amplificación marca Zeiss.

En cada rodaja las mediciones se realizaron sobre dos ejes perpendiculares entre sí. El primero de ellos fue trazado sobre el diámetro máximo de la cara superior. En esta etapa se utilizó un bicolor, una regla metálica graduada en milímetros y una hoja de registro para el análisis de cada eje. Para facilitar el manejo de las hojas de registro, además de indicar el número de hoja y los datos del árbol analizado, se utilizó tinta roja para registrar las lecturas correspondientes al eje mayor y tinta azul para las obtenidas sobre el eje perpendicular al anterior.

En el análisis también se empleó un medidor de incrementos con lente de 40X marca Zeiss, sobretodo cuando se tenían rodajas de diámetro pequeño y con muchos anillos de crecimiento (Figura 4).

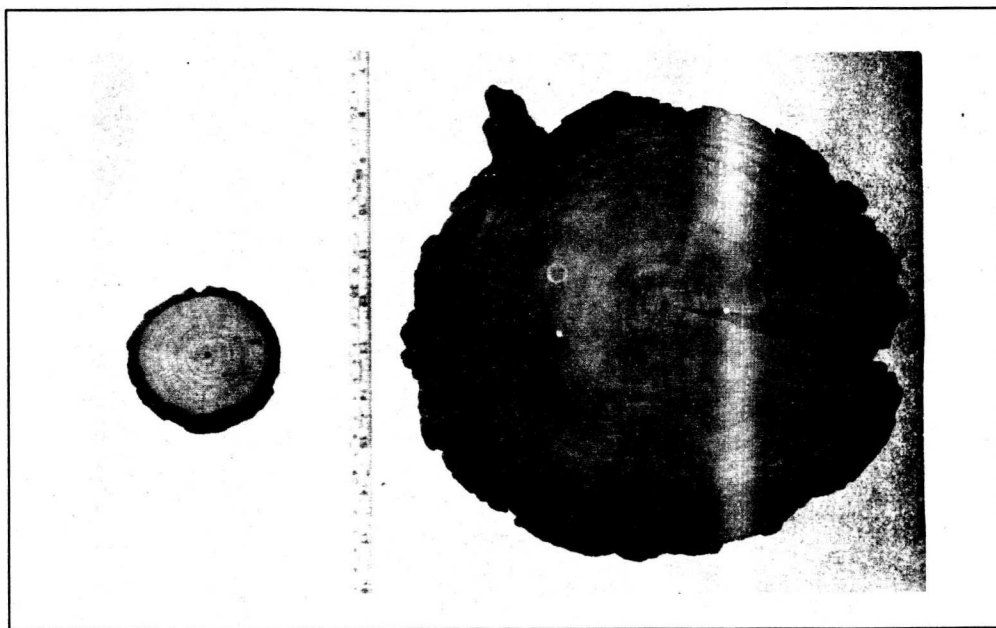


Figura 4. Rodajas obtenidas a 1.3 m de altura de árboles codominantes de 14 (A) y 11 (B) años, desarrollados bajo diferentes densidades de plantación

### 3.3.3. CAPTURA DE DATOS

La información registrada en libretas de campo fue capturada en código ASCII para manipularlos en diferentes paquetes de cómputo. Originalmente se formaron 3 archivos, en ellos se almacena la información capturada en cada una de las tres partes descritas en el punto 3.3 de este capítulo.

### 3.4. EDICION DE DATOS ORIGINALES Y CREACION DE OTRAS VARIABLES

El banco de información sobre el arbolado fue revisado con un programa que ayudara a identificar las discrepancias entre las mediciones y las características de los árboles y que fueran ocasionados ya sea por un error de captura en campo o durante el tecleado.

Con el fin de complementar la base de datos para análisis posteriores, se consideró conveniente generar otras variables que también se incluyen en el Cuadro 7. Algunas de las nuevas variables fueron definidas individualmente sobre cada árbol, otras son descriptivas de tendencia central, otras constituyen totales de cada parcela y otro grupo más integra índices relacionados con la interpretación de la densidad.



#### 4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis y resultados obtenidos en el cálculo del volumen, del índice de sitio, de las correlaciones simples y del análisis de competencia por individuo. Cada tema constituye un subcapítulo, que incluye una discusión y, si es conveniente, algunas conclusiones particulares.

##### 4.1. VOLUMEN

##### 4.1.1. CALCULO DE VOLUMEN

El volumen se calculó a partir de los análisis troncales de 124 árboles (Cap. 3.3). Para ello se utilizaron las siguientes fórmulas:

1. La fórmula para obtener el volumen de un tronco de pirámide circular (fórmula de Smalian), cuando se tenían los diámetros de un anillo de crecimiento en dos rodajas consecutivas,

$$V.Ci. = \pi/4 \frac{(D_{>}^2 + D_{<}^2)}{2} A$$

donde: V.Ci.= volumen de un cilindro

$D_{>}$  = diámetro mayor del anillo de crecimiento

$D_{<}$  = diámetro menor

A = distancia entre ambas rodajas

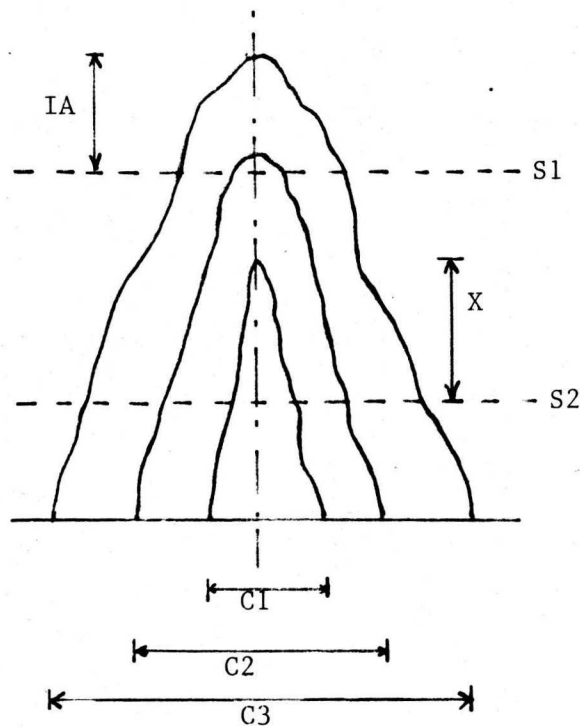
2. La fórmula del volumen del cono, cuando sólo se contaba con el último diámetro del anillo de crecimiento. Esto se presentó principalmente entre las secciones a 0.0 y 0.3 m de altura y la última (la más cercana a la punta del árbol),

$$V.Co. = \pi/3 \ r^2 \ A$$

donde: V.Co. = volumen de un cono

r = radio del último anillo de crecimiento

A = altura del cono (donde termina el crecimiento anual)



Donde: C1, C2 y C3 = crecimiento en diámetro del año ...

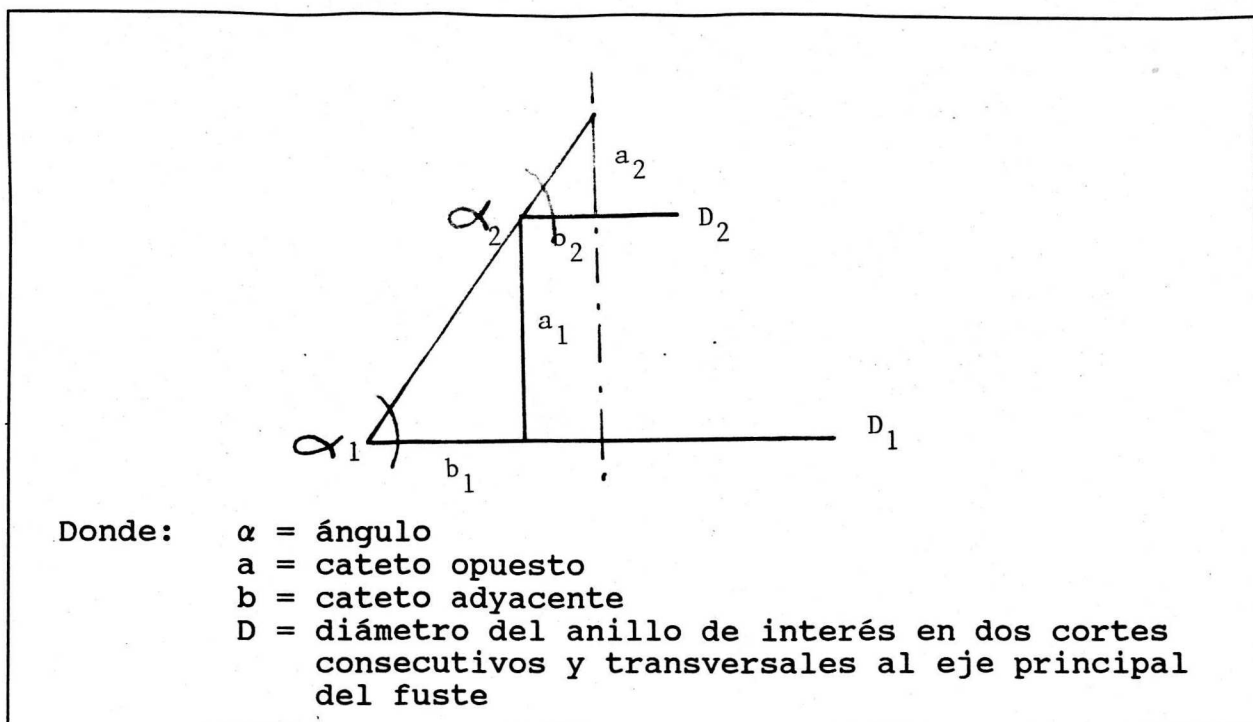
IA = incremento en altura

S = corte transversal en el fuste

X = longitud de crecimiento anual no conocido

**Figura 5.** Esquematzación de los crecimientos anuales de un árbol y proyección de áreas que se desconocen.

Debido a que se desconoce la altura a la cual termina cada crecimiento anual de un árbol ( variable X en la Figura 5), se optó por estimar la distancia que existe entre la última rodaja en la que se encuentra el anillo de crecimiento de interés y la altura a la cual una línea de ángulo constante desde su inicio (incremento en diámetro y altura a un ritmo constante), intersecta con un eje central (eje del árbol), (Figura 6).



**Figura 6.** Proyección geométrica utilizada para calcular la altura a la cual puede terminar el crecimiento anual de un árbol.

En la Figura 6 se considera que:

$$1^{\circ} \quad \alpha_1 = \alpha_2$$

$$2^{\circ} \quad \frac{D_1 - D_2}{2} = b_1, \text{ cateto adyacente del triángulo rectángulo A}$$

De la información obtenida de los análisis troncales se puede considerar que el cateto opuesto ( $a_1$ ) del triángulo rectángulo de la Figura 6 corresponde a la altura de sección (distancia entre una rodaja y la siguiente) y que  $b_1$  puede obtenerse de los diámetros registrados para un mismo anillo de crecimiento en diferentes rodajas.

Conociendo  $a_1$  y  $b_1$  se puede calcular el ángulo  $\alpha_1$  a través de la función trigonométrica:

$$\tan \alpha_1 = a_1 / b_1$$

donde:  $\tan \alpha_1$  = tangente del ángulo  $\alpha_1$

$a_1$  = cateto opuesto

$b_1$  = cateto adyacente

Una vez conocido el valor del ángulo  $\alpha_1$ , la altura a la cual termina un anillo de crecimiento ( $a_2$ ), suponiendo un ritmo de crecimiento constante (consideración 1ª), está dada por la siguiente expresión:

$$a_2 = b_2 \tan \alpha_1$$

donde:  $a_2$  = altura a la cual termina el crecimiento anual

$b_2$  = radio del anillo de crecimiento de la última sección en la que aún se presenta

Dado que este procedimiento es una simplificación del crecimiento de un árbol y que no considera los factores biológicos que afectan a las tasas de incremento, algunas de las alturas estimadas fueron modificadas con base en los siguientes razonamientos:

- a) Un "árbol interior" no puede culminar su crecimiento más allá de la altura de la siguiente rodaja en la que no se registra el anillo correspondiente.
- b) La altura total de un árbol es la altura máxima que puede alcanzar el último anillo completo (crecimiento temprano + crecimiento tardío).

Las alturas predichas que no contradijeron los puntos anteriores fueron consideradas y aquéllas que diferían fueron sustituidas de la siguiente manera:

1. Si no existe dato anterior sobre el crecimiento de interés, entonces:

La altura (A) = altura de la rodaja siguiente que no presenta registro sobre el anillo anterior

Esto puede ocurrir cuando la diferencia entre el número de anillos entre dos rodajas consecutivas es más de uno..

2. Si la altura de un árbol proyectada para una edad es menor a la del árbol de la edad anterior, entonces:

A = altura del crecimiento del año anterior

3. Si la altura proyectada es mayor a la de la sección siguiente (donde ya aparece el anillo correspondiente), entonces:

A = altura de la siguiente sección

4. Si la altura correspondiente al crecimiento anual más reciente (último anillo) es mayor a la altura total del árbol, entonces:

A = altura total del árbol

#### 4.1.2. ECUACIONES DE VOLUMEN

Inicialmente se ajustaron, por regresión lineal, los siguientes modelos:

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A) \quad (1)$$

$$V = \beta_0 + \beta_1 (DN^2 A) \quad (2)$$

donde:  $V$  = volumen ( $m^3$ )

$DN$  = diámetro normal (cm)

$A$  = altura total (m)

$\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  = regresores del modelo

$\ln(s)$  = logaritmo natural de  $s$

Los ajustes de ambos modelos se realizaron sobre:

- a. Todos los datos
- b. Exceptuando a las plantaciones PABECAB y PABECPC (SINPABE)
- c. Por posición silvícola

Los parámetros estimados, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para cada caso se presentan en el Cuadro 8. En el Apéndice 1.1 se anexan los detalles de los ajustes.

Con el fin de constatar la consistencia de las ecuaciones, éstas se aplicaron a un juego de combinaciones altura-DN. Como resultado se observaron incongruencias tales como un mayor volumen estimado con la ecuación para suprimidos que el proporcionado por la ecuación de dominantes.



**Cuadro 8.** Parámetros estimados para cada ecuación de volumen

MODELO $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$					
DATOS	NUM	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
TODOS	1211	5.38	1.62	0.57	0.959
SINPABE	875	5.37	1.49	0.70	0.958
D*	264	5.27	1.38	0.91	0.979
C	206	5.24	1.08	1.21	0.977
I	203	5.14	1.13	1.15	0.947
S	202	5.64	1.58	0.31	0.884

MODELO $V = \beta_0 + \beta_1 D^2 A$				
DATOS	NUM	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$
TODOS	1211	1948.05	35.04	0.993
SINPABE	875	2061.78	34.51	0.991
D	264	2660.84	34.07	0.993
C	206	2411.71	34.65	0.986
I	203	1223.89	37.31	0.998
S	202	763.65	38.49	0.984

---

(\*).- D=dominante, C=codominante, I=intermedio, S=suprimido

Debido a que el  $R^2$  obtenido para el modelo seleccionado es muy elevado, se rechazó la opción de anexar un estimador de forma.

Algunas ecuaciones de volumen han sido generadas para la misma especie. Por ejemplo, la ecuación:

$$V = 0.000053487 DN^{1.65437} A^{1.06093}$$

fue generada por Hernández (1990) para la zona de Huayacocotla, Ver., el  $R^2$  que obtuvo fue de 0.8. La SARH (1978) reportó la ecuación:

$$\ln V = -9.73084158 + 1.86001307 \ln(DN) + 0.98860113 \ln(A)$$

con un  $R^2 = 0.9925$ .

Esta ecuación se obtuvo para las zonas 2 y 3 del Estado de Puebla de acuerdo con la metodología seguida por el inventario estatal, y fue generada para las especies Pinus patula, P. montezumae y P. ayacahuite.

Utilizando los mismos modelos ajustados por los autores mencionados se estimaron los parámetros correspondientes sobre el banco de datos SINPABE. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$V = 0.000060208 \text{ DN}^{1.786100335} \text{ A}^{1.026848908}$$

$$R^2 = 0.9940$$

y

$$\ln V = -8.435787 + 1.493059 \ln(\text{DN}) + 0.707334 \ln(\text{A})$$

$$R^2 = 0.9583$$

Como puede observarse, los ajustes de ambas ecuaciones son muy elevados (Apéndice 1.2).

#### 4.1.3. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Del Cuadro 8 y de la comparación de los modelos restantes se observa que el modelo más adecuado para calcular el volumen de los árboles de cada plantación es el de la variable combinada (modelo 2) debido a que presenta mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), únicamente superado en 0.003 puntos por el modelo utilizado por Hernández (1990).

Debido a que en la formulación de las ecuaciones de volumen no se incluyó un estimador del factor de forma, se asumió que este

último es constante entre los árboles utilizados para el análisis. Ello evita que las ecuaciones generadas en este capítulo puedan ser utilizadas satisfactoriamente para el cálculo del volumen de árboles con diferente factor de forma.

Por lo anterior se seleccionó la ecuación que agrupa a todas las observaciones, exceptuando a las plantaciones de densidad extrema, para calcular el volumen de los árboles de cada plantación muestreada. La ecuación es la siguiente:

$$V = 2061.78 + 34.51 DN^2A$$

Se presume que esta ecuación puede proporcionar el volumen de árboles de diferente posición silvícola con la misma precisión.

## 4.2 DETERMINACION DEL INDICE DE SITIO DE LAS PLANTACIONES

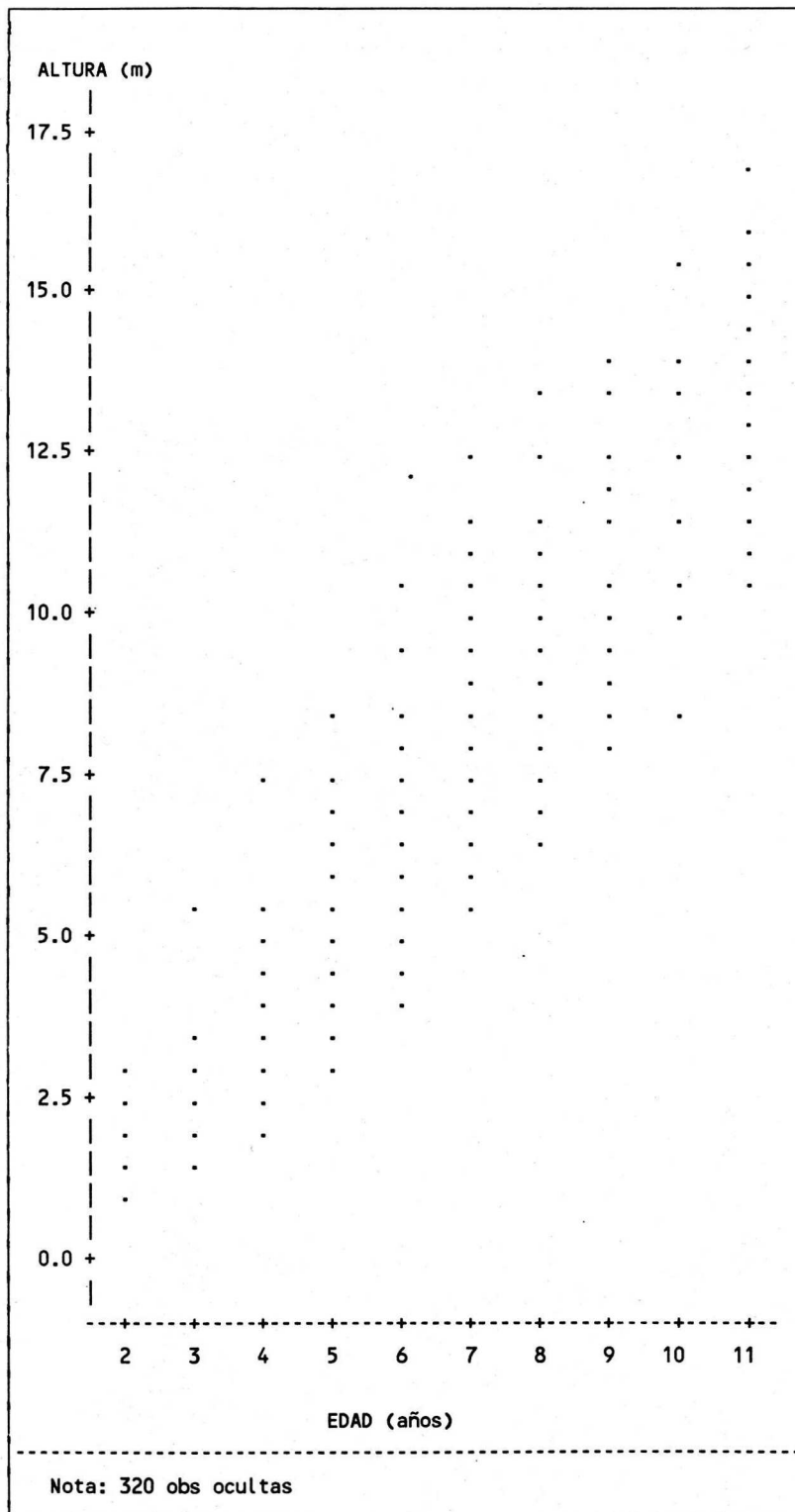
### 4.2.1. LA BASE DE DATOS

Para calificar la calidad de sitio de las plantaciones de interés se formó un banco de datos con 422 relaciones altura-edad de árboles dominantes (Cuadro 9) encontrados en las plantaciones establecidas a 2 x 2 m . Estas relaciones fueron obtenidas del análisis troncal de 24 árboles de 6 a 11 años de edad y de 189 mediciones en campo que cubren cada una de las edades correspondientes a las plantaciones de este estudio (Apéndice 2.1). Los datos de altura obtenidos por análisis troncal a la edad 1 no se incluyeron en el banco de datos debido a que se detectaron imprecisiones en su registro, por lo anterior las relaciones cubrieron un rango de edades entre 2 y 11 años.

**Cuadro 9.** Número y origen de las relaciones altura-edad consideradas para calcular el Índice de Sitio (IS) de las plantaciones.

FUENTE	NUMERO DE OBSERVACIONES
REGISTRO EN CAMPO	189
ANALISIS TRONCAL (24 ARB.)	233
T O T A L . . .	422

La consistencia de las relaciones del banco de datos puede apreciarse en la Figura 7.



**Figura 7.** Dispersión de datos altura-edad utilizados para calcular curvas de índice de sitio.

#### 4.2.2. ESTIMACION DE LAS CURVAS DE INDICE DE SITIO

El método seleccionado para la estimación del índice de sitio (IS) fue el de la "Curva Guía" utilizando la ecuación de Chapman-Richards. Este método genera curvas anamórficas.

El modelo de Chapman-Richards es el siguiente:

$$A = \beta_1 \left[ 1 - \text{EXP}(-\beta_2 \cdot \text{EDAD}) \right]^{1/(1-\beta_3)} \quad (1)$$

donde : A = altura total (m)

E = edad (años)

$\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  = parámetros de la ecuación

$\text{EXP}(m)$  = función exponencial del argumento m

El ajuste del modelo anterior para la obtención de la ecuación de la curva guía se hizo utilizando la opción "DUD" dentro del procedimiento "NLIN" del paquete estadístico de cómputo "SAS". Los detalles del ajuste se anexan en el Apéndice 2.2. La ecuación de la curva guía es la siguiente:

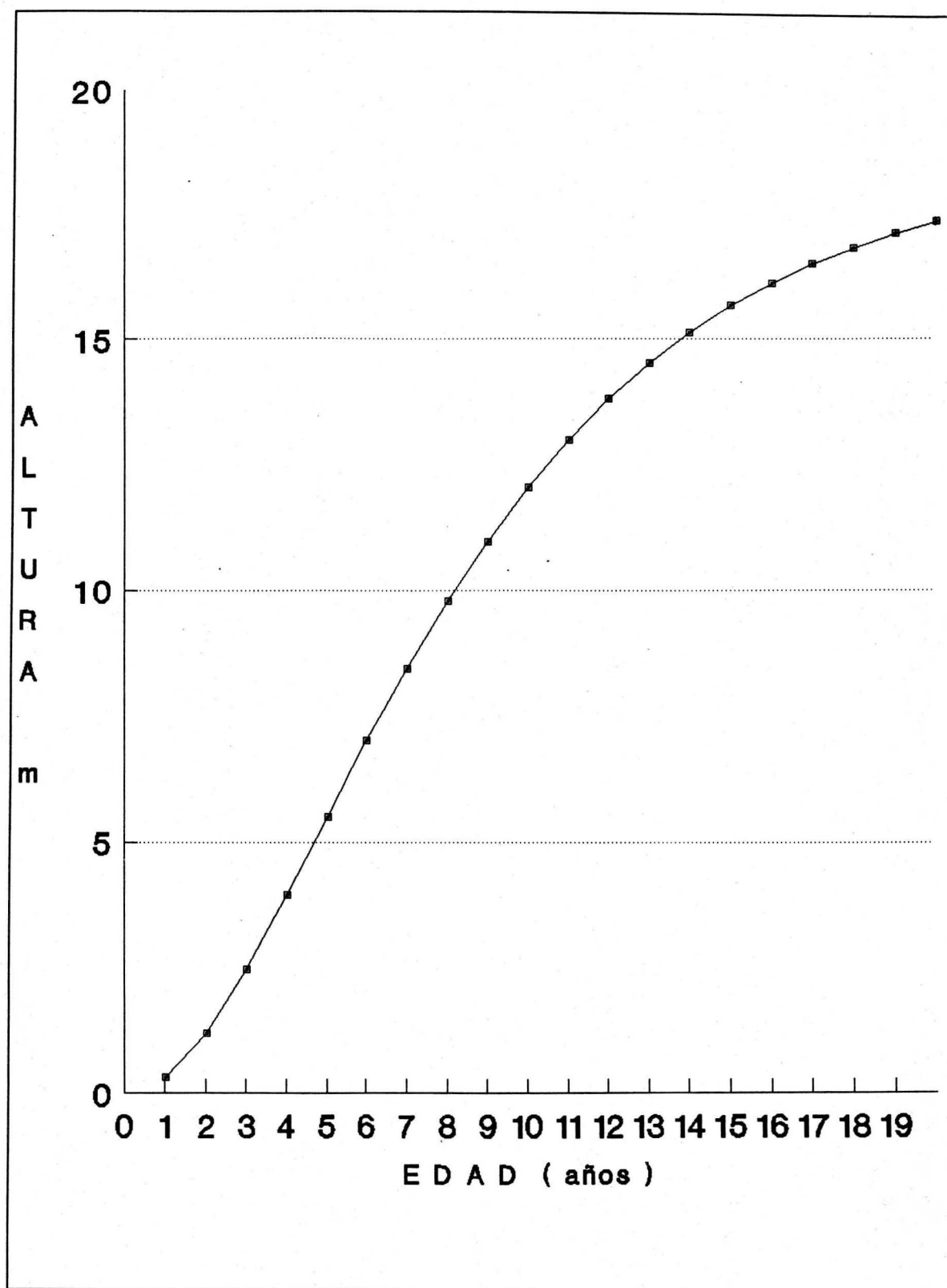
$$A = 18.5955 \left[ 1 - \text{EXP}(-0.173453 \cdot \text{EDAD}) \right]^{2.2447} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9013255$$

A partir de esta ecuación pudo graficarse la curva guía (Figura 8)

Considerando que la edad mejor representada en el banco de datos es la de 11 años se le consideró como la edad base para, a partir de ella, estimar otras curvas de IS.





