

## MODELOS DE ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA DEL VUELO DE UNA MASA ARBÓREA

M. LÓPEZ ARIAS<sup>1</sup>, A. RODRÍGUEZ LÓPEZ<sup>2</sup>, F. PENALVA<sup>1</sup> y J. M. GARCÍA DEL BARRIO<sup>1</sup>

### RESUMEN

Se presenta la estructura, la formulación y método de ajuste de un modelo estadístico de distribución vertical de las superficies externas y volúmenes de los componentes aéreos de una masa arbórea. Se hace su aplicación a una plantación de *Eucalyptus globulus* de 14 años de edad.

La distribución resultante para esta plantación se puede asimilar a una distribución normal centrada en el tramo verde de las copas. Este resultado es análogo al de otros estudios anteriores. La media se aproxima al centro de dicho tramo y la desviación típica es del orden del 20% de su rango total.

### 1. INTRODUCCION

En un ecosistema forestal, tanto la composición de la biomasa vegetal aérea como la distribución espacial de sus elementos (troncos, ramas, hojas, frutos, etc.) y la disposición de sus superficies externas son factores que influyen en la configuración del microclima y que tienen significación fisiológica a nivel de la planta y del conjunto del ecosistema, AXELSSON, B. *et al.* (1980), BERGEN, J. D. (1971).

Como factores modificadores del microclima del ambiente que rodea las plantas, contribuyen a controlar los procesos de la actividad vegetativa y, a su vez, son modificados por esta actividad en una interacción que conduce a estados de equilibrio dinámico. Afectan, especialmente, a los procesos de transferencia e intercambio de materia y energía entre el medio aéreo y las plantas, FRITSCHEM, L. J. (1985).

Los intercambios gaseosos a que dan lugar la fotosíntesis, la respiración y la transpiración están gobernados en buena medida por la naturaleza e intensidad de la radiación solar que llega a las superficies activas y por la proporción en que dicha radiación es reflejada, absorbida o transmi-

tida hacia, o desde, el suelo y la superficie de las copas.

La distribución de la radiación, después de incidir sobre el dosel de una masa arbórea, depende de las propiedades ópticas de los componentes aéreos de la planta y de su organización dentro de las copas. Estos factores son, por ello, determinantes de la disponibilidad de energía radiante para la actividad vegetativa en un determinado punto de la copa, GAY *et al.*, 1971.

El proceso de transferencia en el interior de una masa arbórea, partiendo de una radiación incidente conocida, puede establecerse y formularse con gran economía de mediciones directas, estudiando el coeficiente de extinción de arriba-abajo y de abajo-arriba, y analizando su variación según las características de efecto acumulativo del vuelo derivadas de la distribución espacial del mismo, LINDROTH *et al.*, 1981.

Los efectos de capa límite sobre el estado termodinámico y turbulencia de la baja atmósfera quedan intensamente modificados al variar las propiedades de rugosidad del tapiz vegetal, propiedades que dependen de la distribución de los volúmenes, de las superficies y de las dimensiones de los elementos integrantes de la vegetación arbórea. Estos efectos se ponen de manifiesto en la forma del perfil vertical de la velocidad del viento, cuyos parámetros definidores (plano de desplazamiento nulo, coeficiente de rugosidad, longitud de mezcla, etc.)

<sup>1</sup> Área de Conservación del Medio Natural. Apdo. de Correos 8.111. 28080 Madrid. España.

<sup>2</sup> Departamento de Producción Forestal. GETISA. C/ Progreso, 5 y 7. Sevilla. España.

dependen de la altura y densidad de la masa arbórea. Por otra parte, los flujos verticales de CO<sub>2</sub>, de calor sensible y de vapor de agua (por encima y dentro del vuelo) dependen de la facilidad de difusión y transferencia de la cantidad de movimiento (*momentum*). En la determinación de los coeficientes de difusión y transferencia tiene influencia decisiva la estructura y organización de las copas, LEONARD, R. E. *et al.* (1973), FONS, W. L. (1980).

La distribución de la biomasa aérea condiciona directamente los procesos de transferencia de calor sensible y latente y, por lo tanto, el reparto de la energía térmica disponible entre la evaporación de agua (evapotranspiración) y el aumento de la temperatura ambiente, HALLDINS, S. (1970), JARVIS *et al.*, 1976.

Finalmente, para no alargar más la enumeración de los fenómenos afectados, hay que destacar que el reparto de la precipitación sobre la superficie del suelo está fuertemente influido por la forma y composición de la cubierta vegetal. La distribución de la precipitación incidente entre las tres vías posibles (pérdida por intercepción, trascolación y escurrimiento fustal) está condicionada por la forma de la cubierta, JANSSON, 1977.

La necesidad de disponer de modelos de distribución vertical de la superficie foliar y de la superficie externa no transpirante de los elementos estructurales de la biomasa aérea ha sido puesta de manifiesto por varios investigadores. FRITSCHEN (1985), después de resaltar su importancia, señala la falta de estudios sobre la distribución de hojas y ramas en las masas forestales. Este autor cita los conocidos trabajos de GARY (1976), STEPHENS (1969) y KINNERSON & FRITSCHEN (1971) sobre bosques de coníferas y otros sobre frondosas, en los cuales se estudia la distribución vertical de la biomasa. TADAKI (1977) presenta la descripción de varios bosques japoneses. El mismo FRITSCHEN publicó en 1985 un estudio de la influencia de la estructura de las copas sobre dos variables ambientales: la velocidad del viento y la radiación, PERSSON, 1980.