**Figura 8.** Curva guía por la fórmula de Chapman-Richards

Para obtener la altura promedio correspondiente a la edad base, se utilizó la ecuación de la curva guía sustituyendo el valor de tal edad, es decir:

$$A = 18.5955 \left[ 1 - \text{EXP}(-0.173453 \cdot 11) \right]^{2.2447} = 12.9667$$

De acuerdo con Zepeda (1984), para determinar el número de clases de calidad de sitio y la equidistancia entre sus tendencias promedio a la edad base, debe tomarse en cuenta el rango de productividad presente a tal edad.

Con base en el análisis de medias sobre el banco de datos se tiene que existe un rango de alturas a la edad 11 que va desde 10.3 hasta 17.05 m con una distancia entre ellos de 6.75 m. Debido a que el rango no es muy amplio se decidió generar, incluyendo a la curva guía, tres curvas de IS. Las alturas a la edad 11 de estas curvas se definieron de la siguiente forma:

$$\text{Altura a la edad base} = 12.96 \pm 3.37$$

Por lo anterior, las alturas promedio a la edad base que poseen las tres curvas de índice de sitio son las señaladas en el Cuadro 10, donde la curva guía corresponde al IS II.

**Cuadro 10.** Valores obtenidos a la edad base (11 años) para las curvas de índice de sitio.

IS	VALOR OBTENIDO
I	16.33
II	12.96
III	9.59

Para obtener las alturas de las curvas de IS y poder esquematizarlas en forma de gráfica, los valores de altura promedio a la edad base se sustituyen en la siguiente fórmula:

$$IS = A \left[ \frac{(1 - \text{EXP}(\beta_2 \cdot E_0))}{(1 - \text{EXP}(\beta_2 \cdot E))} \right]^{\beta_3} \quad (3)$$

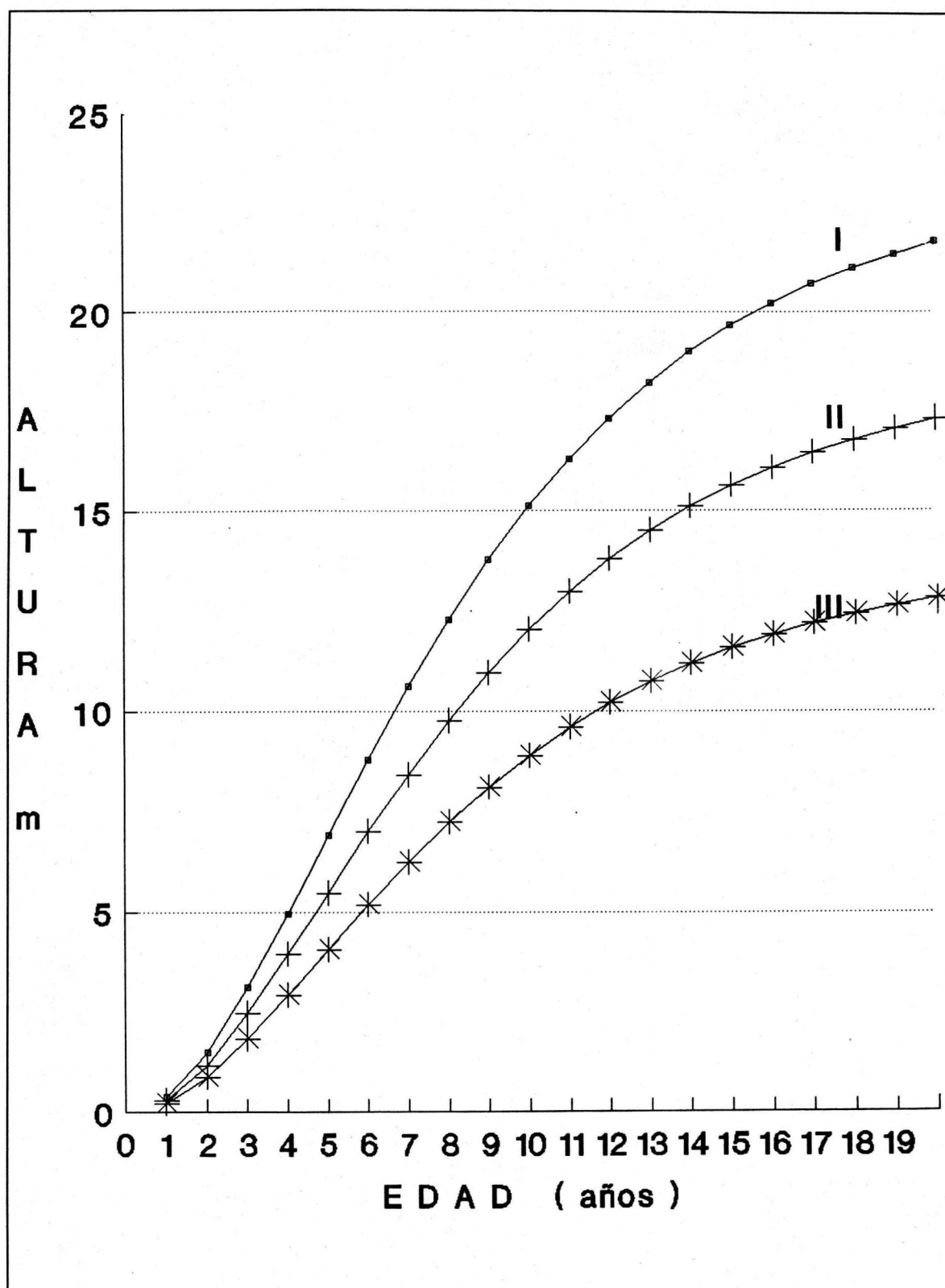
donde : IS = valor que se desea estimar para la curva IS (m)

A = altura obtenida a la edad base para la curva IS (m)

$E_0$  = edad base (años)

E = edad para la cual se desea estimar la altura correspondiente a la curva IS (años)

Para la graficación de las tres curvas de IS se dieron valores a la variable edad y se obtuvieron las alturas correspondientes. Las curvas de IS se presentan en la Figura 9.



**Figura 9.** Curvas anamórficas de índice de sitio para las plantaciones estudiadas

#### 4.2.3. CALIFICACION DE LAS PLANTACIONES POR INDICE DE SITIO

Todas las plantaciones (incluyendo PABECAB y PABECPC) fueron calificadas con la ecuación 3 sustituyendo en A la altura dominante promedio registrada a la edad E. Los resultados obtenidos se resumen en el Cuadro 11.

**Cuadro 11.** Alturas estimadas con el modelo de Chapman-Richards y el índice de sitio correspondiente a cada plantación a la edad base de 11 años.

LUGAR	EDAD (años)	ADP (m)	ALTURA ESTIMADA (m)	INDICE DE SITIO (IS) (clase)
APRESTA	2	2.05	22.46	I 6 16
APRLODC	2	1.22	13.36	II 13
VOAPOAG	3	2.02	10.67	III 10
APRLODD	4	3.99	13.16	II 13
ACOENUN	6	5.72	10.60	III 10
ACOENDO	6	7.10	13.16	II 13
ACOAGUJ	7	10.90	16.76	I 16
NARANJO	8	10.42	13.84	II 13
TEJOCOT	8	9.88	13.12	II 13
ACOTZJO	11	11.49	11.49	II 13
ACOJOTO	11	11.78	11.78	II 13
SELTEJO	11	14.35	14.35	II 13
SJAVINA	11	14.35	14.35	II 13
PABECAB	14	11.77	10.09	III 16
PABECPC	15	16.56	13.72	II 13
-----				
ADP = altura dominante promedio				
IS = altura dominante a la edad de 11 años				

#### 4.2.4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Puede observarse que el ajuste de la curva guía sobre el archivo de datos es muy satisfactoria, lo que comprueba la consistencia de la información manejada para representarse por el modelo empleado.

La mayor parte de las plantaciones (10 de 15) tienen un índice de sitio promedio que corresponde al II con una altura de 13 m a la edad base de 11 años.

Las plantaciones con IS más alto son ACOAGUJ y APRESTA, mientras que las correspondientes al IS más bajo son VOAPOAG, ACOENUN y PABECAB.

Resalta el hecho de que mientras PABECAB tiene el IS más bajo, PABECPC no presenta el IS más alto. Esto puede explicarse si se piensa en que efectivamente la productividad de la especie en esa zona (recuérdese que ambas plantaciones se encuentran a escasos metros de distancia) corresponde al IS = 13 y que el espaciamiento de la plantación PABECPC (4 x 4) ofrece la ventaja de una altura promedio muy cercana a la dominante. En el otro extremo se observa que la competencia, generada por la alta densidad a la cual se desarrolló PABECAB, provoca una disminución en el crecimiento en altura que se manifiesta en un IS bajo. En otras palabras, estos argumentos corroboran el efecto de densidades de crecimiento extremas sobre el crecimiento en altura.

Considerando los IS correspondientes a cada plantación puede observarse que coinciden con las características físicas de cada



una de ellas (ver Cuadro 5, Cap. 3.2.2). Es decir, las plantaciones que tienen características como mayor pedregosidad y menor profundidad de suelo o bien que se encuentran en zonas donde se distribuyen naturalmente especies arbóreas afines a condiciones menos húmedas y fértiles, son calificadas con IS menores.

Debe tomarse en cuenta que la ecuación de IS generada no puede utilizarse en individuos mayores a los 11 años ni fuera de las condiciones en las que crecen los individuos involucrados en el estudio.

#### 4.3. ANALISIS DE CORRELACION SIMPLE

Como preámbulo exploratorio se evaluó la correlación lineal simple entre las dimensiones del arbolado, utilizando las variables que se citan en el Cuadro 12 y que fueron definidas en el Cap.3, Cuadros 6 y 7.

**Cuadro 12.** Variables utilizadas para el análisis de correlación simple

1. DN	6. EDAD	11. VI
2. ALT	7. LCM	12. AFL
3. VOL	8. LCE	13. IC
4. DC	9. CM	14. DDP
5. GC	10. AF	15. ADP

El análisis abarcó cuatro rutinas correspondientes a las variantes con las que se manipuló al banco de datos, estas variantes se presentan en el Cuadro 13.

**Cuadro 13.** Criterios de clasificación de los datos para el análisis de correlación simple.

1. Incluyendo a todas las observaciones (2717 Obs.)
2. Excluyendo a las plantaciones PABECAB y PABECPC (2489 Obs.)
3. Por índice de sitio y con la condición 2
4. Por edad

#### 4.3.1. RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 14 se presentan los coeficientes de correlación que asocian algunos atributos de la copa, del fuste y la edad, de acuerdo con las variantes de los ajustes 1 y 2. En los Apéndices 3.1 y 3.2 se anexan las matrices de correlación completas así como información estadística general sobre las variables involucradas.

**Cuadro 14.** Coeficientes de correlación obtenidos para algunas variables relacionadas con la copa, el fuste y la edad del arbolado en los ajustes 1 y 2.

	AJUSTE 1					AJUSTE 2				
	DN	ALT	VOL	DC	EDAD	DN	ALT	VOL	DC	EDAD
AF	0.86	0.75	0.90	0.84	0.58	0.87	0.87	0.83	0.89	0.69
CM	0.88	0.81	0.81	0.90	0.67	0.85	0.86	0.75	0.90	0.77
LCM	0.85	0.87	0.76	0.89	0.63	0.81	0.91	0.70	0.87	0.72
LCE	0.43	0.27	0.46	0.41	-0.12	0.19	0.15	0.20	0.18	-0.30
IC	0.01	0.29	-0.02	0.06	0.49	0.26	0.32	0.25	0.22	0.47
VI	-0.01	-0.29	0.02	-0.06	-0.49	-0.26	-0.32	-0.25	-0.22	-0.47
AFL	0.41	0.78	0.31	0.53	0.79	0.66	0.84	0.64	0.72	0.82
EDAD	0.56	0.85	0.51	0.70	1.00	0.68	0.87	0.58	0.82	1.00

De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 14 y con respaldo en los apéndices 3.1 y 3.2, se tiene lo siguiente:

1. Las variables relacionadas aritméticamente tienen correlaciones altas y positivas como era de esperarse, demostrando consistencia en el conjunto de datos. Entre estas variables, las asociaciones con coeficientes de correlación mayores a 0.85 son las siguientes: DN/DC, DN/DDP, DN/VOL, ADP/ALT, AF/LCM y AF/CM.
2. Algunas relaciones alométricas se verificaron por la correlación alta que se detectó entre las variables: ADP/DDP, ALT/DC,

ALT/LCM, ALT/DN, AF/DN, AF/VOL, DN/CM, DN/LCM, DN/GC, DC/GC, DC/LCM, DC/CM y CM/LCM.

3. Las variables más asociadas con la edad fueron: ADP y ALT.

Algunas de las variables anteriores fueron asociadas mediante ecuaciones de crecimiento (Cap. 4.4 y 4.5).

Al comparar los coeficientes de correlación obtenidos utilizando todas las observaciones de campo con los generados excluyendo a las plantaciones PABECAB y PABECPC, se observa un aumento general del grado de asociación (coeficiente de correlación) en este último (Cuadro 15), en las relaciones que incluyen a las variables altura total (ALT) y altura dominante promedio (ADP). La mayoría de las correlaciones no citadas en el Cuadro 15 manifiestan la misma tendencia.

**Cuadro 15.** Comparación entre los coeficientes de correlación mayores a 0.85 de los análisis realizados a) sobre todas las observaciones y b) excluyendo a las plantaciones PABECAB y PABECPC (de densidades extremas).

	TODOS LOS DATOS	SIN PABECAB Y PABECPC
ADP/DDP	0.921	0.969
ALT/DC	0.881	0.916
ALT/LCM	0.877	0.913
AF/VOL	0.907	0.831
AF/DN	0.869	0.873
DN/GC	0.929	0.916
DN/CM	0.881	0.854
DN/ALT	0.850	0.894
DC/GC	0.920	0.901
DC/CM	0.908	0.905
DC/ALT	0.881	0.916
DC/LCM	0.891	0.874
EDAD/ALT	0.853	0.876
EDAD/ADP	0.934	0.961
EDAD/DDP	0.764	0.908

Puede observarse que las variables relacionadas con la copa del árbol (CM, LCM, AF) aumentan su coeficiente en el primer análisis debido a que sus dimensiones están directamente influenciadas por la densidad, lo mismo se observa con las variables DN y VOL, muy asociadas a las dimensiones de la copa y principalmente a la superficie lateral de la copa (AF). La mayoría de las correlaciones no citadas en el Cuadro 15 manifiestan la misma tendencia.

Debe señalarse que mientras en la rutina 1 se rechazaron las correlaciones DN/VI, DN/IC, VOL/VI, VOL/IC, CM/VI y CM/IC, con una probabilidad menor al 0.06% ( $p < 0.06$ ), en la rutina 2 sólo se rechazó LCM/VI y LCM/IC.

Con base en lo anterior se puede generalizar que todas las asociaciones que incluyen variables relacionadas con la densidad (diámetros del fuste, dimensiones de la copa) aumentan su coeficiente de correlación cuando se analizan en conjunto plantaciones establecidas a diferente densidad. En las correlaciones restantes sucede lo contrario.

Tomando como referencia a las variables DN, ALT, VOL, AF y EDAD, en el Cuadro 16 se hace una comparación de las correlaciones obtenidas por índice de sitio.

**Cuadro 16.** Comparación entre algunos coeficientes de correlación obtenidos por índice de sitio.

Variable	Indice de sitio		
	10	13	16
ALT/DN	0.929	0.870	0.835
ALT/AF	0.941	0.846	0.883
ALT/EDAD	0.890	0.846	---
DN/AF	0.906	0.862	0.759
DN/EDAD	0.752	0.661	---
VOL/AF	0.889	0.822	0.732
VOL/EDAD	0.543	0.543	---
(--) Dato no generado por existir una sola observación para edad.			

En el Cuadro 16 se observa una disminución en la correlación de las variables conforme aumenta el índice de sitio. Esto puede explicarse con base en lo siguiente:

Al aumentar el IS la competencia se incrementa debido a que los árboles se desarrollan más rápido. La competencia que se genera provoca la diferenciación sociológica por dominancia. Tal diferenciación altera la estabilidad de las relaciones alométricas como ALT/DN, ALT/AF, DN/AF, VOL/AF, etc. En otras palabras, al aumentar la competencia se reduce la vinculación entre las dimensiones y la edad de los árboles individuales a causa de la diferenciación de los mismos por dominancia.

No obstante lo anterior, debe mencionarse que el número de observaciones para cada IS es de 377, 1676 y 436 para las categorías I, II y III respectivamente, las edades diferentes que se encuentran en cada uno de ellos es de 2 (3 y 6 años), 5 (4, 6, 7, 8 y 11 años) y 2 (2 y 7 años) respectivamente; se observa que a excepción del IS = 13 no se tiene gran representatividad en los

índices restantes y por lo tanto no se puede especular sobre ellos satisfactoriamente.

Con el fin de apreciar la modificación de las correlaciones a través de la edad y relacionar sus valores indirectamente con el IS correspondiente, se graficaron los coeficientes de correlación obtenidos del último análisis (rutina 4) a diferentes edades. La gráfica se presenta como Figura 10.

#### 4.3.2. CONCLUSIONES

1. En las correlaciones realizadas con los diferentes atributos de un árbol y la edad se observó que las características de los individuos se incrementan con la edad debido a que las plantaciones que se estudian no son mayores a 15 años. Dicho de otra forma, el arbolado que se estudia, en su conjunto, representa la etapa de mayor velocidad de crecimiento en todas sus partes por lo que la correlación entre cualquiera de ellas con la edad va a ser positiva y cada vez mayor hasta alcanzar edad más grande que las incluidas en este trabajo.
2. La calidad del sitio altera la estabilidad de las asociaciones. Cuando la calidad del sitio es mayor las correlaciones entre las variables relacionadas con el tamaño del árbol y aquellas que lo están con la espesura (diámetro de copa promedio, CM) disminuyen, ello debido a que hay mayor diferenciación por dominancia que en una localidad con IS menor.
3. La copa media (CM) adquiere importancia con la edad y bajo condiciones de mayor densidad.



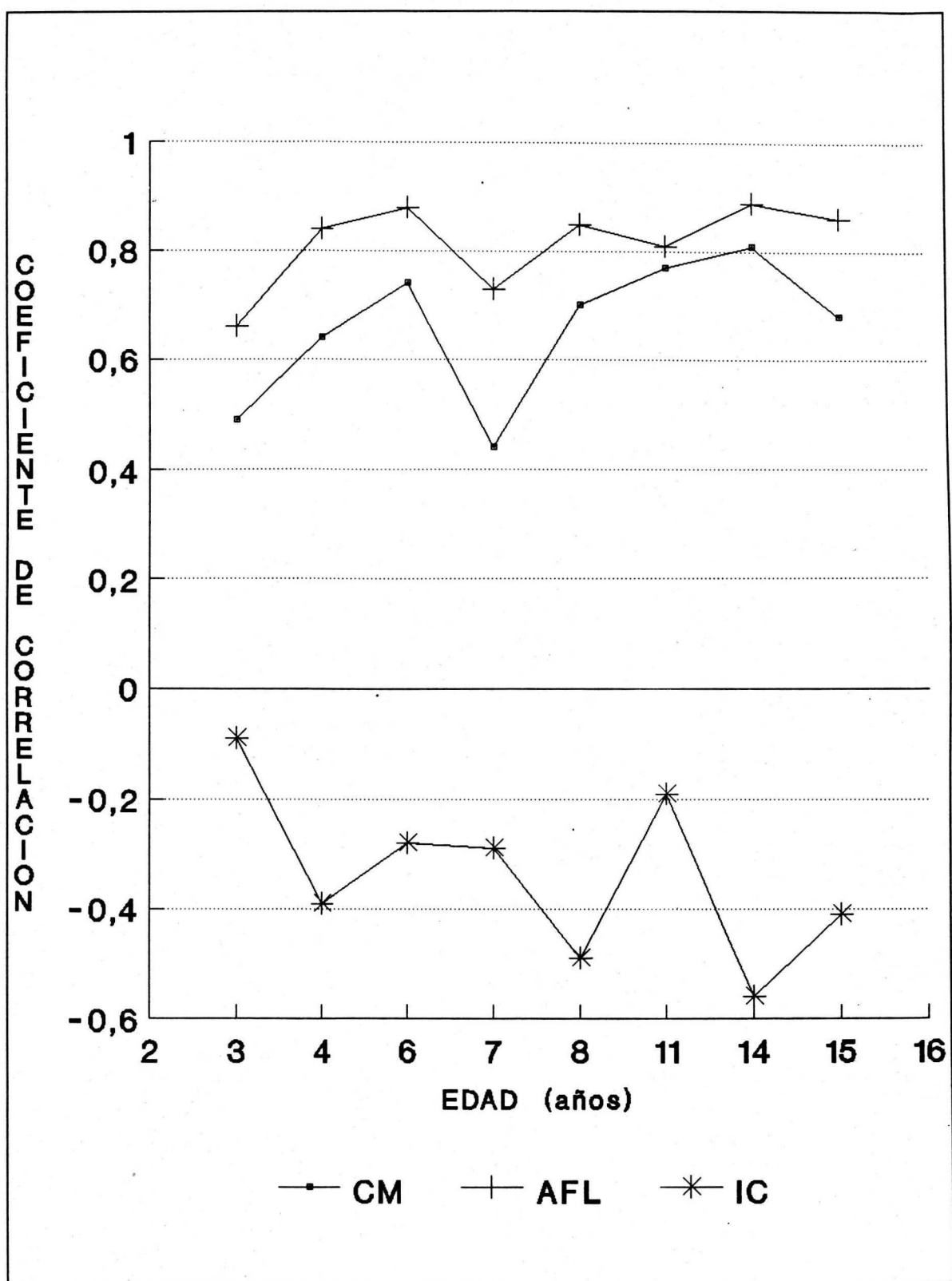


Figura 10. Correlación entre el volumen (VOL) y algunas variables relacionadas con la competencia (CM, AFL e IC), a través de la edad.

4. La altura de fuste limpio (AFL) no presenta una tendencia definida, pero al menos se observa que sus valores mínimos de correlación están asociados a densidades bajas y que los valores más altos corresponden a sitios de mayor fertilidad.
5. El índice de competencia (IC) mantiene una correlación negativa con las variables relacionadas con el diámetro del fuste, misma que tiende a incrementarse cuando la densidad aumenta.
6. El VI no tiene valores significativos con VOL, pero en condiciones de densidad extrema adquiere importancia
7. LCE - VOL registran una correlación más alta en condiciones donde la competencia es mayor.

#### 4.4 ECUACIONES DE CRECIMIENTO PARA ALGUNOS ATRIBUTOS DEL ARBOLADO

##### 4.4.1. SELECCION DEL MODELO

Con el fin de seleccionar un modelo adecuado para expresar el crecimiento de algunos de los atributos del arbolado que se estudian, se realizó un análisis exploratorio sobre el ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Backman, cuyas expresiones se indican en el Cuadro 16.

**Cuadro 17.** Modelos de crecimiento evaluados en un análisis preliminar para la selección de uno de ellos.

NOMBRE	EXPRESION
Schumacher	$Y = \beta_1 (\text{EXP}(\beta_2 (1/\text{EDAD})))$
Chapman-Richards	$Y = \beta_1 (1 - \text{EXP}(\beta_2 \text{EDAD}))^{\beta_3} *$
Backman	$Y = \text{EXP}(\beta_0 + \beta_1 \ln(\text{EDAD}) + \beta_2 \ln^2(\text{EDAD}))$
-----	
(*) .- $\beta_3 = 1/(1-\beta_3)$	

El ajuste de las ecuaciones se realizó con la opción "MARQUARDT" del procedimiento "NLIN" de "SAS" para modelos no lineales, la evaluación de cada uno de los ajustes se basó en una "pseudo-R<sup>2</sup>" (R) cuya estimación es la siguiente:

$$R = 1 - \left[ \frac{\text{Suma de cuadrados residuales}}{\text{Suma de cuadrados total corregida}} \right]$$

Para reducir el tiempo en las iteraciones involucradas en cada uno de los modelos se creó un archivo que incluyera la cuarta parte de las observaciones del banco original y que representara

satisfactoriamente los rangos de variación observados. Las variables consideradas, las modificaciones sobre el banco de datos y los resultados obtenidos, se presentan en el Cuadro 18.

**Cuadro 18.** Resultados del ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Backman.

Variable	M o d e l o										
	Schumacher			Chapman-Richards				Backman			
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R*	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	R
Incluyendo todas las plantaciones:											
ALT	18.6	-7.2	76	11.7	-0.27	3.4	77	-2.8	3.7	-0.6	77
DN	24.2	-7.4	39	13.2	-0.5	13.4	41	-4.6	5.5	-1.0	40
AF	100.8	-10.8	33	1078185	-4.68x10 <sup>-5</sup>	1.3	34	0.4	1.2	0.03	34
Excluyendo las plantaciones PABECAB y PABECPC:											
ALT	19.9	-7.7	78	12.0	-0.25	3.3	78	-2.9	3.8	-0.6	78
DN	28.2	-8.5	51	13.5	-0.47	12.0	53	-8.5	9.3	-1.9	53
AF	79.4	-8.8	49	36.3	-0.54	18.2	50	-9.4	11.1	-2.3	50
-----											
(*) R= Pseudo R <sup>2</sup> ; definida en el texto y expresada en porcentaje. (Ver Apéndice 4.1)											

Como se observa en el Cuadro 17, los tres modelos presentaron valores de R muy similares. Aún cuando la diferencia es muy pequeña, la ecuación de Chapman-Richards proporciona los ajustes más satisfactorios mientras que con el modelo de Schumacher se obtienen los más bajos. Sin embargo, la velocidad del procedimiento es mayor con la ecuación de Schumacher que con el de Chapman-Richards, el cual es el más lento de los tres modelos.

#### 4.4.2. OBTENCION DE ECUACIONES DE CRECIMIENTO

Con base en los resultados expuestos, se procedió a utilizar el modelo de Schumacher para obtener las diferentes ecuaciones de crecimiento incluyendo el archivo completo de datos y considerando las variantes que se muestran en el Cuadro 18.

**Cuadro 19.** Variantes utilizadas en el ajuste del modelo de Schumacher para diferentes variables.

AJUSTE	Nº OBS.	VARIANTE
1	2717	Ninguna
2	2489	Exclusión de las plantaciones PABECAB y PABECPC por poseer diferente densidad de plantación
3	2489	Considerando la variante anterior se hicieron ajustes individuales por posición silvícola (PS)
4	154	Utilizando promedios por parcela y por PS. Mantiene variante del ajuste 2
5	39	Utilizando promedios por parcela. Mantiene variante del ajuste 2
-----		
Nota: los ajustes se hicieron sobre el banco completo datos.		

En el caso de los análisis por PS, las categorías dominante (D), codominante (C), intermedio (I) y suprimido (S) fueron asignadas considerando a la altura máxima observada en el banco de datos como el límite superior de la PS dominante. Así, considerando

que en una población coetánea los árboles dominantes y suprimidos constituyen los extremos de una distribución normal en cualesquiera atributos individuales y que los árboles intermedios y codominantes ocupan un porcentaje mayor en la misma población con la misma distribución normal, se etiquetaron arbitrariamente con las categorías silvícolas S, I, C y D, aproximada y respectivamente, el 20, 30, 30 y 20 % de las observaciones de una plantación, ordenadas éstas por altura en forma ascendente. Con esta clasificación se buscó eliminar la subjetividad de la PS asignada originalmente a cada individuo en campo, pues en ese momento se evaluaron a simple vista otras características como diámetro normal y vigor simultáneamente con la altura.

En los Cuadros 20, 21, 22 y 23 se presentan los resultados de los ajustes realizados.

**Cuadro 20.** Resultados obtenidos con el modelo de Schumacher utilizando, en el primer caso la totalidad de las observaciones (ajuste 1) y exceptuando, en el segundo caso las plantaciones PABECAB y PABECPC por presentar densidades de establecimiento extremas (ajuste 2).

Variable	AJUSTE 1			AJUSTE 2		
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R
DC	27.4	-5.5	54	32.4	-6.6	67
CM	5.2	-4.7	49	5.4	-4.9	64
AF	100.6	-11.0	33	79.5	-9.0	49
GC	0.7	-7.4	18	1.0	-9.8	32
ALT	18.4	-7.2	76	19.7	-7.6	77
AB	577.9	-15.5	26	573.6	-15.2	36
DN	24.0	-7.4	35	28.4	-8.6	48
LCE	1.0	4.8	4	0.7	7.0	10
LCM	8.7	-4.7	48	9.2	-5.0	59
VI	0.6	0.5	8	0.6	0.4	7
VOL	0.5	-23.6	26	0.4	-19.9	34
Nota: ver Apéndice 4.2						

**Cuadro 21.** Resultados obtenidos con el modelo de Schumacher agrupando las observaciones por PS y exceptuando a las plantaciones de densidad extrema (ajuste 3)

VARIABLE	DOMINANTE			POSICION SILVICOLA (PS)								
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	CODOMINANTE			INTERMEDIO			SUPRIMIDO		
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R
DC	37.4	-6.2	81	36.8	-6.9	80	32.0	-7.1	75	24.2	-7.0	60
CM	6.3	-4.7	78	6.1	-5.2	78	5.4	-5.3	69	3.8	-4.5	53
AF	122.7	-9.3	76	103.0	-9.7	72	71.9	-9.4	62	24.2	-5.9	31
GC	1.1	-8.5	50	1.1	-9.7	50	1.0	-10.4	38	0.7	-12.3	25
ALT	24.5	-7.4	92	22.3	-7.8	94	19.9	-8.3	93	12.5	-7.4	80
AB	797.0	-14.4	59	753.9	-16.0	57	472.3	-15.1	39	283.2	-16.6	23
DN	35.2	-8.3	75	33.9	-9.1	72	27.2	-8.9	56	18.1	-8.6	28
LCE	1.7	3.7	10	1.2	4.2	8	0.4	8.8	14	0.004	36.4	38
LCM	12.3	-5.0	83	10.9	-5.3	83	9.2	-5.6	77	4.7	-3.9	44
VI	0.6	0.2	5	0.6	0.3	6	0.6	0.3	5	0.5	0.7	13
VOL	0.6	-19.1	59	0.5	-20.8	58	0.3	-20.1	41	0.1	-21.2	24

**Cuadro 22.** Resultados del ajuste del modelo de Schumacher sobre diferentes atributos del arbolado. El análisis se hizo sobre los promedios de las variables por PS y por parcela (ajuste 4)

VARIABLE	DOMINANTE			POSICION SILVICOLA (PS)								
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	CODOMINANTE			INTERMEDIO			SUPRIMIDO		
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R
DC	38.8	-6.3	89	36.9	-6.8	89	32.4	-7.0	91	25.7	-7.3	85
CM	6.5	-4.8	91	6.2	-5.2	91	5.6	-5.3	91	4.1	-5.1	87
AF	120.3	-8.9	86	104.7	-9.7	87	73.8	-9.4	88	27.4	-6.7	73
GC	1.1	-8.5	74	1.1	-9.4	73	1.0	-10.2	67	0.9	-13.4	57
ALT	24.3	-7.3	93	22.4	-7.8	94	20.0	-8.2	95	13.2	-7.7	88
AB	855.5	-14.5	75	754.8	-15.8	76	513.9	-15.3	64	352.2	-18.2	48
DN	36.6	-8.4	85	33.9	-9.0	85	27.9	-8.9	76	19.9	-9.2	57
LCE	1.8	3.4	29	1.4	3.6	18	0.5	8.4	29	0.001	41.3	66
LCM	12.5	-5.0	88	11.2	-5.4	91	-9.4	-5.7	91	5.0	-4.4	77
VI	0.6	0.2	4	0.6	0.3	12	0.6	0.3	15	0.5	0.8	32
VOL	0.7	-19.3	72	0.5	-20.8	72	0.3	-20.7	62	0.2	-24.2	44

**Cuadro 23.** Resultados sobre el ajuste del modelo de Schumacher para diferentes variables, promediadas éstas por plantación (ajuste 5)

Variable	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R
DC	33.0	-6.69	90.9
CM	5.57	-4.99	92.8
AF	83.26	-9.22	90.1
GC	1.05	-10.06	71.8
ALT	19.87	-7.69	94.2
AB	640.53	-15.91	76.0
DN	29.74	-8.86	86.1
LCE	0.81	6.41	42.9
LCM	9.52	-5.16	91.6
VI	0.63	0.40	17.5
VOL	0.50	-21.0	70.6



#### 4.4.3. DISCUSION

Para analizar los resultados presentados en esta sección, debe tenerse presente que el rango de edades sobre el cual se ha buscado asociar distintas variables, corresponde a una etapa temprana en el crecimiento de la especie, en la que todos los procesos de desarrollo de un árbol están activos, de 2 a 11 años. No hay un solo atributo que no se encuentre en un cambio constante y con tasas más elevadas que las que pudiera presentar a edades mayores. Por el mismo motivo, algunos efectos del sitio y de la densidad quizá están todavía por manifestarse.

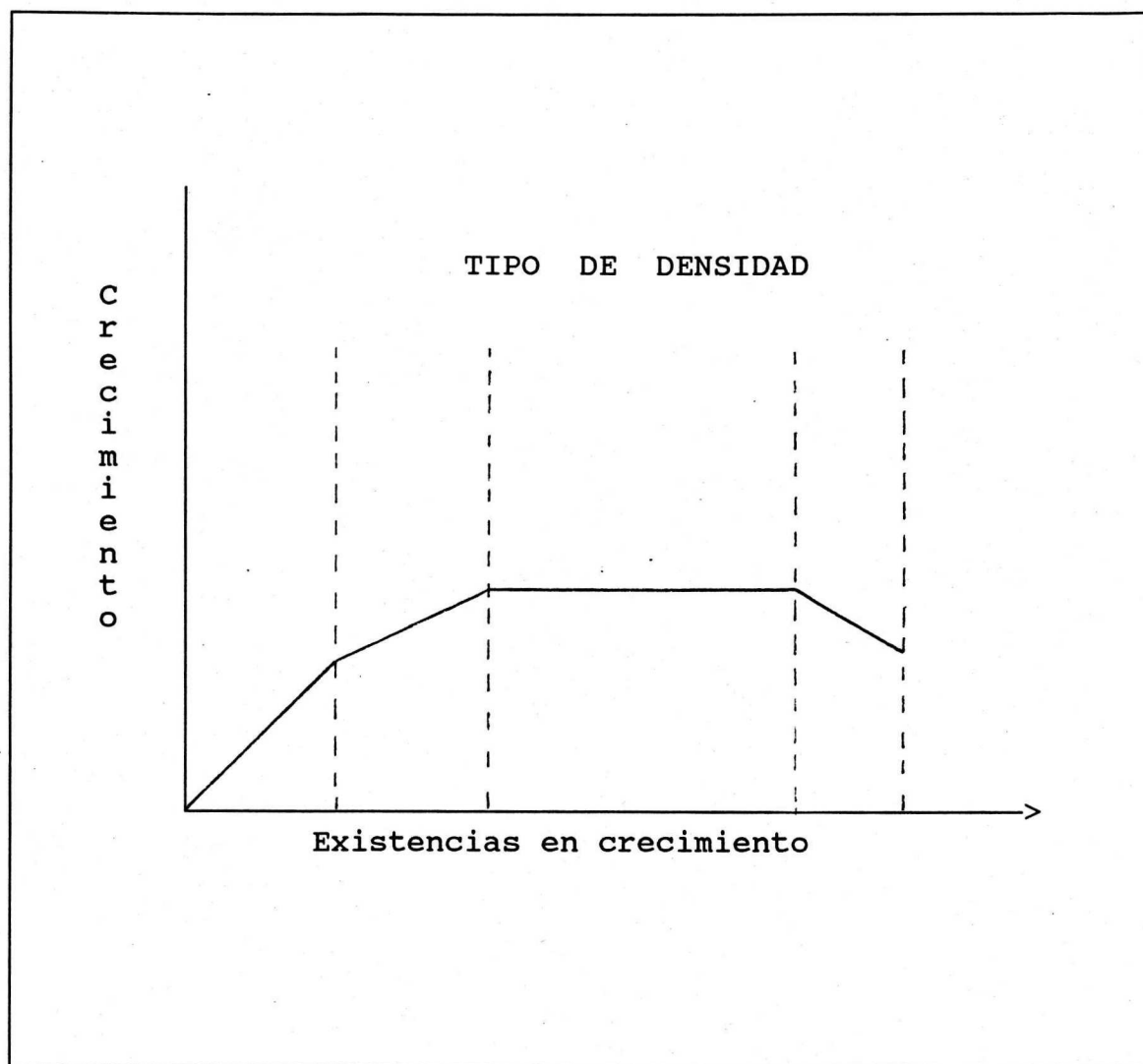
Como se mencionó anteriormente, la densidad influye directamente sobre la competencia biológica; particularmente en los árboles, son las dimensiones de la copa las que reflejan el grado de competencia que existe en torno suyo. La copa es por sí misma el "órgano productor" de los fotosintatos, de la cobertura y profundidad de su dosel depende la cantidad de carbohidratos que puedan generarse y distribuirse a todas las partes de un árbol. La copa, sobre todo en especies intolerantes como Pinus patula, cambia plásticamente su forma y dimensiones al modificarse la presión que ejercen físicamente los árboles del entorno sobre sus lados; a causa de ello la copa puede aumentar o disminuir su capacidad y eficiencia fotosintetizadora.

De acuerdo con diferentes investigadores y como se observó en el análisis de correlación simple (Capítulo 4.3), la copa media (CM) está fuertemente asociada a los diámetros del fuste a la altura

del cuello y a 1.30 m (DC y DN), esto puede traducirse en que al disminuir la cobertura de la copa de un árbol también lo hará el ritmo de crecimiento del diámetro del fuste, al menos dentro del rango de edades que se estudia en este trabajo. Lo anterior implica que la competencia, a través de las dimensiones de la copa, modifica el crecimiento de las diferentes dimensiones de un árbol. A diferencia de la mayoría de los atributos de un árbol, la altura es la variable menos afectada por la competencia en un rango de densidades bastante amplio.

Los resultados obtenidos en los ajustes del modelo de Schumacher, realizados en este estudio para las diferentes variables seleccionadas, reflejan en forma consistente la influencia que tiene la competencia (por efecto de la densidad) sobre ellas.

Si se comparan los valores de R obtenidos en el análisis en el que se incluyen todas las plantaciones (ajuste 1) con las R del ajuste que excluye a las plantaciones PABECAB y PABECPC por tener densidades de crecimiento extremas (ajuste 2), puede observarse que los ajustes aumentan substancialmente en el ajuste 2 (Cuadro 20). Estos resultados sugieren que las poblaciones incluidas en el ajuste 2, presentan un crecimiento uniforme, sin que el aumento en el tamaño de los árboles ni la consiguiente disminución del espacio de crecimiento lleguen a afectar el desarrollo de las dimensiones de los árboles en función de la edad; gráficamente, se estaría haciendo referencia a la región III de Langsaeter (1941; citado por Fierros, 1993) (Figura 11).



**Figura 11.** Relación entre la densidad de las existencias en crecimiento y el crecimiento por unidad de superficie por año (Modificada de Fierros González, 1993).

De la comparación entre los ajustes 1 y 2 también se observa que el ajuste de la variable altura aumenta en 1%, este hecho constituye una evidencia más de la conveniencia de utilizar la variable altura en las metodologías para evaluar la capacidad productiva de un área dada, esto es, el índice de sitio.

En los ajustes hechos por posición silvícola (Cuadros 21 y 22) y en el realizado sobre las variables promediadas sólo por plantación (Cuadro 23), el valor de R es mayor comparado con los ajustes 1 y 2 (Cuadro 20); esto se debe a que los rangos de variación de los diferentes atributos son más reducidos dentro de una misma PS que en un conjunto de datos en el que se incluyen las observaciones sin categorizarlas ni promediarlas.

Los análisis realizados por PS presentan cada cual un ajuste mayor que el anterior, esto se debe, como ya se explicó antes, a la reducción en la variación entre observaciones sobre cada variable por PS; sobre todo cuando se trata de medias grupales puesto que la variación entre promedios, considerados como observaciones del nuevo archivo, es menos amplia por poseer valores más estables.

Ya que las categorías silvícolas nos remiten al nivel competitivo del árbol, derivado de la densidad circundante, dentro de cada análisis por PS puede advertirse la influencia de la competencia sobre los valores de R y  $\beta_1$ . La tendencia de los valores referidos es la de disminuir conforme se aumenta la presión por competencia sobre los individuos, así, los árboles D (cuya constitución genética y ubicación fortuita les permiten el desarrollo de

sus diferentes partes en forma más o menos libre) presentan valores de  $R$  y  $\beta_1$  mayores a los individuos suprimidos, en ellos los efectos de la competencia aumentan por lo que se modifica la proporción variable-edad; es decir, la tasa de cambio en el crecimiento de una variable ya no es proporcional a la tasa de cambio de la edad, por lo que se obtienen valores bajos de  $R$ . Dicho en otras palabras: cuando las observaciones se agrupan por PS se manifiesta la influencia de los diferentes niveles de competencia sobre las relaciones dimensión-edad, a través de los valores de  $R$  y  $\beta_1$ .

Así mismo, en el último ajuste correspondiente a los promedios por plantación, se ratifica la fuerte asociación de los diferentes dimensiones del arbolado con la edad debido a la etapa de crecimiento que se analiza.

Es importante considerar los valores que toma  $\beta_1$  para cada variable en los análisis, sobre todo en los realizados por PS, esto porque  $\beta_1$  nos indica el valor máximo que puede esperarse para una dimensión dada en un individuo de cierta PS. Lo anterior puede demostrarse como sigue:

$$\text{En la ecuación} \quad Y = \beta_1 \text{ EXP } \beta_2(1/\text{Edad})$$

si  $\text{Edad} \rightarrow \infty$ , entonces  $1/\text{Edad} \rightarrow 0$  como sigue:

$$Y = \beta_1 \text{ EXP } \beta_2(0)$$

y la variable dependiente

$$Y \rightarrow \beta_1$$

Como punto final de esta parte de la discusión, se puede señalar que las variables más asociadas a la edad son DC, CM, AF, ALT, DN y LCM, mientras que GC, LCE y VI presentan los menores ajustes; sin embargo el valor positivo de  $\beta_2$  para las variables LCE y VI indica la tendencia que habría de esperarse entre éstas y la edad: su disminución al pasar el tiempo .

#### 4.4.4. CONCLUSIONES

1. En el ajuste del modelo sobre diferentes atributos del árbol en función de la edad, las variables que presentan mayor valor de pseudo- $R^2$  (R) son ALT, CM, LCM, DC y AF
2. El modelo de Schumacher es adecuado para representar relaciones variable-edad debido a la rapidez y bondad de su ajuste, prácticamente similar al de los modelos de Backman y Chapman-Richards, que demandan más tiempo para llegar al mismo nivel de convergencia.
3. En los ajustes por PS, los valores de R y  $\beta_1$  tienden a disminuir conforme se baja en la dominancia del grupo, esto es, son mayores en los dominantes y menores en los suprimidos.
4. Los ajustes por PS con menor valor manifiestan una relación entre el aumento de la competencia y las variables correspondientes, a través de la edad.

#### 4.5. ANALISIS INDIVIDUAL SOBRE COMPETENCIA INTRAESPECIFICA

##### 4.5.1. SELECCION DE PLANTACIONES

Para este análisis se requirió identificar aquellas plantaciones cuyos individuos estuviesen bajo algún grado de competencia aérea. Para ello se consideró que dos individuos compiten a partir del momento en el que se da el cierre de copas, no obstante, y como se indicó en el capítulo 2.2, se sabe que dependiendo de la especie y de las condiciones del sitio la competencia puede darse primero a nivel radicular y no en la parte aérea.

De esta forma, la selección de las plantaciones se realizó con base en el coeficiente de proporción (CP) que existe entre las áreas de copa y la superficie de la parcela correspondiente, es decir:

$$CP = (\sum AC_i) / Ap$$

donde : CP = coeficiente de proporción

$AC_i$  = área de copa del árbol i, para  $i = 1 \dots n$ ; ( $m^2$ )

$Ap$  = área de la parcela ( $m^2$ )

De acuerdo con lo anterior:

Si  $CP < 1$  las copas de los árboles de una parcela no se tocan entre sí. No hay competencia.

Si  $CP = 1$  el promedio de las copas de los árboles se rozan entre sí sin llegar a traslaparse. Inicia la competencia.



Si  $CP > 1$  El promedio de las copas se traslapan en cierto grado con las copas de los árboles vecinos. Existe competencia.

En las relaciones anteriores, cuando  $CP = 1$ , se está suponiendo un esquema abstracto de copas geométricas cuyos perímetros se ajustan perfectamente unos con otros sin dejar espacio vacío alguno. Esto, claro está, no existe en la naturaleza, es decir, si una plantación es calificada con un  $CP = 1$  lo que puede ocurrir es que mientras un grupo de árboles traslapan sus copas, otros la exhiban libremente, pero que la suma de las áreas de copa proyectadas sobre el espacio de crecimiento de ambos grupos de árboles sea igual a la superficie ocupada por todos ellos.

En el Cuadro 24 se presentan los CP obtenidos por parcela y el promedio por plantación. Con los resultados de este Cuadro se justifica la inclusión de las plantaciones mayores a los 6 años de edad. Debe indicarse que las plantaciones ACOENDO y ACOENUN no se incluyeron porque no obstante poseer un CP ligeramente mayor a uno, tienen los siguientes inconvenientes:

- Errores en el registro de rumbos.
- Abundancia de regeneración natural multiespecífica, predominando latifoliadas.

Aún cuando el primer punto por sí solo impide utilizar estas plantaciones, el hecho de que la regeneración natural sea diferente en especies con relación a la existente en las otras plantaciones, le resta homogeneidad de condiciones al material de estudio.

**Cuadro 24.** Coeficientes de proporción entre el área de las copas de los individuos de una parcela y la superficie de la misma (CP)

Lugar	Edad	Parcela	Cp	Promedio
APRESTA	2	1	0.0691923	0.08075
		2	0.0962361	
		3	0.0768509	
APRLODC	2	1	0.0371127	0.032859
		2	0.0404405	
		3	0.0210259	
VOAPOAG	3	1	0.088526	0.088488
		2	0.0911162	
		3	0.0858235	
APRLODD	4	1	0.3498688	0.368604
		2	0.4153146	
		3	0.3406296	
ACOENUN	6	1	1.2170027	1.062240
		2	1.0719859	
		3	0.8977318	
ACOENDO	6	1	0.9005069	1.174993
		2	1.363829	
		3	1.2606455	
ACOAGUJ	7	1	1.7546609	1.747523
		2	1.8380718	
		3	1.7740678	
		4	1.6232926	
NARANJO	8	1	1.7818173	1.649648
		2	1.3961385	
		3	1.7709903	
TEJOCOT	8	1	2.2119212	2.075995
		2	2.0360465	
		3	1.980019	
ACOJOTO	11	1	2.0715468	2.090706
		2	2.3875733	
		3	1.8129978	
ACOTZJO	11	1	1.8276919	1.844363
		2	1.858294	
		3	1.8471043	
SELTEJO	11	1	1.6685225	1.870573
		2	1.7605838	
		3	2.1826138	
SJAVINA	11	1	2.026813	2.061312
		2	2.0958128	
PABECAB	14	-	5.9550737	5.955073
PABECPC	15	-	3.4080787	3.408078

#### 4.5.2. IDENTIFICACION DE ARBOLES COMPETIDORES

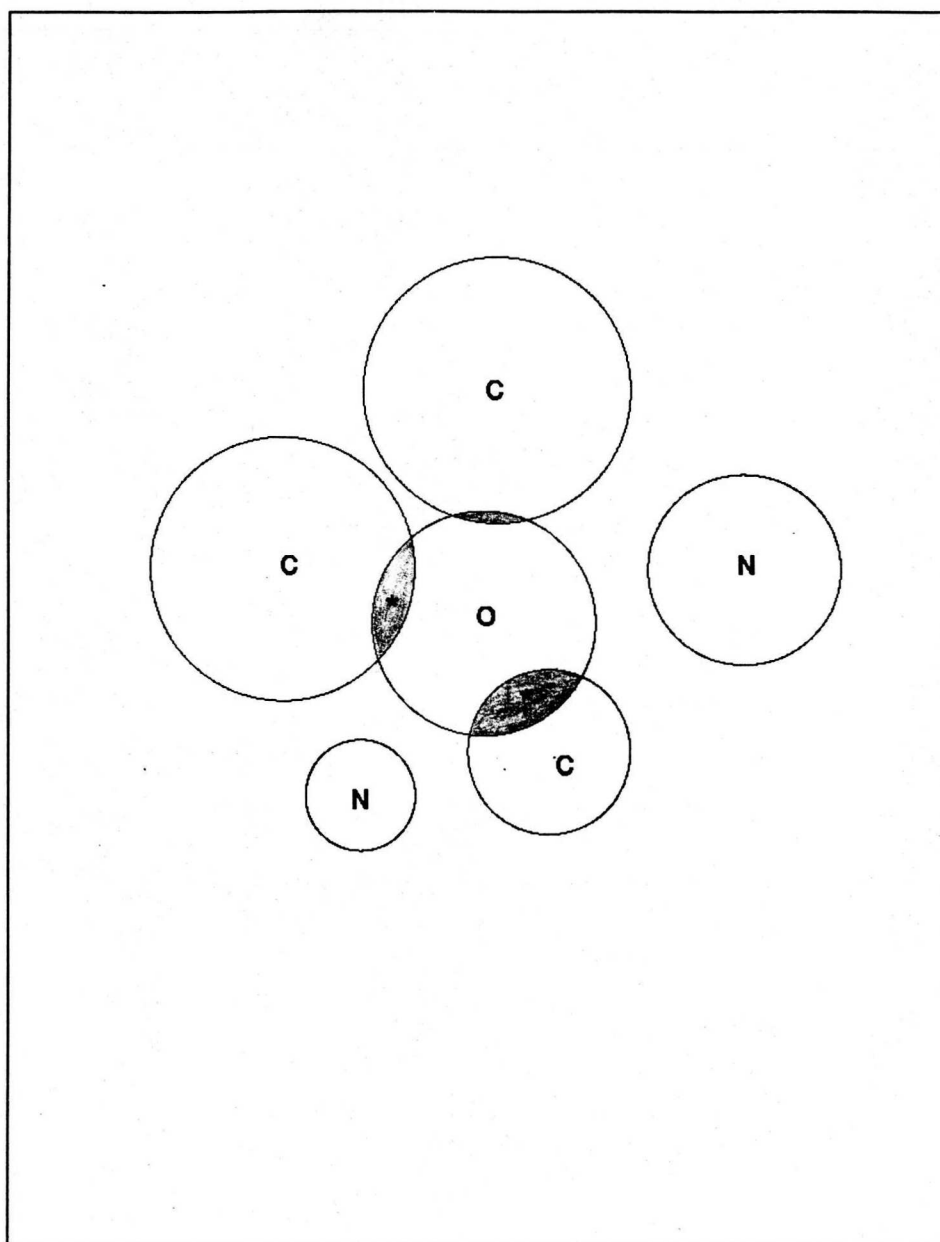
Una vez seleccionadas las plantaciones, se procedió a identificar a los árboles competidores de cada uno de los individuos presentes en las parcelas de muestreo. Para ello sólo se consideraron aquellos árboles que se encontraran dentro de una circunferencia de radio determinado (radio de búsqueda) tomando como centro un árbol de interés o árbol objetivo\* (Figura 12), por lo que se partió de los siguientes supuestos:

- A. El diámetro máximo de copa encontrado en un área determinada es un indicador del espacio que puede ocupar otro árbol del mismo lugar.
- B. Un árbol competidor puede definirse como aquél cuya copa roza o se traslapa con la copa del árbol de interés (Figura 12).

Considerando el supuesto A, la longitud del radio de búsqueda se determinó con el valor del radio de copa máximo encontrado en cada plantación. Los valores máximo, mínimo y promedio del diámetro de copa y por lo tanto, el radio de la circunferencia descrita, se transcriben en el Cuadro 25.

---

(\*).- Se eliminaron como árboles objetivo a aquéllos que formaran parte de los límites de la parcela o fueran regeneración natural.



**Figura 12.** Definición esquemática de los árboles considerados,  
 Donde: O = árbol objetivo  
 C = árbol competidor  
 N = árbol no competidor  
 \* = área de sobrelape de copas

**Cuadro 25.** Valores máximo, mínimo y promedio para el diámetro de copa media (CM) y el radio de búsqueda para la identificación de los árboles vecinos por plantación.

Lugar	Edad	Mínimo (m)	Máximo (m)	Promedio (m)	Radio (m)
ACOAGUJ	7	0.35	5.10	3.005	3.1
NARANJO	8	2.35	4.55	3.218	3.1
TEJOCOT	8	3.09	5.35	4.131	3.1
ACOJOTO	11	3.12	5.55	4.172	3.1
ACOTZJO	11	2.43	5.27	3.814	3.1
SELTEJO	11	2.76	5.95	4.440	3.1
SJAVINA	11	2.67	6.10	4.190	3.1
PABECAB	14	0.75	4.90	2.305	1.5
PABECPC	15	5.35	9.50	7.287	5.0

Como se observa en el cuadro anterior, se tuvo un rango general de 4.55 a 6.10 m que incluye a todas las plantaciones de 7 a 11 años, por lo que el radio de búsqueda de vecinos para esas plantaciones se estableció en 3.1 m. Con respecto a la plantación PABECAB, aún cuando el diámetro de copa máximo es de 4.9 m se optó por un radio de 1.5, ya que el valor máximo de DM corresponde a una sola observación.

La identificación de los árboles situados dentro de cada circunferencia fue realizada con un programa elaborado en Pascal, el cual, como parte final de su rutina, proporciona un archivo con los datos de identificación y registros dasométricos de cada árbol objetivo y de sus vecinos.

Debido a que no todos los árboles encontrados dentro del área circular pueden considerarse competidores (no cumplen con el

supuesto B), se procedió a eliminar a algunos individuos con base en la siguiente relación:

$$C = (r_1 + r_2) - d \geq 0$$

Donde C = símbolo asignado a la relación de competencia

$r_1$  = radio de copa del árbol de interés (m)

$r_2$  = radio de copa del árbol vecino (m)

d = distancia entre ambos árboles (m)

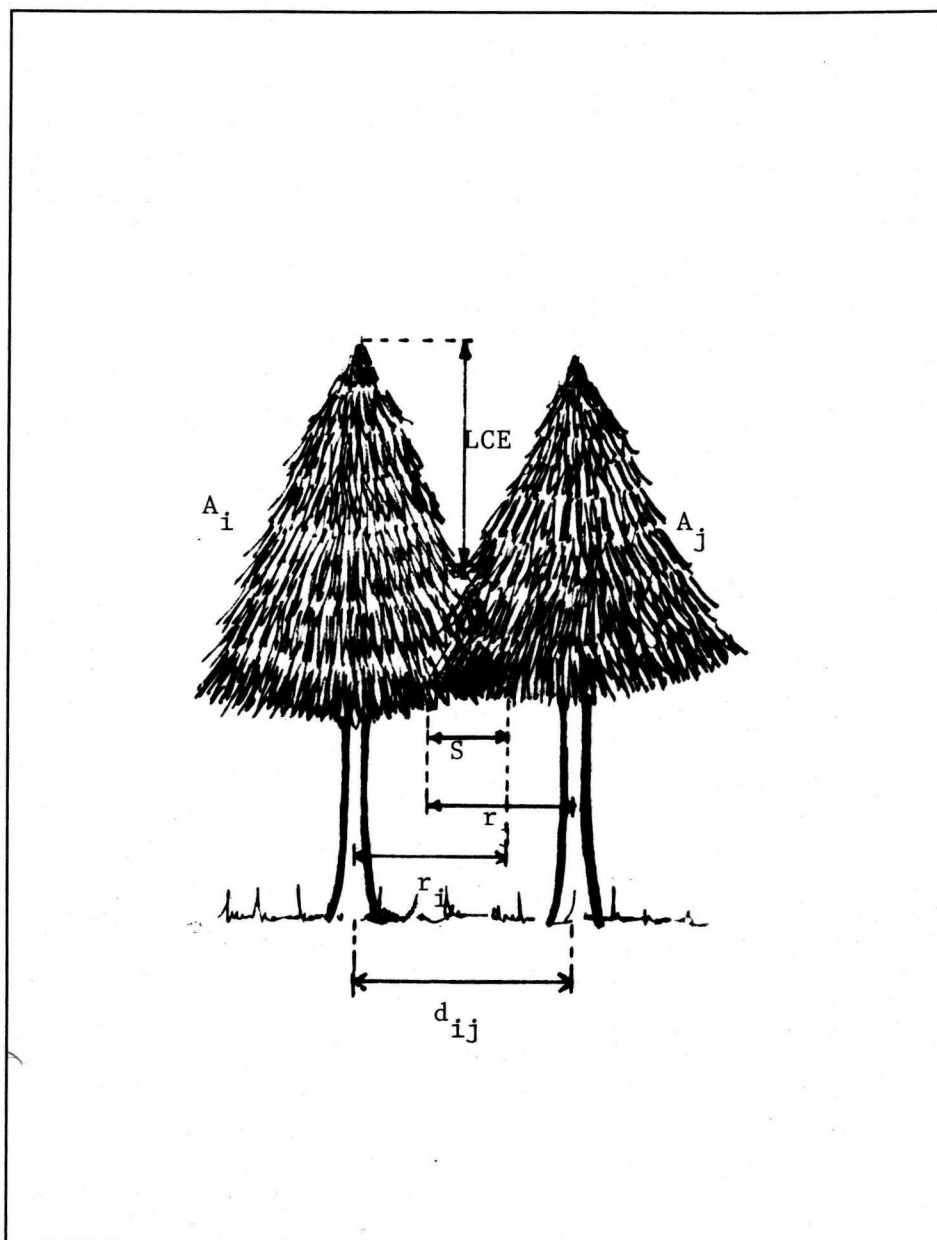
(Ver Figuras 12 y 13)

De esta forma sólo se consideraron como árboles competidores a aquéllos cuyas copas rozaran (cuando  $C=0$ ) o se traslaparan (cuando  $C>0$ ) con la copa del árbol objetivo.

En el Cuadro 26 se hace una relación del número de árboles objetivo, árboles competidores y árboles encontrados dentro del radio de búsqueda, por plantación.

**Cuadro 26.** Relación de árboles competidores, vecinos y objetivo encontrados por plantación.

PLANTACION	A R B O L E S		
	OBJETIVO	COMPETIDORES	VECINOS
ACOAGUJ	65	275	386
SELTEJO	66	337	359
ACAJOTO	119	647	787
TEJOCOT	88	488	553
ACOTZJO	123	493	608
NARANJO	125	888	1147
SJAVINA	149	625	905
PABECPC	57	224	236
PABECAB	139	831	893



**Figura 13.** Definición esquemática de algunas variables,

Donde:  $A_i$  = árbol objetivo  
 $A_j$  = árbol competidor  
 $LCE$  = longitud de copa expuesta  
 $S$  = área de sobrelape de copas  
 $r_i$  = radio de copa del árbol objetivo  
 $r_j$  = radio de copa del árbol competidor  
 $d_{ij}$  = distancia entre ambos árboles



#### 4.5.3. INDICADORES DE COMPETENCIA

Para poder relacionar la densidad y la competencia presente en las distintas plantaciones con los atributos de DN, ALT y VOL de los árboles objetivo, se consideró la importancia biológica del follaje como generador de fotosintatos y la asociación directa de la producción de éstos con el tamaño del árbol.

De acuerdo con Rodríguez (1987), la superficie de la copa, como estimador del follaje de un árbol, puede relacionarse con la eficiencia del uso del espacio de crecimiento y con los mismos factores que afectan el desarrollo individual de un árbol. La superficie foliar (antes que el diámetro o la altura) recibe los efectos de la densidad y por lo tanto de la competencia que se ejerce a su alrededor; en función de ello la producción de fotosintatos puede variar afectando el incremento de todas las partes del árbol.

En el Capítulo 4.3 (Análisis de Correlación Simple), se observó que la superficie de la copa (AF), calculada como la superficie lateral de un cono, es entre las dimensiones de la copa el estimador de follaje que más se asoció a las variables DN, ALT y VOL. Por ello y por la importancia que tiene en el crecimiento de un árbol, se decidió explicar indirectamente la variación del tamaño del árbol asociando la superficie foliar (AF) con las condiciones de competencia, densidad y posición silvícola bajo las cuales se desarrolla. En el Cuadro 27 se citan las expresiones utilizadas en el análisis de competencia sobre árboles individuales, así como su formulación y simbología.

**Cuadro 27.** Variables utilizadas para el análisis de competencia.  
Algunas de ellas se citan en el capítulo 2.

Nombre	Símbolo	Fórmula
a) De Heygii	ICDN	$\sum_j (D_i / D_j) / d_{ij}$ <p>donde: <math>D_i</math> = diámetro normal del árbol objetivo (cm).  <math>D_j</math> = diámetro normal del árbol vecino.  <math>d_{ij}</math> = distancia promedio entre los árboles i y j, (m)</p>
b) Proporción Árboles-Area	PAA	$(\sum_i AC_i) / A$ <p>donde: <math>AC_i</math> = área de copa de cada árbol (<math>m^2</math>)  <math>A</math> = área ocupada por los árboles que se estudian</p>
c) Proporción entre radios promedio de copa	VSC	$\sum_j (RPC_i / RPC_j)$ <p>donde: <math>RPC_i</math> = radio promedio de copa del árbol i (objetivo), (m)  <math>RPC_j</math> = radio promedio de copa del árbol j, (competidor), (m).</p>
d) Area Basal por superficie	AB	$0.7854 DN^2 / A$ <p>donde: DN = diámetro normal</p>
e) Distancia promedio	DI	$(\sum d_{ij}) / n_j$ <p>donde: <math>d_{ij}</math> = distancia entre el árbol i y el árbol j.  <math>n_j</math> = número de competidores</p>
continúa ....		

Cuadro 27. Variables utilizadas para ... (Continuación).

f) Proporción de presión	PAMD	$PAA - (AC_i/A)$ donde: $AC_i$ = área de copa del árbol i, (m)
g) De Heygii modificado.	ICCOP	(igual que ICDN pero utilizando diámetros de copa)
h) Proporción entre alturas	P	$A_i/A_p$ donde: $A_i$ = altura del árbol i, (m) $A_p$ = altura promedio de la plantación.
i) VSC modificado	RD	$VSC/d_{ij}$ donde: $d_{ij}$ = distancia promedio entre el árbol objetivo y sus competidores, (m).
j) Longitud de copa expuesta	LCEX	(Capítulo 3.3, Cuadro 2).

Para conocer el grado de asociación entre las diferentes variables descritas en el Cuadro 27 así como entre cada una de ellas y el AF, se procedió a realizar un análisis de correlación simple. Los resultados se presentan en el apéndice 5.1.

Entre los coeficientes de correlación (r) obtenidos se destaca la asociación entre la longitud de copa expuesta (LCEX) y AF ( $r=0.75303$ ). LCEX no sólo indica la longitud de la copa que recibe libremente la luz solar, también hace alusión indirecta de la posición silvícola del árbol dentro de la plantación, ya que la relación entre LCEX y la posición silvícola es directamente

proporcional, es decir, al aumentar LCEX los árboles tienen una posición de mayor dominancia dentro de la población, la cual es más marcada a medida que la plantación es de mayor edad bajo la misma densidad de establecimiento.

Con el fin de identificar la mejor combinación de variables que explicara el mayor porcentaje de la variación del AF, se utilizó el procedimiento STEPWISE del paquete estadístico "SAS". Este método agrupa, en forma progresiva, a las variables que explican mejor la fluctuación de la variable dependiente (Y), de tal forma que si  $n$  variables contribuyen a explicar el 90% de la variación de Y, es posible que sólo  $x < n$  variables expliquen casi el mismo porcentaje.

Las variables incluídas en este procedimiento son las presentadas en el Cuadro 27, estas variables fueron utilizadas a) en su forma original, b) combinadas entre sí en forma multiplicativa de dos variables y c) elevadas al cuadrado. El criterio con el cual se priorizó la selección de la mejor combinación de variables fue el valor máximo del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Un resumen de los resultados proporcionados por el análisis se muestran en el Apéndice 5.2.

Considerando que el coeficiente de determinación no aumentó sustancialmente en las subrutinas del análisis que sucedieron a la inclusión de las tres variables indicadas, se consideró que el mejor modelo para explicar la variación del AF es:

$$AF = \beta_0 + \beta_1(DIP) + \beta_2(LCEXDI) + \beta_3(LCEXVSC) \quad (1)$$

Donde:

AF = superficie foliar (m<sup>2</sup>)

DIP = producto de la distancia promedio entre el árbol objetivo y sus competidores con la proporción guardada entre la altura total del árbol objetivo y la altura promedio de la plantación.

LCEXDI = producto entre la longitud de copa expuesta del árbol objetivo y la distancia promedio entre éste y sus competidores.

LCEXVSC = producto entre la longitud de copa expuesta y la proporción guardada entre el radio promedio de la copa del árbol objetivo y el radio promedio de las copas de los árboles competidores.

$\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  = coeficientes de regresión.

Los parámetros del modelo anterior son los siguientes:

$$AF = -9.487684 + 16.915224 \cdot DIP + 4.372946 \cdot LCEXDI - 4.165332 \cdot LCEXVSC$$

$$R^2 = 0.8359$$

En la Figura 13 se presenta la dispersión de los residuales del modelo anterior y en el Apéndice 5.3 se anexan los detalles del ajuste.

Debido a que las variables asociadas en primer término por las iteraciones de STEPWISE fueron siempre variables combinadas, se



procedió a realizar un segundo análisis de correlación entre éstas y AF. La matriz de correlaciones que se obtuvo se presenta en el Apéndice 5.4. Debe indicarse que se añadieron las variables  $LCEX^2$  y  $DI^2$  por haber sido incluídas por el procedimiento dentro de los 10 primeros modelos generados. En general, las variables elevadas al cuadrado no aportaron información relevante para la explicación de AF, ello se refleja en que fueron consideradas en último término dentro del modelo general de STEPWISE (Apéndice 5.2).

#### 4.5.4. ECUACIONES PARA LOS ATRIBUTOS DN, VOL Y ALT.

Dado que el interés principal para la obtención del modelo  $AF = \beta_0 + \beta_1(DIP) + \beta_2(LCEXDI) + \beta_3(LCEXVSC)$  (Modelo 1), es la de explicar la variación actual en DN, ALT y VOL con base en el área foliar y la influencia de la competencia sobre ésta, el modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(AF) \quad (2)$$

fue ajustado por regresión lineal con el DN, ALT y VOL como variables dependientes. Las ecuaciones obtenidas se presentan en el Cuadro 28.

**Cuadro 28.** Ecuaciones obtenidas con el modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1(AF)$  para las variables DN, ALT y VOL de los árboles analizados individualmente.

ECUACION	$R^2$
$DN = 5.672015 + 0.171934 \cdot AF$	0.75
$ALT = 6.950285 + 0.065236 \cdot AF$	0.44
$VOL = -12539 + 2279.351896 \cdot AF$	0.82



En el Apéndice 5.5 se presentan los análisis de varianza correspondientes al cuadro anterior.

Con base en el ajuste obtenido en la ecuación 2, se consideró la conveniencia de añadir la variable AF a los modelos de crecimiento obtenidos con la fórmula de Schumacher para las variables DN, ALT y VOL (Cap. 4.4). El modelo modificado es de la siguiente forma:

$$\text{LnY} = \beta_0 + \beta_1(1/\text{EDAD}) + \beta_2(\text{AF}) \quad (3)$$

donde: LnY = logaritmo natural de la variable dependiente (DN, ALT o VOL)

El ajuste del modelo se realizó sobre el archivo completo de observaciones capturadas en campo (2717 árboles), asumiendo que las diferencias en densidad de establecimiento pueden ser reflejadas por la variable AF. Para poder comparar los ajustes del modelo 3 con los que proporciona el de Schumacher, las variables fueron ajustadas mediante regresiones lineales. En el Cuadro 29 se transcriben las ecuaciones generadas para las variables DN, ALT y VOL y se comparan con las obtenidas con el modelo de Schumacher considerando el coeficiente de determinación obtenido en cada caso.

**Cuadro 29.** Ecuaciones obtenidas con el ajuste de los modelos  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$  y  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$

Archivo completo (2717 Obs.)							
MODELO: $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$				$\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$			
Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
DN	3.18	-8.33	51	2.47	-5.74	0.01	72
ALT	2.82	-6.84	77	2.42	-5.42	0.007	85
VOL	12.01	-15.52	45	-10.36	-9.47	0.03	75

Archivo sin plantaciones PABECAB y PABECPC (2489 Obs.)							
MODELO: $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$				$\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$			
Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
DN	3.35	-9.25	62	2.37	-5.88	0.02	82
ALT	2.82	-6.87	76	2.15	-4.83	0.01	86
VOL	12.21	-16.50	54	9.86	-8.48	0.04	84

En el Apéndice 5.6 se transcriben los análisis de varianza correspondientes.

Debido a que las ecuaciones obtenidas con el ajuste del modelo 2 para las variables DN y VOL (Cuadro 28) presentan un  $R^2$  mayor al obtenido con el modelo 3 (Cuadro 29), lo que hace pensar en relaciones más lineales que logarítmicas debido a la velocidad de crecimiento que se registra en un rango de edades como el que aquí se estudia, se optó por ajustar las siguientes expresiones:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) \quad (4)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF) \quad (5)$$

Los parámetros obtenidos para cada variable así como el  $R^2$  correspondiente se muestran en el Cuadro 30.

**Cuadro 30.** Ecuaciones obtenidas con el ajuste de los modelos  
 $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  y  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$

Archivo completo (2717 Obs.)							
MODELO: $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$				$Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$			
Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
DN	17.14	-56.89	34	8.50	-25.32	0.16	81
ALT	10.68	-22.17	64	7.77	-15.57	0.07	80
VOL	108487	-480126	17	-12088	-39430	2282	82
Archivo sin plantaciones PABECAB y PABECPC (2489 Obs.)							
MODELO: $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$				$Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$			
Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$
DN	17.52	-58.85	45	7.56	-24.52	0.20	81
ALT	10.38	-21.33	65	5.67	-10.83	0.12	86
VOL	92930	-392261	25	-6109	-51119	2067	69

Los análisis de varianza correspondientes a los ajustes presentados en el Cuadro 30 se anexan como Apéndice 5.7.

#### 4.5.5. DISCUSION

De acuerdo con el Cuadro 26, el número promedio de árboles competidores por individuo analizado fue de 5 para las plantaciones establecidas a 2 x 2, de 4 para la plantación PABECPC (4 x 4) y de 6 para la plantación PABECAB. Esto indica que el número de competidores para un árbol es relativamente estable (en calidades de sitio iguales); sin importar la densidad registrada en cada una de las plantaciones, esto podría interpretarse en que al menos en estas plantaciones un individuo de Pinus patula compite con un número aproximado a 5 árboles de la misma especie.

De los resultados proporcionados por STEPWISE (Apéndice 5.2), se observó que las 58 variables analizadas explican un 95.17% de la variación en AF, y que tres de ellas: LCEXDI, DIP y LCEXVSC explican el 83.60%. Ello indica que la longitud de copa expuesta (LCEX), la distancia promedio (DI), la proporción entre la altura del árbol objetivo y la altura promedio de la plantación (P) y la proporción entre radios promedio de copa (VSC) son las variables que mayor relación tienen con la modificación de AF.

En algunas investigaciones, DI y P fueron las variables que mejor explicaron el incremento en volumen (Rodríguez Franco, 1987). Como se puede observar, a excepción de VSC, el modelo seleccionado (1) incluye variables que han sido reportadas como mejores indicadores de competencia, DI y P fueron preferidas por Rodríguez (1987) y juntas representan la proximidad de los competidores y la dominancia del individuo dentro de la población.

LCEX es la variable que presenta mayor importancia, lo que se explica si se considera a esta variable como un indicador de la posición silvícola del árbol, así como la longitud de la copa que se encuentra libre de competencia; se puede inferir que una mayor longitud de LCEX proporciona mayor actividad fotosintética, como consecuencia, un mayor vigor y por lo tanto mayor capacidad para utilizar los recursos necesarios para el crecimiento.

Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Biging y Dobbertin (1992), quienes encontraron que los estimadores de la superficie foliar son mejores como indicadores de competencia que los de volumen y diámetro de la copa. Estos investigadores evaluaron diferentes variables a tres porcentajes de altura del árbol (50, 60 y 70 %), en los resultados que presentan para cada porcentaje se observa que el cuadrado medio del error (CME) varía muy poco (2%) entre cada altura considerada.

Lo anterior sugiere que la copa de un árbol posee un gradiente de capacidad fotosintética longitudinal y transversal. En general, la parte baja de la copa no representa ninguna ganancia (Ver Cap. 1. ) por lo que inferir la capacidad fotosintética calculando la superficie foliar de toda la copa o eliminando la parte "inútil" proporcionaría en teoría el mismo valor.

La importancia que la LCEX ocupó en el modelo para el AF puede encontrar una base consistente en la observación anterior; es decir, la superficie foliar es directamente proporcional a la LCEX la cual es a su vez, un mejor estimador de la capacidad fotosintética "real" del árbol. Esto supondría que la parte de la

copa que queda por debajo del traslape de las copas es la porción inútil, mientras que la porción libre (LCEX) es la parte aportadora de fotosintatos. Por supuesto que en términos numéricos puede considerarse tan arbitrariamente como se ha señalado, pero debe pensarse que la capacidad fotosintética desciende gradualmente y que está influida por las características propias de cada individuo.

El modelo  $AF = \beta_0 + \beta_1 \cdot DIP + \beta_2 \cdot LCEXDI + \beta_3 \cdot LCEXVSC$ , donde AF es por sí mismo un índice de competencia, integra los siguientes datos de un árbol:

- Proximidad de sus competidores (estimada por DI y VSC)
- Posición dentro de la población (estimada por P)
- Vigor (estimado por LCEX y VSC)

Como puede verse, LCEX tiene mayor relevancia cuando interacciona con las variables DI y VSC que cuando se asocia directamente a AF, esto puede intentar traducirse en que la variación del AF está influenciada directamente por la interacción entre el vigor del árbol, la proximidad de sus competidores y la presión de éstos sobre el árbol objetivo.

Dado lo anterior el AF, como índice de competencia, cumple sólo con dos de los tres requerimientos que para ello señala Alemdag (citado por Rodríguez, 1987). Es decir, en la formulación del AF se incluyen:

- tamaño del árbol objetivo y de cada competidor (VSC)
- distancia entre el árbol de interés y cada competidor (DI)

El tercer requerimiento, el número total de competidores, es considerado sólo de manera indirecta a través de los promedios de la distancia (D) y la proporción entre los radios promedio de copa de los competidores (VSC).

Con relación al ajuste de las variables DN, VOL y ALT con el modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot AF$ , se observa que todos son significativos (Apéndice 5.5) y que el mayor  $R^2$  es para VOL.

Sin embargo, de la comparación que se establece en el Cuadro 29, se observa que a pesar de que aumenta el  $R^2$  al incluir AF en los modelos de crecimiento, los coeficientes de determinación son menores a los presentados en el Cuadro 28. Es decir, las variables transformadas a logaritmos naturales disminuyen su  $R^2$ . Ello lleva a afirmar que, debido a que sólo se tienen información sobre una etapa temprana en el desarrollo de los árboles de la especie, y que esta etapa corresponde a la de mayor actividad metabólica, el tipo de relaciones entre los diferentes atributos del arbolado corresponden a alguna parte de la línea casi recta que se encuentra en la parte media de la curva sigmoideal general para el crecimiento de las especies. Lo anterior explica el por qué una regresión no logarítmica se ajusta mejor al comportamiento de los datos que una que refleje el comportamiento global de la curva mencionada.

Para detallar lo anterior, en los ajustes de los modelos en los que se omiten las transformaciones logarítmicas (Cuadro 30) se elevan los  $R^2$  en comparación con los ajustes obtenidos por regresión lineal del modelo de Schumacher; esto ocurre principalmente



para DN y VOL (20 y 37% respectivamente), mientras que AF aumenta el coeficiente de determinación del ajuste para ALT en sólo un 3%, lo que refleja la poca dependencia que existe entre el crecimiento en altura y la densidad circundante.

En forma general, se mantiene la tendencia de mayores  $R^2$  en los ajustes que excluyen a las plantaciones PABECAB Y PABECPC. Este hecho, no obstante haber incluido AF como un indicador de competencia, evidencia que existen más variables que influyen en algún porcentaje, no explicado por AF, sobre los atributos DN, ALT y VOL de los árboles estudiados.

#### 4.5.6. CONCLUSIONES

1. Para las plantaciones abarcadas en este estudio, con calidades de sitio similares, el número de competidores por árbol es relativamente constante independientemente de su edad y densidad de población.
2. La superficie lateral de la copa (AF) puede considerarse un indicador de competencia debido a que el 83% de su variación se ve influenciada por variables relacionadas con la densidad y la competencia:

$$AF = \beta_0 + \beta_1(DIP) + \beta_2(LCEXDI) + \beta_3(LCEXVSC)$$

3. LCEX·DI es la interacción más importante dentro del modelo anterior. Esta variable conjuga multiplicativamente a la longitud de la copa expuesta y la distancia promedio entre los competidores y el árbol objetivo.
4. El modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  proporciona los mejores ajustes para las variables DN, VOL y ALT, debido a que la información manejada abarca la etapa de mayor velocidad de crecimiento.
5. Los modelos citados en los puntos 2 y 4 son susceptibles de ser mejorados ya que aproximadamente el 20% de la fluctuación de las variables dependientes no es explicada.

## 5. DISCUSION GENERAL

A través de los análisis realizados puede confirmarse la relación entre diferentes atributos de un árbol (dimensiones de copa y fuste) y algunas variables dependientes de la densidad y de la competencia.

Los análisis sobre competencia se realizaron con base en que el índice de sitio (IS) es similar para todas las plantaciones. Como se confirmó en el subcapítulo 4.2, para generar las curvas de IS sólo se utilizó una separación de 3.3 m, además de que 10 de 15 plantaciones poseen igual IS a la edad base de 11 años ( $IS=12.96$  m). Como observación importante de este capítulo se tiene que el efecto de la densidad influye en la determinación del IS cuando ésta es muy alta, tal es el caso de la plantación PABECAB.

Debe señalarse también que los ajustes obtenidos en las ecuaciones de volumen (mayores al 95%) indican que la metodología seguida para calcular el volumen de los árboles individuales es satisfactoria, lo que permite asumir que las estimaciones generadas alrededor de la variable volumen son confiables.

No obstante lo anterior y debido a que el material de estudio no abarca diferentes ambientes de crecimiento, se considera que tanto la ecuación de volumen como la ecuación de IS obtenidas no deben utilizarse fuera de las condiciones bajo las que fueron elaboradas.

En los análisis realizados sobre correlación simple entre diferentes dimensiones de la copa y algunas variables relacionadas con el tamaño del árbol, así como en los ajustes del modelo de crecimiento de Schumacher sobre tales variables, se observó que la variable definida como superficie lateral de la copa (AF) fue la más relacionada con el tamaño del árbol (DN, ALT y VOL). También pudo advertirse que la influencia de la densidad en el grado de asociación tendió a aumentar el coeficiente de correlación entre las dimensiones de la copa y las del fuste.

En los análisis comparativos de índices de competencia (IC) y en la obtención de un modelo que explicara la variación de AF en función de IC y otras variables relacionadas con la densidad y la competencia, se observó que la longitud de copa expuesta (LCEX) es la variable más significativa. Esta variable, combinada en forma multiplicativa con la distancia promedio entre un árbol y sus competidores ( $LCEX \cdot DI$ ), explicó el 70% de la variación de AF; esta última fue considerada como un estimador del tamaño de un árbol.

La primera relación que se establece con respecto a la importancia de LCEX en la estimación del tamaño de un árbol a través de las dimensiones de su copa, es que los árboles que tienen mayor AF son los de mayor dominancia en el dosel de la población y por lo tanto los mejor desarrollados. Una segunda asociación es la que se desprende de los resultados de Biging y Dobbertin (1992), en los cuales los IC que se basaron en la evaluación de la superficie foliar a diferentes porcentajes de la altura de un árbol fueron mejores que los que incluyeron la totalidad de la copa.

Esto provoca la suposición de que la LCEX puede ser, dependiendo de la especie, un estimador más real del área foliar activa y de la cual dependen directamente las dimensiones de un árbol.

El AF pudo considerarse dependiente de la competencia y de la densidad en un 95%, proporcionando un aumento de hasta el 30% en el ajuste del modelo de Schumacher para el crecimiento en volumen ( $R^2 = 75\%$ ).

La relación casi lineal entre las dimensiones del arbolado y la edad fue evidente al obtenerse coeficientes de determinación ( $R^2$ ) mayores cuando se omitieron transformaciones logarítmicas en las variables dependientes. Ello es explicado perfectamente por la etapa de desarrollo que cubrió el material de estudio y que se representa, esquemáticamente, como la parte que se encuentra entre los dos puntos de inflexión de la curva de crecimiento de la especie. Por lo anterior, los mayores ajustes obtenidos para las variables DN, ALT y VOL fueron con la ecuación  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$ .

Un hecho interesante lo constituyen el número de competidores promedio obtenido para cada densidad de establecimiento. Lo anterior, con base en que el índice de sitio es similar para todas las plantaciones, puede establecerse en 5 competidores por árbol. Esto indica que el control de la densidad de una plantación establecida en las condiciones estudiadas debe hacerse desde los 6 años, momento en que la proporción entre la suma de las áreas individuales de la copa y la superficie de suelo ocupada es mayor a uno. Sin embargo, debe aclararse que el tiempo que pasa

entre el cierre de copas y la influencia de este hecho sobre el crecimiento es muy variable dependiendo tanto de la especie como de las condiciones en que se desarrolle. Por ello se considera que se requiere de estudios encaminados a definir con mayor precisión el momento en el cual las plantaciones de Pinus patula ven afectado el crecimiento de sus individuos una vez que las copas entran en contacto.

## 6. CONCLUSIONES GENERALES

1. La ecuación que proporcionó el mejor ajuste para la estimación del volumen tiene la siguiente expresión

$$V = 2061.78 + 34.51(DN^2A) \quad R^2 = 0.991$$

2. La ecuación de la curva guía obtenida con el modelo de Chapman-Richards es la siguiente:

$$A = 18.5955 \left[ 1 - \exp(-0.173453 * EDAD) \right]^{2.2447}$$

$$R^2 = 0.9013$$

3. Las densidades poblacionales muy elevadas afectan el crecimiento en altura de sus individuos.
4. El modelo de Schumacher es muy adecuado para representar las relaciones variable-edad debido a la rapidez y bondad de su ajuste. Las variables que mejor se ajustaron al este modelo son ALT, CM, LCM, DC y AF.

5. Los análisis realizados por posición silvícola presentaron coeficientes de determinación e índices de correlación con menor valor al aumentar la competencia.
6. La superficie lateral de la copa (AF) puede considerarse un indicador de competencia debido a que el 83% de su variación está influenciada por variables relacionadas con la densidad y la competencia:
7. El ajuste del modelo de crecimiento de Schumacher sobre las variables DN, ALT y VOL, mejora hasta en un 30% al incluirse AF como variable explicatoria.
8. El modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  proporciona los mejores ajustes para las variables DN, ALT y VOL, debido a que la información manejada abarca la etapa de mayor velocidad de crecimiento.
9. Los árboles analizados presentan cinco árboles competidores en promedio, independientemente del número de árboles por hectárea y hasta la edad máxima considerada de 11 años.
10. El cierre de copas se presenta a la edad de 6 años.
11. Es conveniente determinar cuánto tiempo después del cierre de copas, un árbol promedio modifica su ritmo de crecimiento. Ello con el fin de que se prevengan y controlen los efectos de la competencia sobre el rendimiento de las plantaciones.



## 7. LITERATURA CITADA

- ACOSTA MIRELES, M. 1991. Modelo de crecimiento para Pinus montezumae LAMB., en el CEF San Juan Tetla, Pue. Tesis de Maestría, Di.Ci.Fo., UACH., México. 88 p.
- ABETZ, P. 1970. Stand density and branch diameters in the Rhine Valley Scots pine. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 141:233-238.
- ABETZ, P. 1976. Beitrage zum Baumwachstum der h/d-wert-mehr als ein Schlankheitsgrad! Der Forst und Holzwirt 31:389-393.
- AGUIRRE BRAVO, C. 1984. Preliminary growth and yield study of Pinus patula natural stands. Thesis M.Sc. Colorado State University, Forest and Wood Sciences Department. Fort Collins, Co. 102 p.
- \_\_\_\_\_. 1989. Notas para el proyecto de modelación del crecimiento y rendimiento de Pinus patula en el Norte del Estado de Puebla. Inédito. 40 hojas.
- \_\_\_\_\_. y S. WINTER. 1990. Comparisson of the growth and yield performance of natural stands and plantations. Inédito.
- ALEMDAG, I. S. 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. Canadian For. Serv. Forest Management Institute. Information Report FMR-x-103. 39 p.
- ARNEY, J. D. 1972. Computer simulation of Douglas-fir tree and stand growth. Unpublished Ph.D. Thesis, Oregon State Univ., 79 p.
- ARTEAGA MARTINEZ, B. 1985. Indice de sitio para Pinus patula Sch. et Cham., en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, México. 181 p.
- ASSMANN, E. 1970. The principles of Forest Yield Study. Pergamon Press, New York. 506 p.
- BECERRA LUNA, F. 1986. Determinación de una guía de densidad para Pinus patula Schl. et Cham. en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Pue. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, México.
- BELLA, I. E. 1971. A new competition model for individual trees. Forest Sci. 17:364-372.
- BENNETT, F. A. 1960. Spacing and early growth of planted slash pine. Journal of Forestry 58:966-967.

- BIGING, G. S. y DOBBERTIN, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *For. Sci.* 38(3):695-720.
- BRAND, D. G., y S. MAGNUSSEN. 1988. Asymmetric, two-sided competition in even-aged monocultures of red pine. *Can. J. For. Res.* 18:901-910.
- BROWN, G. S. 1965. Point density in stems per acre. *Forest Res. Inst., N.Z. Forest Service. Notes No.38*, 11 p.
- CARREÑO MANJARREZ, M. 1973. Evaluación de una plantación de coníferas de 20 años de edad. Tesis profesional. Depto. de Bosques, Univ. Autón. Chapingo. Chapingo, México. 57 p.
- CARTER, R. E., G. HOYER y C.D. WEBER. 1986a. Factors affecting stem form in immature Douglas-fir stands. In C. D. Oliver, D. Hanley y J. Johnson (eds.), *Douglas-fir: Stand Management for the Future*. Institute of Forest Resources Contribution No.55, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, pp. 230-238.
- \_\_\_\_\_, I. M. MILLER y K. KLINKA. 1986b. Relationships between growth form and stand density in immature Douglas-fir. *Forestry Chronicle* 62:440-445.
- CASTAÑOS, M., L. J. 1962. Evaluación de la calidad de estación de pino patula en el norte de Oaxaca, México. *Bol. Téc. No. 2.*, Inst. Nal. Invest. For., México. 32 p.
- CLUTTER, J. L., J. C. FORTSON, L. V. PIENAAR, G. H. BRISTER y R. L. BAILEY. 1983. *Timber management, a quantitative approach*. New York, Wiley U.S.A. 333 p.
- CURTIS, R. O. 1970. Stand density measures: An interpretation. *For. Sci.* 16(4):403-414.
- DANIEL, P. W. 1982. *Principios de silvicultura*. Segunda Ed. McGraw-Hill., U.S.A. 492 p.
- DANIELS, R. F. y H. E. BURKHART. 1975. Simulation of individual tree growth and stand development in managed loblolly pine plantations. Division of Forestry & Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University. Information Report FWS-5-75, 69 p.
- \_\_\_\_\_. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *For. Sci.* 22:454-456.
- DENGLER, A. 1944. *Waldbau auf ökologische Grundlage*. 3d ed. Springer-Verlag, Berlin. 596 p.

- DEWEY, J. F. 1972. Tectónica de placas. In: Deriva continental y tectónica de placas. Ed. H. Blume, España. Pp:180-194.
- DOYLE, T. W. 1983. Competition and growth relationships in a mixed-aged, mixed species forest community. Ph.D.diss. Univ. of Tenn. 86 p.
- DROLET, J. C., R. M. NEWNHAM y T. B. TSAY. 1972. Branchiness of jack pine, black spruce, and balsam fir in relation to mechanized delimbing. Forest Management Institute, Ottawa, Canada. Information Report FMR-S-34, 34 p.
- EGUILUZ PIEDRA, T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos del género Pinus en México. Tesis profesional. Dpto. de Bosques, Univ. Auton. Chapingo. Chapingo, México.
- EK, A.R. y R.A. MONSERUD. 1974. Forest: A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands. Univ. Wis-Madison, Coll Agric and Life Sci, Res.Rep. R2635. 85 p.
- \_\_\_\_\_. 1975. Methodology for modeling forest stands dynamics. Univ. of Wisconsin at Madison. School of Natural Resources. Dep. For. Staff. Pap. Series no. 2. 30 p.
- EVANS, J. 1974. Some Aspects of the growth of Pinus patula in Swaziland. Commonw. For. Rev. 53(1): 57 - 62.
- \_\_\_\_\_. 1982. Plantation Forestry in the tropics. Oxford University Press, New York.
- FIERROS GONZALEZ, A.M. 1993. Manejo de la densidad en rodales coetáneos. Acad. Nal. de Cienc. For. 14 p.
- FLORES AYALA, E. 1986. Establecimiento de un sitio experimental sobre aclareos en Pinus patula Schl. et Cham. en Tlaxcala. Tesis profesional. Depto. de Bosques, Univ. Autón. Chapingo. Chapingo, México. 93 p.
- FORD, E. D. 1975. Competition and stand structure in some even-aged plant monocultures. Journal of Ecology, 63:311-333.
- GERRARD, D. J. 1969. Competition quotient: a new measure of the competition affecting individual forest trees. Mich. State Univ. Agric. Exp. Sta., Res. Bull. No. 20, 32 p.
- GRAHAM, R. L., T. R. FOX y P. M. DOUGHERTY. Multiple stress factors: the potential role of system models in assessing the impact of multiple stresses on forest productivity. In. Stress physiology and forest productivity. Proceedings of the Physiology Working Group Technical Session, Society of American Foresters National Convention, Fort Collins, Colorado, USA. 1986. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 239 p.

- HALLE, F., R. A. A. OLDEMAN y P. B. TOMLINSON. 1978. Tropical trees and Forests: An Architectural Analysis. Springer-Verlag, New York. 441 p.
- HAMILTON, G. J. 1969. The dependence of volume increment of individual trees on dominance, crown dimensions and competition. *Forestry*, 42:133-144.
- HARPER, J. L. 1977. Population Biology of Plants. Academic London, 892 p.
- HATCH, C. R. 1971. Simulation of an even-aged red pine stand in northern Minnesota. Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. Minn., 120 p.
- HATCH, C. R., D. J. GERRARD y J. C. TAPPEINER, II. 1975. Exposed crown surface area: a mathematical index of individual tree growth potential. *Can. J. For. Res.* 5:224-228.
- HAWLEY, C. R. y D. M. SMITH. 1972. Silvicultura práctica. Trad. por Jaime Terradas. Barcelona, Omega. 544 p.
- HEGYI, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Growth models for Tree and Stand Simulation. Royal College of Forestry; Stockholm, Sweden, pp. 74-90.
- HERNANDEZ, T. 1990. I.N.I.F.A.P. Comunicación personal.
- HUTCHINGS, M. J., y C. S. J. BUDD. 1981. Plant competition and its course through time. *BioScience* 31:640-645.
- INEGI (Inst. Nal. de Estadística, Geografía e Informática). 1987. Síntesis geográfica, nomenclátor y anexo cartográfico del Edo. de Puebla. México, I.N.E.G.I.
- INVENTARIO FORESTAL DEL ESTADO DE PUEBLA, 1978. Publ. No. 44, S.A.R.H., México. 50 p.
- KEISTER, T. D. 1971. A measure of the intraespecific competition experienced by an individual tree in a planted stand. *La. State Univ. Sta. Bull.* 477, 109 p.
- KRAMER, H. 1977. Thinning in Norway spruce stands in the Federal Republic of Germany, paper presented at the University of Maine School of Forest Resources, Orono, September 27, 1977, 17 p.
- LEE, Y. 1967. Stand models for lodgepole pine and limits to their application. Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia, 322 p.
- LIN, J. Y. 1969. Growing space index and stand simulation of young western hemlock in Oregon. Unpublished Ph.D. Thesis. Duke Univ., 182 p.

- LONG, J. N. y F. W. SMITH. 1984. Relation between size and density in developing stands: a description and possible mechanisms. For. Ecol. Manage., 7:191-206.
- LOOK, E. E. M. 1950. The pines of Mexico and British Honduras: a report on a reconnaissance of Mexico and British Honduras during 1947. Bull. Dip. For. S. Afr. No. 35. 244 p.
- LORIMER, C. G. 1983. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. For. Ecol. Manage. 6(1983):343-360.
- MADRIGAL, S. X. 1967. Algunos aspectos ecológicos de los bosques de coníferas mexicanas. México y sus Bosques II(16):11-19.
- MARTIN, G. L. y A. L. EK. 1984. A comparisson of competition measures and growth models for predicting plantation Red Pine diameter and height growth. For. Sci. 30 (3): 731 - 743.
- MASTACHE MONDRAGON, A. 1988. Tratamientos complementarios al suelo en áreas de regeneración de Pinus patula Schl. et Cham. en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Pue. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias forestales, Univ. Autón. Chapingo. Chapingo, Méx.
- MITCHELL, K. J. 1969. Simulation of the growth of even-aged stands of white spruce. Yale Univ. School of Forestry Bull. No. 75, 48 p.
- MOORE, J. A. y C. A. BUDELSKY. 1973. A new index representing individual tree competitive status. Can. J. For. Res. 3:495-500.
- MONROY RIVERA, C. 1989. Curvas de indice de sitio para Pinus patula en Huayacocotla, Ver. I.N.I.F.A.P. Documento inédito. 12 p.
- NEWNHAM, R. M. 1964. The development of a stand model for Douglas-fir. Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia, 201 p.
- O'HARA, K. L. 1988. Stand structure and growing space efficiency following thinning in even-aged Douglas-fir stand. Can. Jour.For.Res. 18:859-866.
- \_\_\_\_\_. 1989. Stand growth efficiency in a Douglas-fir thinning trial. Forestry 62:409-418.
- OLIVER, Ch., and B. C. LARSON. 1990. Forest Stand Dynamics. McGraw-Hill, Inc. New York. 467 p.



- PATERSON, R. S. 1967. Variation in Pinus patula and its application to tree breeding in East Africa. Ph.D. Thesis, Univ. of E. Afr. 237 p.
- PEDRAZZINI, C. y M. A. BASAÑEZ. 1978. Sedimentación del Jurásico Medio Superior en el Anticlinario de Huayacocotla, Cuenca de Chicontepec Estado de Hidalgo y Veracruz, México. Rev. Inst. Mex. Petrol. 10(3):6-25.
- PERRY, J. P. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press, Inc. 231 p.
- PRODUCTOS FORESTALES DE LA TARAHUMARA. 1981. Boletín Técnico. Chihuahua, Chih.
- QUIÑONES, J. O. 1974. Características físicas y mecánicas de la madera de cinco especies mexicanas. Bol. Téc. No. 42. I.N.I.F., México.
- RAMIREZ RAMIREZ, F. y PALMA GUTIERREZ, J. 1980. Proyecto para el establecimiento de una reserva ecológica en Huayacocotla, Veracruz, México. INIREB. 159 p.
- RODRIGUEZ FRANCO, C. 1987. Development of a competition index for Pinus montezumae Lamb. in a temperate forest of Mexico. Ph.D. Dissertation. Yale University. School of Forestry, New Haven. 200 p.
- SAENZ ROMERO, C. 1989. Selección preliminar de cuatro especies para plantaciones forestales en la región de Zacatlán-Chignahuapan, Pue. Documento inédito. Maestría en Ciencias Forestales, Univ. Autón. Chapingo. Chapingo, México. 9 p.
- \_\_\_\_\_. 1991. Control genético de algunas características de progenies de medios hermanos de Pinus patula Schiede y Deppe, procedentes de Sudáfrica y probadas en Veracruz, Méx. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo.
- SARUKHAN KERMES. J. 1981. Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. Serie Premio Nacional Forestal No. 1, S.A.R.H, México. 71 p.
- SATOO, T., K. NEGIS y M. SENDA. 1959. Materials for the studies of growth in the stands: V. Amount of leaves and growth in plantations of Zelkova serrata applied with crown thinning, Bulletin of Tokyo University Forest. 55:101-125.
- SENDA, M., y T. SATOO. 1956. Materials for the study of growth in stands: II. White pine (Pinus strobus) stands of various densities in Hokkaido, Bulletin of the Tokyo University Forest, 52:15-31.

- SMITH, D. M. 1962. The practice of silviculture. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. 578 p.
- SMITH, J. H. G., J. W. KER y J. CSIZMAZIA. 1965. Economics of reforestation of Douglas-fir, western hemlock, and western redcedar in the Vancouver Forest District, Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia. Forestry Bulletin No.3, 144 p.
- SPRUGEL, D. G. 1989. Woody-tissue respiration and photosynthesis. In J. P. Lassoie and T. M. Hinckley (eds.), Methods and Approaches in Tree Ecophysiology, Chemical Rubber Company Press, pp. 1-19.
- SPURR, S. H. 1952. Forest inventory. 1st. ed. The Ronald Press Company, New York. 476 p.
- SPURR, S. H. 1962. A measure of point density. Forest Sci. 8:85-96.
- \_\_\_\_\_. y B. V. BARNES. 1980. Ecología Forestal. AGT Editor, S.A. México. 690 p.
- STIELL, W. M. 1982. Growth of clumped vs. equally spaced trees, Forestry Chronicle 58:23-25.
- STONE, E. L. 1974. The communal root system of red pine: growth of girdled trees. For. Sci. 20:294-305.
- VALENZUELA RUIZ, R. 1980. Evaluación dasométrica y económica de una plantación de Pinus patula Sch. et Cham. en el Municipio de Rafael Ramírez, Ver. Tesis profesional, U.A.Ch., México. 116 p.
- VAN LAAR, A. 1973. Needle biomass, growth and growth distribution of Pinus radiata in South Africa in relation to pruning and thinning. Forschungsberichte, Forstliche Forschungsanstalt, Munchen. 258 p.
- VELA GALVEZ, L. 1980. Contribución a la ecología de Pinus patula. Pub. Esp. No. 19, I.N.I.F., México. 109 p.
- \_\_\_\_\_. y S. R. HERNANDEZ. 1968. Influencia de la luz solar directa sobre el crecimiento de plantas de vivero de Pinus patula Schl. et Cham. y Pinus montezumae Lamb. Bol. Téc. No. 22, I.N.I.F.A.P, México. 15 p.
- VILLIERS, Y. y A. VAN LAAR. 1986. Studies of growth and stand structure in plantations of Pinus patula. South African For. Jour. #136: 22 - 25.
- WOODMAN, J. N. 1971. Variation of netphotosynthesis within the crown of a large forest-grown conifer. Photosynthetica 5:50-54.



- WORMALD, T. J. 1975. Pinus patula. Tropical Forestry Papers No.7. Comm. For. Inst., Oxford, England. 234 p.
- ZAVALA CHAVEZ, F. 1990. Clave para la identificación de especies de Pinus de México. Un enfoque sistemático. Serie de apoyo académico No. 41, Di.Ci.Fo., U.A.Ch, México.
- ZEPEDA BAUTISTA, E. M. 1983. Análisis de diez procedimientos para estimar incremento volumétrico de coníferas. Tesis de Licenciatura, Di.Ci.Fo., UACH., México. 636p.
- 
- \_\_\_\_\_. 1990. Predictor de rendimientos maderables probables de Pinus patula SCHIEDDE Y DEPPE., de Perote, Ver., México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 331 p.
- ZOBEL, B. J., Van WYK, G., and STAHL, D. 1987. Growing Exotic Forests. John Wiley and Sons., Inc. U.S.A. 508 p.

## A P E N D I C E

**APENDICE 1.1.** Análisis de varianza para el ajuste del modelo  $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$  y  $V = \beta_0 + \beta_1 (DN^2 A)$  sobre todas las observaciones (TODOS), exceptuando las plantaciones PABECAB y PABECPC (SINPABE), y por posición silvícola

Análisis de varianza para el modelo  $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$

ARCHIVO: TODOS

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	3078.40113	1539.20057	11094.815	0.0000
Estándar	936	129.85271	0.13873		
C Total	938	3208.25384			
Raíz CME		0.37247	R-cuadrada	0.9595	
DepMedio		8.79595	R-cuad Aj	0.9594	
C.V.		4.23453			

Parámetro Estimado

Variable	gl	Parámetro Estimado	Estándar Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	5.383158	0.04627033	116.341	0.0000
LNDN	1	1.628625	0.03272066	49.774	0.0001
LNA	1	0.574316	0.05079225	11.307	0.0001

ARCHIVO: SINPABE

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	2110.55551	1055.27775	7543.450	0.0000
Estándar	657	91.90987	0.13989		
C Total	659	2202.46538			
Raíz CME		0.37402	R-cuadrada	0.9583	
DepMedio		8.70831	R-cuad Aj	0.9581	
C.V.		4.29502			

Parámetro Estimado

Variable	gl	Parámetro Estimado	Estándar Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	5.379724	0.06036624	89.118	0.0000
LNDN	1	1.493059	0.04674284	31.942	0.0001
LNA	1	0.707334	0.07318929	9.664	0.0001

ARCHIVO: D

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	761.96003	380.98001	5036.107	0.0001
Estándar	208	15.73514	0.07565		
C Total	210	777.69516			
Raíz CME		0.27504	R-cuadrada	0.9798	
DepMedio		9.30292	R-cuad Aj	0.9796	
C.V.		2.95654			

Variable	gl	Parámetro Estimado		T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
		Parámetro Estimado	Estándar Estándar		
INTERCEP	1	5.276294	0.07864205	67.093	0.0001
LNDN	1	1.389651	0.06780355	20.495	0.0001
LNA	1	0.916643	0.10424632	8.793	0.0001

ARCHIVO: C

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	440.16074	220.08037	3351.656	0.0001
Estándar	155	10.17779	0.06566		
C Total	157	450.33853			
Raíz CME		0.25625	R-cuadrada	0.9774	
DepMedio		9.01101	R-cuad Aj	0.9771	
C.V.		2.84372			

Variable	gl	Parámetro Estimado		T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
		Parámetro Estimado	Estándar Estándar		
INTERCEP	1	5.240255	0.10075977	52.007	0.0001
LNDN	1	1.085070	0.09187219	11.811	0.0001
LNA	1	1.216113	0.13880830	8.761	0.0001

ARCHIVO: I

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	364.69982	182.34991	1334.950	0.0001
Estándar	147	20.07973	0.13660		
C Total	149	384.77955			
Raíz CME		0.36959	R-cuadrada	0.9478	
DepMedio		8.69054	R-cuad Aj	0.9471	
C.V.		4.25279			

Variable	gl	Parámetro Estimado		T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
		Parámetro Estimado	Estándar Estándar		
INTERCEP	1	5.145668	0.13684758	37.601	0.0001
LNDN	1	1.133485	0.12599746	8.996	0.0001
LNA	1	1.150508	0.17936566	6.414	0.0001

ARCHIVO: S

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	259.97609	129.98805	526.453	0.0001
Estándar	138	34.07395	0.24691		
C Total	140	294.05005			
Raíz CME		0.49690	R-cuadrada	0.8841	
DepMedio		7.49820	R-cuad Aj	0.8824	
C.V.		6.62697			

Variable	gl	Parámetro Estimado		T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
		Parámetro Estimado	Estándar Estándar		
INTERCEP	1	5.645568	0.16181208	34.890	0.0001
LNDN	1	1.585594	0.09809060	16.165	0.0001
LNA	1	0.312347	0.16916070	1.846	0.0670

Análisis de varianza para el modelo  $V = \beta_0 + \beta_1(DN^2A)$

ARCHIVO: SINPABE

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	849613794594	849613794594	79137.457	0.0000
Estándar	658	7064238557.5	10735924.859		
C Total	659	856678033151			
Raíz CME	3276.57212	R-cuadrada	0.9918		
Dep Mean	21697.32470	R-cuad Aj	0.9917		
C.V.	15.10127				

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	2061.786180	145.39088996	14.181	0.0001
D2H	1	34.518545	0.12270477	281.314	0.0000

ARCHIVO: D

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	0.56048	0.56048	29997.894	0.0001
Estándar	208	0.00389	0.00002		
C Total	209	0.56437			
Raíz CME	0.00432	R-cuadrada	0.9931		
Dep Mean	0.03744	R-cuad Aj	0.9931		
C.V.	11.54429				

Parámetro Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	0.002663	0.00035958	7.405	0.0001
D2H	1	0.000034074	0.00000020	173.199	0.0001

ARCHIVO: C

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	125824613581	125824613581	10411.946	0.0001
Estándar	156	1885203755.6	12084639.459		
C Total	157	127709817336			
Raíz CME	3476.29680	R-cuadrada	0.9852		
Dep Mean	22415.50921	R-cuad Aj	0.9851		
C.V.	15.50844				

Parámetro Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	2411.712920	338.99418244	7.114	0.0001
D2H	1	34.651199	0.33958799	102.039	0.0001

ARCHIVO: I

# Analysis of Variance

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	57451652175	57451652175	14881.299	0.0001
Estándar	148	571377851.88	3860661.1614		
C Total	149	58023030027			
Raíz CME	1964.85652	R-cuadrada	0.9902		
Dep Mean	15420.52080	R-cuad Aj	0.9901		
C.V.	12.74183				

## Parámetro Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	1223.891153	198.19485949	6.175	0.0001
D2H	1	37.310529	0.30585176	121.989	0.0001

ARCHIVO: S

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	5181303542.8	5181303542.8	8779.527	0.0001
Estándar	139	82031887.048	590157.46078		
C Total	140	5263335429.9			
Raíz CME	768.21707	R-cuadrada	0.9844		
Dep Mean	4241.43856	R-cuad Aj	0.9843		
C.V.	18.11218				

## Parámetro Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	763.652286	74.58652974	10.238	0.0001
D2H	1	38.499755	0.41088700	93.699	0.0001

## APENDICE 1.2. Análisis de varianza de los modelos

$$V = \beta_0 (DN)^{\beta_1} (A)^{\beta_2} \text{ y}$$

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$$

MODELO  $V = \beta_0 (DN)^{\beta_1} (A)^{\beta_2}$  (método no lineal)

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresion	3	1.1622583720	0.3874194573
Residual	657	0.0051304347	0.0000078089
Total no corregido	660	1.1673888067	
(Total corregido)	659	0.8566780332	

Parámetro	Estimado	Error Est. Asintótico	Intervalo de confianza asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.000060208	0.00000192951	0.0000564191	0.0000639967
B2	1.786100335	0.01253694919	1.7614826178	1.8107180522
B3	1.026848908	0.01859117366	0.9903430367	1.0633547795

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.024682085	-0.663637881
B2	-0.024682085	1	-0.729387126
B3	-0.663637881	-0.729387126	1

MODELO  $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln(DN) + \beta_2 \ln(A)$

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	2	2110.55551	1055.27775	7543.450	0.0000
Error	657	91.90987	0.13989		
Total C	659	2202.46538			
Raíz CME	0.37402	R-cuadrada	0.9583		
Dep Mean	-5.10720	R-cuad Aj	0.9581		
C.V.	-7.32344				

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	-8.435787	0.06036624	-139.743	0.0000
LNDN	1	1.493059	0.04674284	31.942	0.0001
LNA	1	0.707334	0.07318929	9.664	0.0001



**Apéndice 2.1. Datos altura-edad obtenidos de parcelas temporales y análisis troncales, que fueron utilizados para obtener curvas de índice de sitio**

**Datos obtenidos de parcelas temporales**

Edad	Altura	Edad	Altura	Edad	Altura	Edad	Altura
2	1.83	4	4.2	7	10.1	11	14.1
2	1.86	4	4.1	7	9.8	11	14.1
2	1.89	4	3.6	7	9.8	11	14.3
2	1.97	4	3.6	7	10.6	11	14.7
2	2.0	4	3.7	7	10.7	11	15.1
2	2.08	4	4.0	7	10.9	11	13.8
2	2.15	4	4.0	7	11.0	11	13.9
2	2.25	4	3.4	7	11.0	11	14.2
2	2.25	4	3.5	8	11.6	11	14.2
2	2.4	4	3.5	8	10.4	11	14.7
2	1.9	4	4.0	8	10.3	11	14.0
2	1.9	4	4.0	8	10.2	11	14.2
2	2.0	6	6.5	8	10.1	11	14.2
2	2.0	6	7.0	8	9.5	11	14.7
2	2.3	6	7.0	8	9.65	11	15.6
2	1.73	6	7.0	8	9.8	11	11.0
2	1.45	6	8.7	8	9.8	11	11.3
2	1.22	6	6.65	8	9.85	11	11.4
2	1.17	6	6.7	8	11.1	11	11.7
2	1.17	6	6.75	8	11.1	11	11.7
2	1.41	6	6.95	8	11.0	11	11.5
2	1.21	6	7.4	8	11.0	11	12.0
2	1.18	6	7.0	8	10.9	11	12.0
2	1.17	6	7.1	8	9.5	11	12.5
2	1.16	6	7.15	8	9.5	11	12.6
2	1.12	6	7.3	8	9.8	11	11.5
2	1.11	6	7.6	8	10.3	11	11.6
2	1.08	6	6.0	8	10.35	11	11.8
2	1.07	6	6.0	8	9.7	11	12.0
2	1.15	6	6.0	8	9.8	11	12.2
3	1.8	6	6.0	8	10.0	11	10.8
3	1.8	6	6.0	8	10.0	11	11.5
3	1.89	6	6.62	8	10.0	11	11.5
3	1.97	6	5.5	8	9.5	11	11.5
3	2.1	6	5.5	8	9.7	11	11.58
3	1.75	6	5.5	8	9.8	11	10.8
3	1.76	6	5.5	8	10.0	11	11.0
3	2.02	6	5.15	8	10.5	11	11.4
3	2.39	6	5.2	11	13.9	11	11.5
3	2.43	6	5.2	11	13.9	11	12.5
3	2.0	6	5.4	11	15.0	11	11.5
3	2.05	6	6.3	11	15.1	11	11.5
3	2.1	7	9.5	11	15.8	11	11.7
3	2.1	7	9.6	11	13.0	11	11.8
3	2.28	7	9.8	11	13.4	11	12.0
4	4.7	7	9.85	11	14.2		
4	4.6	7	10.1	11	14.28		
4	4.3	7	11.3	11	14.4		

# Datos obtenidos de análisis troncales

Edad	Altura	Edad	Altura	Edad	Altura	Edad	Altura	Edad	Altura
2	1.30	3	2.91	5	3.20	7	12.33	10	10.30
2	1.30	3	1.78	5	5.22	7	10.26	10	8.30
2	0.86	3	3.01	5	6.30	7	6.30	10	10.30
2	2.12	3	2.26	5	5.10	7	5.30	10	10.30
2	1.82	3	2.00	5	4.96	7	6.30	10	10.30
2	1.88	3	2.09	5	5.30	7	6.99	10	9.93
2	2.20	3	1.84	5	4.02	7	6.30	10	11.30
2	3.08	3	3.10	5	4.04	7	6.13	10	15.49
2	0.96	4	3.30	5	5.30	7	6.81	10	13.70
2	1.30	4	4.22	5	5.17	7	10.42	10	13.30
2	1.30	4	4.30	5	7.30	7	8.30	10	14.12
2	1.30	4	5.30	5	5.30	7	7.96	11	14.10
2	0.90	4	4.30	5	7.30	7	12.30	11	12.67
2	1.30	4	5.30	5	6.15	7	9.22	11	17.05
2	1.30	4	4.30	5	5.30	7	8.26	11	11.44
2	1.30	4	7.26	5	7.30	7	9.63	11	10.30
2	2.30	4	4.97	6	5.30	8	8.30	11	12.47
2	2.30	4	1.99	6	7.06	8	10.10	11	11.24
2	1.03	4	1.82	6	8.30	8	12.30	11	11.46
2	0.82	4	3.05	6	7.88	8	10.78	11	11.52
2	1.30	4	2.98	6	7.24	8	9.80	11	12.96
2	1.30	4	2.30	6	7.30	8	11.15	11	15.80
2	1.96	4	1.94	6	5.73	8	7.95	11	13.80
2	1.30	4	2.30	6	10.30	8	6.30	11	14.16
2	2.30	4	4.95	6	9.30	8	8.30	11	15.10
2	1.30	4	4.3	6	4.88	8	8.30		
2	1.27	4	4.30	6	5.30	8	7.22		
2	1.17	4	3.16	6	5.30	8	7.30		
2	1.30	4	1.92	6	4.1	8	9.06		
2	1.58	4	2.26	6	4.30	8	10.54		
3	2.30	4	3.90	6	5.30	8	10.20		
3	1.98	4	3.30	6	8.08	8	13.3		
3	2.30	4	4.11	6	6.30	8	11.30		
3	2.98	4	4.30	6	6.20	8	9.30		
3	2.68	4	4.30	6	6.38	8	11.06		
3	3.30	4	4.01	6	5.62	9	10.30		
3	3.11	4	3.30	6	5.64	9	11.26		
3	5.30	4	5.30	6	7.59	9	13.30		
3	3.30	5	4.30	6	7.58	9	9.01		
3	1.30	5	4.96	6	8.06	9	8.30		
3	1.30	5	7.20	6	7.37	9	9.18		
3	1.71	5	6.30	6	9.30	9	9.30		
3	1.68	5	6.30	6	7.11	9	8.30		
3	2.30	5	6.10	6	6.30	9	8.21		
3	1.30	5	5.30	6	9.30	9	10.01		
3	1.30	5	8.30	7	7.30	9	13.98		
3	3.30	5	6.30	7	8.30	9	12.04		
3	2.30	5	3.30	7	10.30	9	11.30		
3	2.16	5	2.99	7	9.13	9	12.74		
3	1.96	5	4.26	7	9.30	10	11.30		
3	1.58	5	3.96	7	9.06	10	12.44		
3	1.65	5	3.22	7	8.04	10	15.30		

**Apéndice 2.2.** Detalle del ajuste del modelo para índice de sitio de Chapman-Richards y parámetros obtenidos para la ecuación de la curva guía (método no lineal).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresion	3	27437.730048	9145.910016
Residual	419	746.207652	1.780925
Total no corregido	422	28183.937700	
(Total corregido)	421	7562.319214	

Parámetro	Estimado	Error Est. Asintótico	Intervalo de confianza asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	18.59551527	1.3557425967	15.930570967	21.260459565
B2	-0.17345358	0.0231660249	-0.218990371	-0.127916791
B3	2.24470547	0.2154684429	1.821165340	2.668245605

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	0.9745983716	-0.895088641
B2	0.9745983716	1	-0.968801283
B3	-0.895088641	-0.968801283	1

**Apéndice 3.1.** Análisis de correlación simple entre variables relacionadas con el tamaño del árbol y con la competencia, incluyendo todas las observaciones.

Variable	Símbolo	N	Mean	Std Dev	Sum	Minimum	Maximum
DIAMETRO NORMAL	(DN)	2216	9.67694	5.38765	21444	0.15915	31.51261
ALTURA TCTAL	(ALT)	2673	6.49340	3.83741	17357	0.01000	17.60000
VOLUMEN EN CM <sup>3</sup>	(VOL)	2213	45468	63726	100621624	2063	522746
DIAMETRO DEL CUELLO	(DC)	2626	11.99583	7.04147	31501	0.15915	39.78864
GROSOR DE CORTEZA	(GC)	2020	0.31445	0.18088	635.18000	0	1.16000
EDAD		2717	7.58815	3.69343	20617	2.00000	15.00000
LONGITUD DE COPA VIVA	(LCM)	2620	4.27028	2.54250	11188	0.01000	15.50000
LONGITUD DE COPA EXPUESTA	(LCE)	2015	1.81590	1.38185	3659	0	8.50000
DIAMETRO PROMEDIO DE COPA	(CM)	2626	2.55271	1.46229	6703	0.01000	9.50000
AREA FOLIAR	(AF)	2616	23.37639	24.84007	61153	0.000443	222.45106
VIGOR	(VI)	2620	0.67356	0.16986	1765	0.06780	1.00000
ALTURA DE FUSTE LIMPIO	(AFL)	2620	2.34667	1.96424	6148	0	9.38000
INDICE DE COMPETENCIA	(IC)	2620	0.32644	0.16986	855.26832	0	0.93220
DIAMETRO DOMINANTE PROMEDIO	(DDP)	2346	12.59115	6.00864	29539	1.31800	29.47000
ALTURA DOMINANTE PROMEDIO	(ADP)	2717	8.57071	4.43579	23287	1.10600	16.56000

	DN	ALT	VOL	DC	GC	EDAD	LCM	LCE	CM	AF	VI	AFL	IC	DDP	ADP
DN	1.00000	0.85075	0.88416	0.97074	0.92978	0.56831	0.85791	0.43200	0.88512	0.86962	-0.01669	0.41195	0.01669	0.80186	0.72976
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.4326	0.0001	0.4326	0.0	0.0
	2216	2213	2213	2216	2017	2216	2212	2012	2213	2210	2212	2212	2212	2216	2216
ALT		1.00000	0.72789	0.88150	0.75576	0.85323	0.87732	0.27957	0.81355	0.75570	-0.29158	0.78366	0.29158	0.78211	0.90552
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0
			2213	2623	2017	2673	2620	2013	2623	2616	2620	2620	2620	2302	2673
VOL			1.00000	0.83481	0.79733	0.51429	0.76795	0.46873	0.81310	0.90724	0.02628	0.31292	-0.02628	0.69568	0.59461
			0.0	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.2167	0.0001	0.2167	0.0	0.0001
			2213	2213	2014	2213	2212	2010	2210	2210	2212	2212	2212	2213	2213
DC				1.00000	0.92058	0.70552	0.89102	0.41379	0.90892	0.84851	-0.06013	0.53298	0.06013	0.80525	0.81284
				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.0021	0.0001	0.0021	0.0	0.0
				2626	2020	2626	2606	2015	2610	2603	2606	2606	2606	2299	2626
GC					1.00000	0.40431	0.78367	0.40709	0.83262	0.80021	0.09083	0.27039	-0.09083	0.71720	0.62715
					0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001
					2020	2020	2017	2014	2018	2015	2017	2017	2017	2020	2020
EDAD						1.00000	0.63658	-0.12827	0.67240	0.58554	-0.49554	0.79940	0.49554	0.76423	0.93464
						0.0	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0
						2717	2620	2015	2626	2616	2620	2620	2620	2346	2717
LCM							1.00000	0.61439	0.87974	0.88416	0.14402	0.38941	-0.14402	0.70447	0.73990
							0.0	0.0001	0.0	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0
							2620	2013	2616	2616	2620	2620	2620	2297	2620
LCE								1.00000	0.48203	0.56711	0.54730	-0.26841	-0.54730	0.10002	-0.10998
								0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
								2015	2013	2011	2013	2013	2013	2015	2015
CM									1.00000	0.92477	0.03127	0.42006	-0.03127	0.75899	0.75740
									0.0	0.0	0.1099	0.0001	0.1099	0.0	0.0
									2626	2616	2616	2616	2616	2296	2626
AF										1.00000	0.12361	0.30561	-0.12361	0.72197	0.64853
										0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0
										2616	2616	2616	2616	2293	2616
VI											1.00000	-0.74603	-1.00000	-0.22108	-0.41347
											0.0	0.0	0.0	0.0001	0.0001
											2620	2620	2620	2297	2620
AFL												1.00000	0.74603	0.50552	0.77150
												0.0	0.0	0.0001	0.0
												2620	2620	2297	2620
IC													1.00000	0.22108	0.41347
													0.0	0.0001	0.0001
														2297	2620
DDP														1.00000	0.92120
														0.0	0.0
														2346	2346
ADP															1.00000
															0.0
															2717

15 Variables: DN=DIAMETRO NORMAL ALT=ALTURA TOTAL VOL=VOLUMEN (CM<sup>3</sup>) DC=DIAMETRO DE CUELLO GC=GROSOR DE CORTEZA EDAD  
 LCM=LONGITUD DE COPA VIVA LCE=LONGITUD DE COPA EXPUESTA CM=DIAMETRO PROMEDIO DE COPA AF=AREA FOLIAR VI=VIGOR  
 AFL=ALTURA DE FUSTE LIMPIO IC=INDICE DE COMPETENCIA DDP=DIAMETRO DOMINANTE PROMEDIO ADP= ALTURA DOMINANTE PROMEDIO.

**Apéndice 3.2.** Análisis de correlación simple entre variables relacionadas con el tamaño del árbol y con la competencia, excluyendo a las plantaciones PABECAB y PABECPC.

Variable		N	Media	Desv Est	Suma	Mínimo	Máximo
DIAMETRO NORMAL	(DN)	1989	9.39238	4.76051	18681	0.15915	30.87599
ALTURA TOTAL	(ALT)	2445	6.12239	3.70600	14969	0.01000	15.80000
VOLUMEN EN CM <sup>3</sup>	(VOL)	1986	38686	42782	76829708	2063	471864
DIAMETRO DEL CUELLO	(DC)	2398	11.68684	6.63133	28025	0.15915	39.15202
GROSOR DE CORTEZA	(GC)	1792	0.31127	0.15999	557.80000	0	0.95000
EDAD		2489	6.96826	3.20774	17344	2.00000	11.00000
LONGITUD DE COPA VIVA	(LCM)	2392	4.13496	2.33235	9891	0.01000	10.60000
LONGITUD DE COPA EXPUESTA	(LCE)	1787	1.79487	1.21528	3207	0	6.00000
DIAMETRO PROMEDIO DE COPA	(CM)	2399	2.45946	1.28007	5900	0.01000	6.35000
AREA FOLIAR	(AF)	2389	20.99937	17.54339	50167	0.0004443	91.26821
VIGOR	(VI)	2392	0.69017	0.15076	1651	0.06780	1.00000
ALTURA DE FUSTE LIMPIO	(AFL)	2392	2.11453	1.78210	5058	0	9.38000
INDICE DE COMPETENCIA	(IC)	2392	0.30983	0.15076	741.11630	0	0.93220
DIAMETRO DOMINANTE PROMEDIO	(DDP)	2118	12.15255	5.31808	25739	1.31800	20.17000
ALTURA DOMINANTE PROMEDIO	(ADP)	2489	8.12176	4.31219	20215	1.10600	14.74000

	DN	ALT	VOL	DC	GC	EDAD	LCM	LCE	CM	AF	VI	AFL	IC	DDP	ADP
DN	1.00000 0.0 1989	0.89417 0.0 1986	0.90422 0.0 1986	0.96691 0.0 1989	0.91697 0.0 1790	0.68687 0.0001 1989	0.81363 0.0 1985	0.19529 0.0001 1785	0.85418 0.0 1987	0.87342 0.0 1984	-0.26842 0.0001 1985	0.66355 0.0001 1985	0.26842 0.0001 1985	0.75714 0.0 1989	0.75163 0.0 1989
ALT		1.00000 0.0 2445	0.81796 0.0 1986	0.91623 0.0 2395	0.80294 0.0 1789	0.87610 0.0 2445	0.91362 0.0 2392	0.15629 0.0001 1785	0.86536 0.0 2396	0.87429 0.0 2389	-0.32496 0.0001 2392	0.84668 0.0 2392	0.32496 0.0001 2392	0.82713 0.0 2074	0.90726 0.0 2445
VOL			1.00000 0.0 1986	0.86688 0.0 1986	0.81173 0.0 1787	0.58156 0.0001 1986	0.70850 0.0001 1985	0.20156 0.0001 1783	0.75797 0.0 1984	0.83183 0.0 1984	-0.25981 0.0001 1985	0.64693 0.0001 1985	0.25981 0.0001 1985	0.61657 0.0001 1986	0.62681 0.0001 1986
DC				1.00000 0.0 2398	0.90136 0.0 1792	0.82066 0.0 2398	0.87471 0.0 2378	0.18589 0.0001 1787	0.90509 0.0 2383	0.89159 0.0 2376	-0.22678 0.0001 2378	0.72205 0.0 2378	0.22678 0.0001 2378	0.78321 0.0 2071	0.84713 0.0 2398
GC					1.00000 0.0 1792	0.56037 0.0001 1792	0.70817 0.0001 1789	0.18734 0.0001 1786	0.78439 0.0 1791	0.79323 0.0 1788	-0.19593 0.0001 1789	0.55681 0.0001 1789	0.19593 0.0001 1789	0.63550 0.0001 1792	0.63788 0.0001 1792
EDAD						1.00000 0.0 2489	0.72329 0.0 2392	-0.30567 0.0001 1787	0.77635 0.0 2399	0.69538 0.0 2389	-0.47431 0.0001 2392	0.82854 0.0 2392	0.47431 0.0001 2392	0.90898 0.0 2118	0.96133 0.0 2489
LCM							1.00000 0.0 2392	0.45265 0.0001 1785	0.86179 0.0 2389	0.91717 0.0 2389	0.02440 0.2329 2392	0.55720 0.0001 2392	-0.02440 0.2329 2392	0.63259 0.0001 2069	0.76265 0.0 2392
LCE								1.00000 0.0 1787	0.23478 0.0001 1786	0.34787 0.0001 1784	0.49400 0.0001 1785	-0.21909 0.0001 1785	-0.49400 0.0001 1785	-0.32861 0.0001 1787	-0.33761 0.0001 1787
CM									1.00000 0.0 2399	0.93718 0.0 2389	-0.14423 0.0001 2389	0.63718 0.0001 2389	0.14423 0.0001 2389	0.67455 0.0001 2069	0.79108 0.0 2399
AF										1.00000 0.0 2389	-0.06052 0.0031 2389	0.58500 0.0001 2389	0.06052 0.0031 2389	0.63001 0.0001 2066	0.72075 0.0 2389
VI											1.00000 0.0 2392	-0.69562 0.0 2392	-1.00000 0.0 2392	-0.52281 0.0001 2069	-0.46503 0.0001 2392
AFL												1.00000 0.0 2392	0.69562 0.0 2392	0.77721 0.0 2069	0.84576 0.0 2392
IC													1.00000 0.0 2392	0.52281 0.0001 2069	0.46503 0.0001 2392
DDP														1.00000 0.0 2118	0.96963 0.0 2118
ADP															1.00000 0.0 2489

15 Variables: DN=DIAMETRO NORMAL ALT=ALTURA TOTAL VOL=VOLUMEN (CM<sup>3</sup>) DC=DIAMETRO DE CUELLO GC=GROSOR DE CORTEZA EDAD  
 LCM=LONGITUD DE COPA VIVA LCE=LONGITUD DE COPA EXPUESTA CM=DIAMETRO PROMEDIO DE COPA AF=AREA FOLIAR VI=VIGOR  
 AFL=ALTURA DE FUSTE LIMPIO IC=INDICE DE COMPETENCIA DDP=DIAMETRO DOMINANTE PROMEDIO ADP= ALTURA DOMINANTE PROMEDIO.



**Apéndice 4.1.** Detalle del ajuste de los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Backman, por métodos no lineales, sobre todas las observaciones (TODOS) y excluyendo las plantaciones PABECAB y PABECPC (SINPABE).

ARCHIVO: TODOS

VARIABLE: ALTURA

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	36002.678782	18001.339391
Residual	665	2286.092918	3.437734
Total no corregido	667	38288.771700	
(Total Corregido)	666	9930.031537	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	18.69791147	0.56721547273	17.584144462	19.811678485
B2	-7.29586140	0.27382995814	-7.833545563	-6.758177246

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.946699844
B2	-0.946699844	1

MODELO: CHAPMAN-RICHARDS

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	36040.965065	12013.655022
Residual	664	2247.806635	3.385251
Total no corregido	667	38288.771700	
(Total Corregido)	666	9930.031537	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	11.71400971	0.38489677405	10.958236061	12.469783352
B2	-0.27053325	0.02616774686	-0.321915578	-0.219150916
B3	3.49165525	0.48049360125	2.548170072	4.435140424

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	0.8923120106	-0.763855823
B2	0.8923120106	1	-0.961407552
B3	-0.763855823	-0.961407552	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
--------	----	-------------------	----------------

Regresion	3	36034.908335	12011.636112
Residual	664	2253.863365	3.394373
Total no corregido	667	38288.771700	
(Total Corregido)	666	9930.031537	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	-2.885768937	0.38007242464	-3.6320696114	-2.1394682636
B2	3.741714148	0.34948211462	3.0554798391	4.4279484569
B3	-0.661939713	0.07973202553	-0.8184995167	-0.5053799083

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.993615472	0.9781358508
B2	-0.993615472	1	-0.99522081
B3	0.9781358508	-0.99522081	1

ARCHIVO: SINPABE

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	29443.842653	14721.921327
Residual	607	1824.534647	3.005823
Total no corregido	609	31268.377300	
(Total Corregido)	608	8394.097296	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	19.96305408	0.71555724211	18.557763147	21.368345013
B2	-7.75520992	0.30475289690	-8.353717567	-7.156702269

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.959449133
B2	-0.959449133	1

MODELO: CHAPMAN-RICHARDS

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	29469.012841	9823.004280
Residual	606	1799.364459	2.969248
Total no corregido	609	31268.377300	
(Total Corregido)	608	8394.097296	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	12.08503553	0.61561692505	10.876014532	13.294056531
B2	-0.25654967	0.03141062951	-0.318237559	-0.194861774
B3	3.32563896	0.49864052524	2.346349983	4.304927929

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	0.93945091	-0.836758532
B2	0.93945091	1	-0.966869759
B3	-0.836758532	-0.966869759	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	29465.595737	9821.865246
Residual	606	1802.781563	2.974887
Total no corregido	609	31268.377300	
(Total Corregido)	608	8394.097296	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	-2.996582127	0.47241617208	-3.9243686272	-2.0687956264
B2	3.838317013	0.46026402611	2.9343963273	4.7422376980
B3	-0.681840139	0.11113672586	-0.9001035265	-0.4635767518

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.994343359	0.981121381
B2	-0.994343359	1	-0.996024893
B3	0.981121381	-0.996024893	1

ARCHIVO: TODOS

VARIABLE: DN

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	58141.494108	29070.747054
Residual	565	10448.037597	18.492102
Total no corregido	567	68589.531705	
(Total Corregido)	566	17314.482745	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	24.33836435	1.4202043966	21.548795117	27.127933581
B2	-7.53192200	0.5346887450	-8.582159048	-6.481684954

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.952151577
B2	-0.952151577	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	58313.724068	19437.908023
Residual	564	10275.807637	18.219517
Total no corregido	567	68589.531705	
(Total Corregido)	566	17314.482745	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	-4.628819885	0.97386206835	-6.5416896079	-2.7159501626
B2	5.594637571	0.88402818637	3.8582204680	7.3310546745
B3	-1.086733864	0.19883541583	-1.4772883987	-0.6961793298

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.996466776	0.9874937379
B2	-0.996466776	1	-0.997175728
B3	0.9874937379	-0.997175728	1

ARCHIVO: SINPABE

VARIABLE: DN

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	49408.690868	24704.345434
Residual	507	5967.695223	11.770602
Total no corregido	509	55376.386092	
(Total Corregido)	508	12443.756562	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	28.38224710	1.6845023018	25.072731418	31.691762781
B2	-8.59774031	0.5170826983	-9.613644708	-7.581835910

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.965592575
B2	-0.965592575	1

MODELO: CHAPMAN-RICHARDS

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	49587.774430	16529.258143
Residual	506	5788.611661	11.439944
Total no corregido	509	55376.386092	
(Total Corregido)	508	12443.756562	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	13.59596010	0.5037195742	12.606305349	14.585614849
B2	-0.47482378	0.0666938477	-0.605856769	-0.343790783

B3 12.01222967 4.5308763253 3.110444816 20.914014526

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	0.827654352	-0.746253991
B2	0.827654352	1	-0.984045426
B3	-0.746253991	-0.984045426	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	49625.591766	16541.863922
Residual	506	5750.794325	11.365206
Total no corregido	509	55376.386092	
(Total Corregido)	508	12443.756562	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	-8.566217009	1.5753989401	-11.661393619	-5.471040399
B2	9.350015565	1.4875549825	6.427425438	12.272605692
B3	-1.968164240	0.3477852908	-2.651455863	-1.284872618

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.998641393	0.995186403
B2	-0.998641393	1	-0.998921529
B3	0.995186403	-0.998921529	1

ARCHIVO: TODOS

VARIABLE: AF

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	506496.10880	253248.05440
Residual	649	270576.01356	416.91219
Total no corregido	651	777072.12236	
(Total Corregido)	650	407963.09178	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	100.8499620	10.383586607	80.460152365	121.23977156
B2	-10.8774047	1.011834991	-12.864302281	-8.89050718

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.960392061
B2	-0.960392061	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
--------	----	-------------------	----------------

Regresion	3	509327.69817	169775.89939
Residual	648	267744.42419	413.18584
Total no corregido	651	777072.12236	
(Total Corregido)	650	407963.09178	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.468142258	0.89853429306	-1.2962765897	2.2325611055
B2	1.229056069	0.82079487655	-0.3827087370	2.8408208742
B3	0.031130293	0.18681440529	-0.3357103049	0.3979708917

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.988654185	0.963163169
B2	-0.988654185	1	-0.992441552
B3	0.963163169	-0.992441552	1

ARCHIVO: SINPABE

VARIABLE: AF

MODELO: SCHUMACHER

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	2	361544.94778	180772.47389
Residual	591	94833.01840	160.46196
Total no corregido	593	456377.96618	
(Total Corregido)	592	186409.54550	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	79.38165218	6.3639455141	66.882752601	91.880551761
B2	-8.87067619	0.6992203828	-10.243957174	-7.497395209

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.964854744
B2	-0.964854744	1

MODELO: CHAPMAN-RICHARDS

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	363423.25425	121141.08475
Residual	590	92954.71193	157.55036
Total no corregido	593	456377.96618	
(Total Corregido)	592	186409.54550	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	36.32612379	1.610114761	33.163819428	39.488428143
B2	-0.54031038	0.098752785	-0.734263243	-0.346357522
B3	18.27558349	10.478235275	-2.303924168	38.855091155

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	0.7856349146	-0.709640853
B2	0.7856349146	1	-0.986670188
B3	-0.709640853	-0.986670188	1

MODELO: BACKMAN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio
Regresion	3	363844.05031	121281.35010
Residual	590	92533.91587	156.83715
Total no corregido	593	456377.96618	
(Total Corregido)	592	186409.54550	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	-9.45473013	2.3661836720	-14.101972129	-4.807488139
B2	11.11461316	2.2265627709	6.741589995	15.487636328
B3	-2.37602478	0.5189204581	-3.395197114	-1.356852438

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2	B3
B1	1	-0.998836446	0.995849522
B2	-0.998836446	1	-0.999063646
B3	0.995849522	-0.999063646	1



**Apéndice 4.2.** Ajustes del modelo de Schumacher para diferentes atributos del arbolado y con las variantes correspondientes a los ajustes 1 y 2.

**AJUSTE 1:** (considera a todas las observaciones)

Variable: DC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	449223.98583	224611.99292
Residual	2624	58811.16784	22.41279
Total no corregido	2626	508035.15367	
(Total corregido)	2625	130153.66882	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	27.49826549	0.54088356154	26.437645083	28.558885904
B2	-5.59750274	0.16694767002	-5.924870988	-5.270134484

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.933298252
B2	-0.933298252	1

Variable: CM

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	19901.519896	9950.759948
Residual	2624	2823.420654	1.075999
Total no corregido	2626	22724.940550	
(Total corregido)	2625	5613.044245	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	5.295253299	0.10063998626	5.0979080089	5.4925985898
B2	-4.793204094	0.15477845997	-5.0967097009	-4.4896984866

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.92212908
B2	-0.92212908	1

Variable: AF

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	1969628.1820	984814.0910	
Residual	2614	1073444.8013	410.6522	
Total no corregido	2616	3043072.9833		
(Total corregido)	2615	1613537.9282		
Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	100.6172682	5.2498151842	90.322869601	110.91166671
B2	-11.0015528	0.5133968937	-12.008276246	-9.99482928

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.960944555
B2	-0.960944555	1

Variable: GC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	212.21435113	106.10717556	
Residual	2018	53.56944887	0.02654581	
Total no corregido	2020	265.78380000		
(Total corregido)	2019	66.05427901		
Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.732075732	0.02996947253	0.6733003566	0.7908511076
B2	-7.433931954	0.38397728674	-8.1869785486	-6.6808853599

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.961956031
B2	-0.961956031	1

Variable: ALT

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	142778.77059	71389.38529	
Residual	2671	9273.34124	3.47186	
Total no corregido	2673	152052.11183		
(Total corregido)	2672	39347.11736		
Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	18.43056557	0.28109802429	17.879363970	18.981767168
B2	-7.20218882	0.13717332405	-7.471170273	-6.933207364

## Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.946290286
B2	-0.946290286	1

Variable: AB

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	27297551.970	13648775.985
Residual	2214	18211019.436	8225.393
Total no corregido	2216	45508571.406	
(Total corregido)	2215	24943366.227	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	577.9093815	40.950400220	497.60274826	658.21601473
B2	-15.5991924	0.749504342	-17.06902346	-14.12936133

## Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.969529924
B2	-0.969529924	1

Variable: DN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	230480.50006	115240.25003
Residual	2214	41327.07445	18.66625
Total no corregido	2216	271807.57451	
(Total corregido)	2215	64294.20105	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	24.04652676	0.71989467898	22.634762340	25.458291177
B2	-7.44400170	0.27440995432	-7.982139045	-6.905864359

## Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.953749027
B2	-0.953749027	1

## Variable: LCE

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	6801.043870	3400.521935
Residual	2013	3689.147130	1.832661
Total no corregido	2015	10490.191000	
(Total corregido)	2014	3845.737540	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	1.018069400	0.06669083067	0.8872768260	1.1488619740
B2	4.818132921	0.49599035319	3.8454076707	5.7908581715

## Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.968093182
B2	-0.968093182	1

## Variable: LCM

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	55952.930956	27976.465478
Residual	2618	8753.532944	3.343595
Total no corregido	2620	64706.463900	
(Total corregido)	2619	16930.031497	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	8.799734273	0.17456921346	8.4574205481	9.1420479970
B2	-4.712395818	0.16084088670	-5.0277895912	-4.3970020443

## Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.920954412
B2	-0.920954412	1

## Variable: VI

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	1195.3564914	597.6782457
Residual	2618	68.8650171	0.0263044
Total no corregido	2620	1264.2215085	
(Total corregido)	2619	75.5658231	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.6118412350	0.00487576750	0.60228031592	0.62140215417
B2	0.5129038036	0.03166714386	0.45080752819	0.57500007899

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.808383676
B2	-0.808383676	1

Variable: VOL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	6992772324273	3496386162137
Residual	2211	6565191233622	2969331177.58
Total no corregido	2213	1.35579636E13	
(Total corregido)	2212	8982856783069	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	594072.0299	59955.869440	476494.23921	711649.82063
B2	-23.6375	1.161826	-25.91595	-21.35910

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.978933476
B2	-0.978933476	1

AJUSTE 2: (excluye a las plantaciones de densidad extrema)

Variable: DC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	399025.20774	199512.60387
Residual	2396	33906.02528	14.15110
Total no corregido	2398	432931.23302	
(Total corregido)	2397	105406.99500	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	32.40070127	0.63853324337	31.148544351	33.652858196
B2	-6.68110964	0.16299935124	-7.000749636	-6.361469636

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.953250873
B2	-0.953250873	1

Variable: CM

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	17033.585975	8516.792987	
Residual	2397	1407.191975	0.587064	
Total no corregido	2399	18440.777950		
(Total corregido)	2398	3929.335656		

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	5.458259981	0.08977345358	5.2822152269	5.6343047347
B2	-4.946296487	0.12687017762	-5.1950875078	-4.6975054653

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.934127099
B2	-0.934127099	1

Variable: AF

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	1417340.9131	708670.4565	
Residual	2387	371108.5286	155.4707	
Total no corregido	2389	1788449.4417		
(Total corregido)	2388	734959.2581		

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	79.56601717	3.1885026138	73.313385441	85.818648903
B2	-9.01903540	0.3509101634	-9.707167823	-8.330902981

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.965243217
B2	-0.965243217	1

Variable: GC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	
Regresión	2	188.49971555	94.24985778	
Residual	1790	30.97308445	0.01730340	
Total no corregido	1792	219.47280000		
(Total corregido)	1791	45.84509911		

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	1.010385705	0.04276601149	0.926507675	1.0942637345
B2	-9.877943140	0.38271986994	-10.628581031	-9.1273052494

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.974043817
B2	-0.974043817	1

Variable: ALT

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	117799.03262	58899.51631
Residual	2443	7415.32980	3.03534
Total no corregido	2445	125214.36243	
(Total corregido)	2444	33566.90786	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	19.77824680	0.35471353061	19.082664083	20.473829521
B2	-7.69520512	0.15237563818	-7.994009233	-7.396401014

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.959109094
B2	-0.959109094	1

Variable: AB

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	19644619.348	9822309.674
Residual	1987	7797104.718	3924.059
Total no corregido	1989	27441724.066	
(Total corregido)	1988	12360898.366	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	573.6594743	39.291143886	496.60195084	650.71699781
B2	-15.2764865	0.655916424	-16.56286532	-13.99010768

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.978478148
B2	-0.978478148	1



Variable: DN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	197538.33256	98769.16628
Residual	1987	22977.66715	11.56400
Total no corregido	1989	220515.99971	
(Total corregido)	1988	45052.92334	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	28.44021612	0.85164080828	26.769983972	30.110448265
B2	-8.62845436	0.26178385376	-9.141863065	-8.115045646

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.9668069
B2	-0.9668069	1

Variable: LCE

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	6021.6950991	3010.8475496
Residual	1785	2373.0009009	1.3294123
Total no corregido	1787	8394.6960000	
(Total corregido)	1786	2637.7450467	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.735971645	0.05152815914	0.6349080080	0.8370352815
B2	7.046661797	0.50276961276	6.0605655270	8.0327580666

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.977221851
B2	-0.977221851	1

Variable: LCM

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	48589.053555	24294.526778
Residual	2390	5315.738645	2.224158
Total no corregido	2392	53904.792200	
(Total corregido)	2391	13006.664996	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	9.292217065	0.17753718275	8.9440680900	9.6403660397
B2	-5.006214128	0.14781235818	-5.2960729635	-4.7163552933

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.93520209
B2	-0.93520209	1

Variable: VI

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	1143.3644298	571.6822149
Residual	2390	50.3713612	0.0210759
Total no corregido	2392	1193.7357910	
(Total corregido)	2391	54.3474158	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	0.6368975798	0.00478480387	0.62751461827	0.64628054140
B2	0.4070151683	0.02936760595	0.34942553133	0.46460480529

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.820611434
B2	-0.820611434	1

Variable: VOL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio
Regresión	2	4222859482737	2111429741369
Residual	1984	2382549679289	1200881894.8
Total no corregido	1986	6605409162026	
(Total corregido)	1985	3633201671190	

Parámetro	Estimado	Error Est Asintótico	Intervalo de confianza Asintótico 95%	
			Inferior	Superior
B1	425355.3331	40571.467959	345786.77355	504923.89269
B2	-19.9478	0.952096	-21.81503	-18.08054

Matriz de correlación asintótica

Corr	B1	B2
B1	1	-0.984247109
B2	-0.984247109	1

**Apéndice 5.1** Análisis de correlación simple entre las variables que se presume pueden explicar la variación en superficie foliar (AF) de los árboles que se analizan.

Estadísticos Elementales

Variable	N	Media	Desv Est	Suma	Mínimo	Máximo
AF	930	31.5643	28.2369	29354.8	0	222.5
P	930	0.9775	0.2571	909.1	0	1.4457
ICDN	919	2.1385	1.7356	1965.3	0	16.5102
ICCOP	919	1.9773	1.3879	1817.1	0	10.6492
DI	919	2.1051	0.6566	1934.6	0.4833	4.3950
FAA	931	2.1617	0.9867	2012.6	0.3102	8.9805
FAAMD	930	1.8631	0.9692	1732.7	0.0914	8.6002
AB	931	0.0249	0.0147	23.2136	0.00283	0.0938
VSC	919	1.5296	0.7567	1405.7	0	12.8889
LCEX	930	1.4984	1.4430	1393.6	0	8.5000
RD	919	0.7906	0.4551	726.5	0	6.4444

Matriz de correlaciones obtenidas con la probabilidad de rechazar  $H_0$  si es mayor o igual a 0.05 y el número de observaciones utilizados en su cálculo.

	AF	P	ICDN	ICCOP	DI	FAA	FAAMD	AB	VSC	LCEX	RD
AF	1.00000 0.0 930	0.45423 0.0001 930	0.01775 0.5910 919	-0.00809 0.8065 919	0.72841 0.0001 919	-0.05059 0.1232 930	-0.17708 0.0001 930	-0.35518 0.0001 930	0.00488 0.8826 919	0.75303 0.0001 930	-0.31146 0.0001 919
P		1.00000 0.0 930	0.41332 0.0001 919	0.35384 0.0001 919	0.09803 0.0029 919	-0.04402 0.1798 930	-0.14546 0.0001 930	0.01340 0.6831 930	0.16773 0.0001 919	0.55386 0.0001 930	0.11087 0.0008 919
ICDN			1.00000 0.0 919	0.87197 0.0001 919	-0.33150 0.0001 919	0.42695 0.0001 919	0.35838 0.0001 919	0.54101 0.0001 919	0.05047 0.1263 919	0.14810 0.0001 919	0.24719 0.0001 919
ICCOP				1.00000 0.0 919	-0.38886 0.0001 919	0.49806 0.0001 919	0.42401 0.0001 919	0.62072 0.0001 919	0.04549 0.1683 919	0.06977 0.0344 919	0.28482 0.0001 919
DI					1.00000 0.0 919	-0.25600 0.0001 919	-0.29862 0.0001 919	-0.68947 0.0001 919	0.13432 0.0001 919	0.56575 0.0001 919	-0.45093 0.0001 919
FAA						1.00000 0.0 931	0.98236 0.0 930	0.74815 0.0001 931	-0.35103 0.0001 919	-0.11088 0.0007 930	-0.14717 0.0001 919
FAAMD							1.00000 0.0 930	0.75407 0.0001 930	-0.34935 0.0001 919	-0.20086 0.0001 930	-0.13085 0.0001 919
AB								1.00000 0.0 931	-0.21802 0.0001 919	-0.29529 0.0001 930	0.27452 0.0001 919
VSC									1.00000 0.0 919	0.10558 0.0014 919	0.74036 0.0001 919
LCEX										1.00000 0.0 930	-0.17933 0.0001 919
RD											1.00000 0.0 919

**Apéndice 5.2. Ejemplificación de la secuencia del procedimiento STEPWISE para elegir un modelo que explique la variable superficie foliar (AF).**

Grados de libertad totales: 918 Suma de cuadrados total corregida: 730189.248097

PASO	Movimiento de variables	Variables presentes	Estimada del parámetro correspondiente	Suma de cuadrados del error	R <sup>2</sup>
* 1	> LCEXDI	INTERCEPT LCEXDI	12.8463 5.1358	212593.48	0.7088
* 2	> DIPP	INTERCEP LCEXDI DIPP	-9.919 2.96495740 14.78481331	152859.75	0.7906
* 3	> LCEXVSC	INTERCEP LCEXVSC LCEXDI DIPP	-9.48768419 -4.16533196 4.37294565 16.91522423	119806.27	0.8359
* 4	> ICCOPDI	INTERCEP LCEXVSC LCEXDI ICCPDI DIPP	-11.83163533 -5.10261851 4.81118774 1.71698661 15.21323230	107985.83	0.8521
5	> VSCFAMD	INTERCEP LCEXVSC LCEXDI VSCFAMD ICCPDI DIPP	-6.03557406 -4.97326631 4.68453220 -2.90122339 2.41607515 14.85563162	99691.95	0.8634
* 6	< ICCOPDI > VSCFAA	INTERCEP LCEXVSC LCEXDI VSCFAA VSCFAMD DIPP	-9.48416510 -6.00008472 5.15549326 31.37664441 -32.18833857 11.74727311	71142.07	0.9025
* 7	> LCEX2	INTERCEP LCEXVSC LCEXDI VSCFAA VSCFAMD DIPP LCEX2	-7.84456578 -5.80013331 6.78952700 31.26080532 -32.11222843 9.94246743 -0.98020446	68403.25	0.9063
8	> FAA	INTERCEP FAA LCEXVSC LCEXDI VSCFAA VSCFAMD DIPP LCEX2	-11.57180768 2.24803721 -5.29670165 6.51386050 30.32454196 -32.26950893 10.88542162 -0.99063596	65729.39	0.9099
9	< VSCFAA > FAAMD	INTERCEP FAA FAAMD LCEXVSC LCEXDI VSCFAMD DIPP LCEX2	-10.71420066 47.53096518 -47.92358990 -3.65446122 5.86943757 -0.79292887 10.95336169 -1.09731589	62410.52	0.9145
(*).- mejor modelo con n variables (>).- entra variable (<).- sale variable					

### Apéndice 5.3. Análisis de varianza para el ajuste del modelo

$$AF = \beta_0 + \beta_1(DIP) + \beta_2(LCEXDI) + \beta_3(LCEXVSC)$$

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	3	610382.97711	203460.99237	1553.899	0.0000
Error	915	119806.27099	130.93582		
C Total	918	730189.24810			

Raíz CME	11.44272	R-cuadrada	0.8359
Dep Mean	31.93193	R-cuad. aj	0.8354
C.V.	35.83472		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parametro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	-9.487684	1.17105985	-8.102	0.0001
DIPP	1	16.915224	0.70507307	23.991	0.0001
LCEXDI	1	4.372946	0.15765847	27.737	0.0001
LCEXVSC	1	-4.165332	0.26216230	-15.888	0.0001

**Apéndice 5.4.** Coeficientes de correlación simple obtenidos para 42 variables combinadas, indicadoras de competencia. Estas combinaciones fueron incluidas en el procedimiento STEPWISE, para seleccionar un modelo que explique la superficie foliar (AF)

Información estadística sobre las variables involucradas

Variable	N	Media	Desv.Est.	Suma	Mínimo	Maximo
AF	930	31.5643	28.2369	29354.8	0	222.5
LCEXVSC	919	2.4263	2.4086	2229.8	0	12.8889
LCEXICDN	919	3.6016	4.9094	3309.9	0	56.1347
LCEICOP	919	3.1271	3.6646	2873.8	0	34.3658
LCEXFAA	930	3.0843	3.1889	2868.4	0	15.9450
LCEFAMD	930	2.5111	2.6133	2335.3	0	12.9727
LCEXAB	930	0.0311	0.0304	28.9617	0	0.2543
LCEXDI	919	3.7161	4.6234	3415.1	0	35.7000
LCEXPP	930	1.6700	1.6683	1553.1	0	9.9454
VSCICDN	919	3.3373	2.8851	3067.0	0	30.2959
VSCICOP	919	3.0722	2.2489	2823.3	0	18.8132
VSCFAA	919	3.0643	1.2385	2816.1	0	9.0285
VSCFAMD	919	2.6044	1.1870	2393.4	0	8.5713
VSCAB	919	0.0359	0.0209	32.9979	0	0.2730
VSCDI	919	3.2867	1.8482	3020.5	0	25.7778
VSCPP	919	1.5353	0.8142	1411.0	0	13.0559
ICDNFAA	919	5.3791	7.7132	4943.4	0	82.2954
ICDNFAMD	919	4.6033	6.9655	4230.5	0	78.8106
ICDNAB	919	0.0674	0.1075	61.9701	0	1.2348
ICNDI	919	4.1244	3.0870	3790.3	0	30.8939
ICDNPP	919	2.2813	2.1378	2096.5	0	22.8810
FAAICOP	919	4.9796	6.8621	4576.2	0	82.9226
FAAAB	931	0.0647	0.0878	60.2793	0.00157	0.8421
FAADI	919	4.4116	1.8723	4054.3	0.5643	11.0618
FAAPP	930	2.1036	1.0644	1956.3	0	9.3709
ICCOPAB	919	0.0623	0.0906	57.2079	0	0.8522
ICCPDI	919	3.8084	2.3986	3499.9	0	14.7964
ICCPPP	919	2.0663	1.6063	1899.0	0	14.0078
ABDI	919	0.0461	0.0144	42.3573	0.00927	0.1014
ABPP	930	0.0244	0.0160	22.7353	0	0.1278
RDLCX	919	1.0768	1.0226	989.6	0	6.5060
RDVSC	919	1.4639	3.4463	1345.4	0	83.0619
RDICDN	919	1.8856	1.9899	1732.9	0	19.3930
RDICOP	919	1.7428	1.6608	1601.7	0	13.4200
RDFAA	919	1.6530	1.1037	1519.1	0	9.8128
RDFAMD	919	1.4208	1.0495	1305.7	0	8.7345
RDAB	919	0.0217	0.0218	19.9006	0	0.2642
RDDI	919	1.5296	0.7567	1405.7	0	12.8889
RDP	919	0.7897	0.4967	725.8	0	7.7520
DIPP	919	2.0854	0.8709	1916.5	0	5.4846
LCEX2	930	4.3252	7.1040	4022.5	0	72.2500
DI2	919	4.8622	2.9819	4468.3	0.2336	19.3160





	VSCPP	ICDNFAA	ICDNFAMD	ICDNAB	ICDNNDI	ICDNPP	FAAICCOP	FAAAB	FAADI	FAAPP	ICCOPAB	ICCOPDI	ICCOPPP	ABDI
AF	0.17805 0.0001	-0.04346 0.1880	-0.07443 0.0240	-0.13742 0.0001	0.28417 0.0001	0.07957 0.0158	-0.06199 0.0603	-0.20391 0.0001	0.51875 0.0001	0.19720 0.0001	-0.16737 0.0001	0.31174 0.0001	0.08050 0.0147	-0.00881 0.7896
LCEXVSC	0.59907 0.0001	-0.01620 0.6239	-0.04228 0.2004	-0.07136 0.0305	0.45071 0.0001	0.26517 0.0001	-0.06738 0.0411	-0.23503 0.0001	0.18764 0.0001	0.08099 0.0140	-0.12516 0.0001	0.40662 0.0001	0.22912 0.0001	0.00627 0.8494
LCEXICDN	0.34297 0.0001	0.41204 0.0001	0.34845 0.0001	0.37594 0.0001	0.81344 0.0001	0.76573 0.0001	0.24143 0.0001	0.01106 0.7377	0.18185 0.0001	0.34386 0.0001	0.22635 0.0001	0.63292 0.0001	0.61842 0.0001	0.23765 0.0001
LCEICCOP	0.36837 0.0001	0.32719 0.0001	0.26913 0.0001	0.28952 0.0001	0.73131 0.0001	0.66190 0.0001	0.23881 0.0001	-0.02178 0.5097	0.21797 0.0001	0.35288 0.0001	0.20617 0.0001	0.72700 0.0001	0.66282 0.0001	0.25921 0.0001
LCEXFAA	0.21928 0.0001	0.16573 0.0001	0.13433 0.0001	0.08745 0.0080	0.47806 0.0001	0.33947 0.0001	0.09001 0.0063	-0.06243 0.0570	0.54515 0.0001	0.41070 0.0001	0.01143 0.7294	0.44736 0.0001	0.30466 0.0001	0.27312 0.0001
LCEFAMD	0.21509 0.0001	0.18284 0.0001	0.15808 0.0001	0.10286 0.0018	0.48386 0.0001	0.34392 0.0001	0.10579 0.0013	-0.03895 0.2353	0.55782 0.0001	0.43632 0.0001	0.02734 0.4078	0.45092 0.0001	0.30885 0.0001	0.33083 0.0001
LCEXAB	0.33153 0.0001	0.30346 0.0001	0.26126 0.0001	0.29658 0.0001	0.56781 0.0001	0.55957 0.0001	0.19581 0.0001	0.02933 0.3717	0.30892 0.0001	0.46263 0.0001	0.18974 0.0001	0.52388 0.0001	0.52113 0.0001	0.37815 0.0001
LCEXDI	0.21321 0.0001	-0.06824 0.0386	-0.08524 0.0097	-0.13655 0.0001	0.24816 0.0001	0.06273 0.0573	-0.10146 0.0021	-0.21255 0.0001	0.43761 0.0001	0.10778 0.0011	-0.17570 0.0001	0.22327 0.0001	0.02995 0.3644	-0.02915 0.3774
LCEXPP	0.36800 0.0001	0.02870 0.3849	-0.00354 0.9147	-0.03071 0.3524	0.41875 0.0001	0.28410 0.0001	-0.03343 0.3114	-0.18987 0.0001	0.31542 0.0001	0.22556 0.0001	-0.09562 0.0037	0.37281 0.0001	0.24644 0.0001	0.03101 0.3477
VSCICDN	0.58293 0.0001	0.50807 0.0001	0.46346 0.0001	0.51327 0.0001	0.85393 0.0001	0.83572 0.0001	0.38881 0.0001	0.15750 0.0001	-0.03785 0.2517	0.31616 0.0001	0.42317 0.0001	0.71241 0.0001	0.74136 0.0001	0.28589 0.0001
VSCICCOP	0.59227 0.0001	0.44911 0.0001	0.41344 0.0001	0.46005 0.0001	0.71572 0.0001	0.69115 0.0001	0.45916 0.0001	0.18885 0.0001	-0.04009 0.2247	0.31439 0.0001	0.49021 0.0001	0.82730 0.0001	0.81087 0.0001	0.34022 0.0001
VSCFAA	0.42661 0.0001	0.46440 0.0001	0.46775 0.0001	0.38702 0.0001	0.49233 0.0001	0.39802 0.0001	0.48851 0.0001	0.37890 0.0001	0.39474 0.0001	0.53643 0.0001	0.42289 0.0001	0.57783 0.0001	0.46924 0.0001	0.66884 0.0001
VSCFAMD	0.30092 0.0001	0.45131 0.0001	0.47022 0.0001	0.38349 0.0001	0.38185 0.0001	0.31855 0.0001	0.47945 0.0001	0.42498 0.0001	0.37991 0.0001	0.51509 0.0001	0.42489 0.0001	0.45363 0.0001	0.38017 0.0001	0.68711 0.0001
VSCAB	0.44571 0.0001	0.40331 0.0001	0.40707 0.0001	0.51378 0.0001	0.27338 0.0001	0.42982 0.0001	0.41428 0.0001	0.40875 0.0001	-0.13372 0.0001	0.34771 0.0001	0.55229 0.0001	0.31724 0.0001	0.50007 0.0001	0.50631 0.0001
VSCDI	0.76094 0.0001	-0.22196 0.0001	-0.23255 0.0001	-0.28187 0.0001	0.21544 0.0001	-0.05670 0.0858	-0.23536 0.0001	-0.37794 0.0001	0.10703 0.0012	-0.22459 0.0001	-0.31074 0.0001	0.23854 0.0001	-0.07725 0.0192	-0.08254 0.0123
VSCPP	1.00000 0.0	-0.03433 0.2985	-0.05627 0.0882	-0.02787 0.3988	0.37514 0.0001	0.27708 0.0001	-0.06827 0.0385	-0.22941 0.0001	-0.15665 0.0001	-0.00897 0.7859	-0.06260 0.0578	0.36659 0.0001	0.27697 0.0001	-0.01311 0.6915
ICDNFAA		1.00000 0.0	0.99399 0.0	0.93172 0.0	0.52260 0.0001	0.76092 0.0001	0.92718 0.0	0.82416 0.0001	0.18724 0.0001	0.77509 0.0001	0.88515 0.0001	0.43979 0.0001	0.72519 0.0001	0.46715 0.0001
ICDNFAMD			1.00000 0.0	0.91836 0.0	0.47112 0.0001	0.70882 0.0001	0.93245 0.0	0.85673 0.0001	0.18963 0.0001	0.77539 0.0001	0.88331 0.0001	0.39607 0.0001	0.68131 0.0001	0.47288 0.0001
ICDNAB				1.00000 0.0	0.42028 0.0001	0.78565 0.0001	0.83746 0.0001	0.78059 0.0001	0.01187 0.7193	0.68919 0.0001	0.92845 0.0	0.33988 0.0001	0.74645 0.0001	0.43271 0.0001
ICDNNDI					1.00000 0.0	0.82513 0.0001	0.38163 0.0001	0.11177 0.0001	0.28674 0.0001	0.44840 0.0001	0.31350 0.0001	0.85627 0.0001	0.71796 0.0001	0.40091 0.0001

	FAAAB	FAADI	FAAPP	ICCOPAB	ICCOPDI	ICCOPPP	ABDI	ABPP
FAAAB	1.00000 0.0	0.15857 0.0001	0.71721 0.0001	0.85489 0.0001	0.12572 0.0001	0.44369 0.0001	0.50228 0.0001	0.72483 0.0001
FAADI		1.00000 0.0	0.49856 0.0001	0.00453 0.8910	0.33645 0.0001	0.04274 0.1955	0.62179 0.0001	-0.01099 0.7394
FAAPP			1.00000 0.0	0.68741 0.0001	0.45984 0.0001	0.64878 0.0001	0.69357 0.0001	0.77686 0.0001
ICCOPAB				1.00000 0.0	0.35666 0.0001	0.75012 0.0001	0.44944 0.0001	0.82919 0.0001
ICCOPDI					1.00000 0.0	0.78523 0.0001	0.46495 0.0001	0.29416 0.0001
ICCOPPP						1.00000 0.0	0.42577 0.0001	0.71581 0.0001
ABDI							1.00000 0.0	0.58166 0.0001
ABPP								1.00000 0.0

	RDLCEX	RDVSC	RDICDN	RDICOP	RDFAA	RDFAMD	RDAB	RDDI	RDP	DIPP	LCXAZ	VIC
AF	0.37444 0.0001	-0.09409 0.0043	-0.14648 0.0001	-0.18923 0.0001	-0.29367 0.0001	-0.33241 0.0001	-0.36235 0.0001	0.00488 0.8826	-0.15343 0.0001	0.83543 0.0001	0.74364 0.0001	0.79637 0.0001
LCXVSC	0.93782 0.0	0.15177 0.0001	0.13456 0.0001	0.04942 0.1344	-0.15355 0.0001	-0.19461 0.0001	-0.19826 0.0001	0.37235 0.0001	0.23732 0.0001	0.69070 0.0001	0.76746 0.0001	0.46516 0.0001
LCXICDN	0.71543 0.0001	-0.00315 0.9241	0.51296 0.0001	0.32687 0.0001	0.07463 0.0237	0.02081 0.5287	0.01212 0.7137	0.12965 0.0001	0.20769 0.0001	0.37135 0.0001	0.45859 0.0001	0.09254 0.0050
LCEICOP	0.77417 0.0001	-0.01203 0.7157	0.41770 0.0001	0.33595 0.0001	0.04974 0.1319	-0.00674 0.8383	-0.02183 0.5087	0.13953 0.0001	0.20053 0.0001	0.43273 0.0001	0.51040 0.0001	0.13021 0.0001
LCXFAD	0.67713 0.0001	-0.08723 0.0082	0.07587 0.0214	-0.01149 0.7281	-0.09777 0.0030	-0.12592 0.0001	-0.18912 0.0001	0.01049 0.7507	-0.03062 0.3538	0.68828 0.0001	0.80796 0.0001	0.52860 0.0001
LCEFAMD	0.66319 0.0001	-0.08399 0.0109	0.08503 0.0099	-0.00063 0.9847	-0.06451 0.0506	-0.08279 0.0121	-0.16440 0.0001	0.01534 0.6423	-0.02338 0.4790	0.64709 0.0001	0.74855 0.0001	0.48206 0.0001
LCXAB	0.79246 0.0001	-0.03669 0.2666	0.33155 0.0001	0.22235 0.0001	0.07202 0.0290	0.02890 0.3816	0.01605 0.6270	0.08896 0.0070	0.18612 0.0001	0.48392 0.0001	0.57777 0.0001	0.18277 0.0001
LCXDI	0.59130 0.0001	-0.06603 0.0454	-0.11066 0.0008	-0.17039 0.0001	-0.26505 0.0001	-0.28276 0.0001	-0.30223 0.0001	0.04917 0.1363	-0.09764 0.0030	0.77947 0.0001	0.95871 0.0	0.77458 0.0001
LCXPP	0.80586 0.0001	-0.04604 0.1632	0.05313 0.1075	-0.03594 0.2765	-0.20117 0.0001	-0.23965 0.0001	-0.24348 0.0001	0.10783 0.0011	0.06410 0.0521	0.77576 0.0001	0.89065 0.0	0.54340 0.0001
VSCICDN	0.55163 0.0001	0.27983 0.0001	0.82775 0.0001	0.68543 0.0001	0.38588 0.0001	0.32102 0.0001	0.34981 0.0001	0.42847 0.0001	0.56174 0.0001	0.12530 0.0001	0.08651 0.0087	-0.16791 0.0001
VSCICOP	0.48664 0.0001	0.32509 0.0001	0.73908 0.0001	0.79596 0.0001	0.46130 0.0001	0.39181 0.0001	0.41005 0.0001	0.47830 0.0001	0.58170 0.0001	0.07946 0.0160	0.02727 0.4090	-0.20364 0.0001
VSCFAA	0.23958 0.0001	0.24500 0.0001	0.39222 0.0001	0.42894 0.0001	0.64467 0.0001	0.63834 0.0001	0.40306 0.0001	0.48655 0.0001	0.32847 0.0001	0.13399 0.0001	0.00693 0.8339	-0.00801 0.8083
VSCFAMD	0.12494 0.0001	0.19199 0.0001	0.33979 0.0001	0.38074 0.0001	0.67072 0.0001	0.69226 0.0001	0.43409 0.0001	0.40579 0.0001	0.25990 0.0001	0.01240 0.7074	-0.06846 0.0380	-0.06963 0.0348
VSCAB	0.16395 0.0001	0.38098 0.0001	0.63766 0.0001	0.69179 0.0001	0.77479 0.0001	0.75659 0.0001	0.85307 0.0001	0.46029 0.0001	0.71251 0.0001	-0.23480 0.0001	-0.18377 0.0001	-0.40635 0.0001
VSCDI	0.45026 0.0001	0.59426 0.0001	-0.04308 0.1920	-0.07038 0.0329	-0.14234 0.0001	-0.16621 0.0001	-0.22357 0.0001	0.88386 0.0001	0.30575 0.0001	0.50186 0.0001	0.26570 0.0001	0.47567 0.0001
VSCPP	0.65705 0.0001	0.66009 0.0001	0.33652 0.0001	0.29574 0.0001	0.09357 0.0045	0.03324 0.3142	0.14118 0.0001	0.85709 0.0001	0.76618 0.0001	0.42937 0.0001	0.17015 0.0001	0.08084 0.0142
ICDNFAA	0.07168 0.0298	-0.04259 0.1970	0.70439 0.0001	0.65008 0.0001	0.75581 0.0001	0.73273 0.0001	0.51538 0.0001	-0.11963 0.0003	0.17022 0.0001	-0.14993 0.0001	-0.02953 0.3713	-0.27435 0.0001
ICDNFAMD	0.03757 0.2552	-0.04280 0.1948	0.67071 0.0001	0.62847 0.0001	0.77593 0.0001	0.76340 0.0001	0.52584 0.0001	-0.12810 0.0001	0.15490 0.0001	-0.17559 0.0001	-0.04716 0.1532	-0.28150 0.0001
ICDNAB	0.06077 0.0656	-0.01222 0.7113	0.81241 0.0001	0.75018 0.0001	0.77146 0.0001	0.74085 0.0001	0.66803 0.0001	-0.11150 0.0007	0.28973 0.0001	-0.25837 0.0001	-0.07932 0.0162	-0.37467 0.0001
ICNDI	0.49121 0.0001	0.00013 0.9970	0.57876 0.0001	0.42960 0.0001	0.20951 0.0001	0.15659 0.0001	0.07121 0.0309	0.18689 0.0001	0.21696 0.0001	0.35423 0.0001	0.22832 0.0001	0.05695 0.0844



**Apéndice 5.5.** Análisis de varianza para el ajuste del modelo  $Y = \beta_0 + \beta_1(AF)$  sobre las variables DN, ALT y VOL, de los árboles analizados individualmente, utilizando el archivo completo de datos

Variable: A L T U R A

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	3152.25690	3152.25690	740.939	0.0001
Estándar	928	3948.08947	4.25441		
Total C	929	7100.34637			
Raíz CME		2.06262	R-cuadrada	0.4440	
Media Dep		9.00941	R-cuad Aj	0.4434	
C.V.		22.89408			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	6.950285	0.10147454	68.493	0.0000
AF	1	0.065236	0.00239659	27.220	0.0001

Variable: VOLUMEN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	3.8483356E12	3.8483356E12	4320.277	0.0000
Estándar	928	826626555003	890761373.93		
Total C	929	4.6749621E12			
Raíz CME		29845.62571	R-cuadrada	0.8232	
Media Dep		59407.11795	R-cuad Aj	0.8230	
C.V.		50.23914			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	-12539	1468.3117294	-8.540	0.0001
AFX	1	2279.351896	34.67812431	65.729	0.0000

Variable: D I A M E T R O N O R M A L

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	1	21896.41843	21896.41843	2872.749	0.0001
Estándar	928	7073.32164	7.62211		
Total C	929	28969.74007			
Raíz CME		2.76082	R-cuadrada	0.7558	
Media Dep		11.09899	R-cuad Aj	0.7556	
C.V.		24.87449			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0	Prob >  T
INTERCEP	1	5.672015	0.13582362	41.760	0.0001
AFX	1	0.171934	0.00320784	53.598	0.0001

**Apéndice 5.6.** Análisis de varianza del ajuste de los modelos  
 $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$  y  
 $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  para las variables  
 DN, ALT y VOL, sobre todas las observaciones y  
 excluyendo PABECAB y PABECPC

MODELO:  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$

Variable: DIAMETRO NORMAL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	480.28667	480.28667	2305.883	0.0000
Error	2214	461.14859	0.20829		
C Total	2215	941.43526			
Raíz CME		0.45639	$R^2$	0.5102	
Dep Mean		2.08892	$R^2$ Aj	0.5099	
C.V.		21.84786			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	3.183155	0.02476383	128.541
IE	1	-8.338090	0.17363926	-48.020

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	510.06117	510.06117	3359.466	0.0000
Error	1987	301.68233	0.15183		
C Total	1988	811.74350			
Raíz CME		0.38965	$R^2$	0.6284	
Dep Mean		2.07294	$R^2$ Aj	0.6282	
C.V.		18.79706			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	3.352936	0.02374931	141.180
IE	1	-9.258448	0.15973610	-57.961

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

Variable: ALTURA

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	2437.45795	2437.45795	9096.454	0.0000
Error	2671	715.71297	0.26796		
C Total	2672	3153.17092			

Raíz CME	0.51765	$R^2$	0.7730
Dep Mean	1.52882	$R^2$ Aj	0.7729
C.V.	33.85922		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	2.822409	0.01685839	167.419
IE	1	-6.849891	0.07182036	-95.375

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor
Modelo	1	2285.25750	2285.25750	8011.992
Error	2443	696.81595	0.28523	
C Total	2444	2982.07345		

Raíz CME	0.53407	$R^2$	0.7663
Dep Mean	1.45613	$R^2$ Aj	0.7662
C.V.	36.67718		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	2.829961	0.01876780	150.788
IE	1	-6.870648	0.07675867	-89.510

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000



Variable: VOLUMEN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	1663.48735	1663.48735	1857.713	0.0001
Error	2211	1979.83813	0.89545		
C Total	2212	3643.32548			
Raíz CME		0.94628	$R^2$	0.4566	
Dep Mean		9.97879	$R^2$ Aj	0.4563	
C.V.		9.48293			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	12.016196	0.05137230	233.904
IE	1	-15.522720	0.36014595	-43.101

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	1636.97862	1636.97862	2331.104	0.0000
Error	1984	1393.23054	0.70223		
C Total	1985	3030.20916			
Raíz CME		0.83799	$R^2$	0.5402	
Dep Mean		9.92130	$R^2$ Aj	0.5400	
C.V.		8.44641			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	12.215962	0.05111139	239.007
IE	1	-16.593645	0.34368529	-48.282

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

$$\text{MODELO: } \ln Y = \beta_0 + \beta_1(1/\text{EDAD}) + \beta_2(\text{AF})$$

Variable: DIAMETRO NORMAL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	680.98004	340.49002	2908.301	0.0000
Error	2207	258.38506	0.11708		
C Total	2209	939.36510			

Raíz CME	0.34216	$R^2$	0.7249
Dep Mean	2.08896	$R^2$ Aj	0.7247
C.V.	16.37957		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	2.474389	0.02528234	97.870
IE	1	-5.747946	0.14456451	-39.760
AF	1	0.013428	0.00032417	41.423

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0001

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	666.13561	333.06780	4580.362	0.0000
Error	1981	144.05133	0.07272		
C Total	1983	810.18694			

Raíz CME	0.26966	$R^2$	0.8222
Dep Mean	2.07257	$R^2$ Aj	0.8220
C.V.	13.01092		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	2.373269	0.02671402	88.840
IE	1	-5.882299	0.13224824	-44.479
AF	1	0.020437	0.00043934	46.517

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

Variable: ALTURA

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	1844.57158	922.28579	7593.640	0.0000
Error	2613	317.36200	0.12146		
C Total	2615	2161.93357			

Raíz CME	0.34850	$R^2$	0.8532
Dep Mean	1.61113	$R^2$ Aj	0.8531
C.V.	21.63097		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	2.424994	0.01722072	140.818
IE	1	-5.428425	0.05871815	-92.449
AF	1	0.007657	0.00031711	24.146

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000
AF	1	0.0001

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	1758.00430	879.00215	7968.213	0.0000
Error	2386	263.20822	0.11031		
C Total	2388	2021.21251			

Raíz CME	0.33213	$R^2$	0.8698
Dep Mean	1.54481	$R^2$ Aj	0.8697
C.V.	21.49998		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	-2.152170	0.02214503	97.185
IE	1	-4.835626	0.06532411	-74.025
AF	1	0.015671	0.00050472	31.048

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000
AF	1	0.0001

Variable: VOLUMEN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	2757.34857	1378.67428	3455.727	0.0000
Error	2207	880.49021	0.39895		
C Total	2209	3637.83878			

Raíz CME	0.63163	$R^2$	0.7580
Dep Mean	9.97965	$R^2$ Aj	0.7577
C.V.	6.32915		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	10.362903	0.04667086	222.042
IE	1	-9.479237	0.26686416	-35.521
AF	1	0.031325	0.00059842	52.347

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

EXCLUYENDO A LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	2542.87992	1271.43996	5210.439	0.0000
Error	1981	483.39934	0.24402		
C Total	1983	3026.27925			

Raíz CME	0.49398	$R^2$	0.8403
Dep Mean	9.92159	$R^2$ Aj	0.8401
C.V.	4.97885		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	9.863083	0.04893659	201.548
IE	1	-8.485916	0.24226143	-35.028
AF	1	0.049103	0.00080482	61.011

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

**Apéndice 5.7.** Análisis de varianza para el ajuste de los modelos  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$  y  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD) + \beta_2(AF)$  para las variables DN, ALT y VOL, de todas las plantaciones y excluyendo a las de densidad extrema.

MODELO:  $Y = \beta_0 + \beta_1(1/EDAD)$

Variable: DIAMETRO NORMAL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	22365.85944	22365.85944	1181.015	0.0001
Error	2214	41928.34161	18.93782		
Total C	2215	64294.20105			

Raíz CME	4.35176	$R^2$	0.3479
Media Dep	9.67694	$R^2$ Aj	0.3476
C.V.	44.97041		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	17.144032	0.23613002	72.604
IE	1	-56.899585	1.65569882	-34.366

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	20612.38252	20612.38252	1675.773	0.0001
Error	1987	24440.54082	12.30022		
Total C	1988	45052.92334			

Raíz CME	3.50717	$R^2$	0.4575
Media Dep	9.39238	$R^2$ Aj	0.4572
C.V.	37.34057		

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	17.529344	0.21376245	82.004
IE	1	-58.856057	1.43775054	-40.936

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001

Variable: ALTURA

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	25536.66223	25536.66223	4938.898	0.0000
Error	2671	13810.45513	5.17052		
Total C	2672	39347.11736			
Raíz CME		2.27388	$R^2$	0.6490	
Media Dep		6.49340	$R^2$ Aj	0.6489	
C.V.		35.01829			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	10.680476	0.07405438	144.225
IE	1	-22.171605	0.31548748	-70.277

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	22031.37276	22031.37276	4665.812	0.0000
Error	2443	11535.53510	4.72187		
Total C	2444	33566.90786			
Raíz CME		2.17299	$R^2$	0.6563	
Media Dep		6.12239	$R^2$ Aj	0.6562	
C.V.		35.49248			

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	10.388038	0.07636128	136.038
IE	1	-21.332951	0.31231101	-68.307

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000

Variable: VOLUMEN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	1.5914555E12	1.5914555E12	476.054	0.0001
Error	2211	7.3914013E12	3343012790.4		
Total C	2212	8.9828568E12			
Raíz CME	57818.79271	$R^2$		0.1772	
Media Dep	45468.42493	$R^2$ Aj		0.1768	
C.V.	127.16252				

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	108487	3138.9005090	34.562
IE	1	-480126	22005.289410	-21.819

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0001
IE	1	0.0001

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	1	914765170060	914765170060	667.624	0.0001
Error	1984	2.7184365E12	1370179688.1		
Total C	1985	3.6332017E12			
Raíz CME	37015.93830	$R^2$		0.2518	
Media Dep	38685.65372	$R^2$ Aj		0.2514	
C.V.	95.68389				

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	92930	2257.6975790	41.161
IE	1	-392261	15181.302958	-25.838

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0001
IE	1	0.0001



$$\text{MODELO: } Y = B_0 + B_1(1/\text{EDAD}) + B_2(\text{AF})$$

Variable: DIAMETRO NORMAL

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	52111.26345	26055.63173	4774.301	0.0000
Error	2207	12044.64791	5.45748		
Total C	2209	64155.91137			

Raíz CME	2.33612	$R^2$	0.8123
Media Dep	9.67784	$R^2$ Aj	0.8121
C.V.	24.13891		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	8.509061	0.17261583	49.295
IE	1	-25.327943	0.98701793	-25.661
AF	1	0.163460	0.00221330	73.854

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	36788.27780	18394.13890	4466.999	0.0000
Error	1981	8157.33140	4.11778		
Total C	1983	44945.60921			

Raíz CME	2.02923	$R^2$	0.8185
Media Dep	9.38973	$R^2$ Aj	0.8183
C.V.	21.61118		

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	7.569786	0.20102716	37.656
IE	1	-24.525402	0.99518839	-24.644
AF	1	0.207708	0.00330613	62.825

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0001
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

Variable: ALTURA

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	29758.82020	14879.41010	5262.643	0.0000
Error	2613	7387.90305	2.82736		
Total C	2615	37146.72325			
Raíz CME		1.68148	$R^2$	0.8011	
Media Dep		6.62173	$R^2$ Aj	0.8010	
C.V.		25.39332			

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	7.775810	0.08308728	93.586
IE	1	-15.574522	0.28330582	-54.974
AF	1	0.072487	0.00152999	47.377

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0000
AF	1	0.0000

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	27202.45016	13601.22508	7356.929	0.0000
Error	2386	4411.15095	1.84876		
Total C	2388	31613.60111			
Raíz CME		1.35969	$R^2$	0.8605	
Media Dep		6.25497	$R^2$ Aj	0.8603	
C.V.		21.73780			

#### Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	5.673601	0.09065726	62.583
IE	1	-10.839784	0.26742362	-40.534
AF	1	0.127647	0.00206621	61.778

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0000
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000

Variable: VOLUMEN

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	7.3994469E12	3.6997234E12	5168.128	0.0000
Error	2207	1.5799317E12	715873014.84		
Total C	2209	8.9793786E12			
Raíz CME	26755.80339	$R^2$		0.8240	
Media Dep	45498.24606	$R^2$ Aj		0.8239	
C.V.	58.80623				

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	-12088	1976.9820486	-6.114
IE	1	-39430	11304.390473	-3.488
AF	1	2282.923687	25.34906327	90.059

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0001
IE	1	0.0005
AF	1	0.0000

EXCLUYENDO LAS PLANTACIONES PABECAB Y PABECPC

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F Valor	Prob>F
Modelo	2	2.5236775E12	1.2618388E12	2256.360	0.0000
Error	1981	1.1078475E12	559236477.04		
Total C	1983	3.631525E12			
Raíz CME	23648.18126	$R^2$		0.6949	
Media Dep	38692.33319	$R^2$ Aj		0.6946	
C.V.	61.11852				

Parámetros Estimados

Variable	gl	Parámetro Estimado	Error Estándar	T para H0: Parámetro=0
INTERCEP	1	-6109.695745	2342.7214989	-2.608
IE	1	-51119	11597.682927	-4.408
AF	1	2067.298650	38.52879616	53.656

Variable	gl	Prob >  T
INTERCEP	1	0.0092
IE	1	0.0001
AF	1	0.0000