HALLDIN (1985) hace un detallado estudio de la distribución de la superficie transpirante y no transpirante de un bosque de *Pinus sylvestris*, en el que incluye una breve revisión de los principales trabajos publicados hasta entonces con los

que compara los resultados propios. Ver también FLOWER-ELLIS *et al.*, 1980.

Interesa, por todo lo anterior, disponer de modelos que describan cuantitativamente la situación y la distribución espacial de los elementos que componen el vuelo; es decir, que describan la posición de las masas, volúmenes y superficies que definen esos elementos.

Para ello será preciso, en primer lugar, identificar tales elementos o componentes y definir con respecto a ellos y a su situación los siguientes conceptos:

\* *Parámetros dimensionales*, que son las medidas que habitualmente se toman directamente del árbol:

(1) [D, D1, D2, H, H1, H2, L, A] (ver Apéndice 1)

\* *Variables o magnitudes de composición estructural*, que son las representativas de la superficie o volumen de los diferentes elementos que componen el vuelo:

$$[E] \left\{ \begin{array}{l} SE, SF, SM, SA \\ V, V\emptyset, VC, VA \\ P, P1, P2... P6 \end{array} \right\} \text{ (ver Apéndice 1)}$$

Estas variables se expresan como función de los parámetros dimensionales:

$$(2) E = f(\text{parámetros}) \\ E = f(D, D1, \dots, H1)$$

\* *Variables de estructura espacial*, que son las que representan el valor de las variables de composición estructural comprendido entre dos niveles de referencia (entre el suelo y la altura (z), por ejemplo)

$$[E(z)] \left\{ \begin{array}{l} SE(z), SF(z), SM(z), SA(z) \\ V(z), V\emptyset(z), VC(z), VA(z) \\ P(z), P1(z), P2(z), \dots P6(z) \end{array} \right\} \text{ (ver Apéndice 1)}$$

Estas variables se expresan en función de los parámetros (1), de las variables de composición estructural (2) y de la posición (z).

$$(3) E(z) = \Phi(\text{parámetros}, E, z)$$

Además de las variables E(z) se define su complementaria  $\bar{E}(z)$  que es la diferencia,  $\bar{E}(z) = E - E(z)$ .

Así en el caso del volumen,  $V(z)$  representa el volumen desde el suelo hasta el nivel  $(z)$  y  $\bar{V}(z)$  el resto del volumen [ $V-V(z)$ ] siendo  $V$  el volumen total.

Las variables (2) y (3) se pueden referir a árboles individuales o a rodales. En el primer caso las escribiremos con letra minúscula y en el segundo en mayúscula.

Cuando hagamos referencia al conjunto de variables (1) y (2) utilizaremos el subíndice  $(j)$  para una genérica cualquiera y el subíndice  $(i)$  para el árbol genérico  $(i)$ . Así:

$e_{ij}$  es la variable  $(j)$  de composición } del árbol  $(i)$  { total  
 $e_{ij}(z)$  es la variable  $(j)$  de estructura } hasta el nivel  $(z)$

Análogamente designamos los parámetros de un árbol genérico  $(i)$  como  $\{D, D1, \dots, H\}_i$ .

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Finalidad del modelo de estructura del vuelo que proponemos

El resultado final que pretendemos alcanzar es la elaboración de un procedimiento que, partiendo de los datos de inventario de un rodal, de una especie determinada (diámetro medio, altura media, número de pies por hectárea...), permita establecer la distribución vertical de las superficies y volúmenes de los principales elementos que constituyen la biomasa aérea (vuelo) del rodal. La expresión formal de este procedimiento sintético la denominamos MODELO III.

Para llegar a la elaboración del MODELO III, desarrollamos dos etapas previas que denominamos MODELO I y MODELO II.

El MODELO I es un procedimiento de tratamiento de datos y de cálculo que sirve para obtener la distribución vertical de las variables de estructura, utilizando el máximo de información inventarial; es decir, la distribución de todos los parámetros dimensionales  $(D, D1, D2, H, H1, H2, A, L)$  de todos los árboles del rodal. Ver Figura 1.

El MODELO II sirve para calcular la distribución de dichas magnitudes o variables, utilizando la distribución completa de uno de los parámetros

(generalmente el diámetro), y las relaciones entre la distribución de ese parámetro y los restantes. Estas relaciones son distribuciones conjuntas y regresiones entre pares de parámetros. Las regresiones son generalmente de carácter alométrico. El MODELO II proporciona la metodología que estudia estas relaciones y ofrece además como salida posible la distribución calculada de los parámetros que no se introducen como datos. Utiliza datos procedentes del censo de un parámetro y del muestreo de los demás. Ver Figura 2.

El MODELO III, o fase final como se ha dicho, establece una relación directa entre los parámetros usuales de estudio de la masa (valores medios, desviaciones y momentos de uno o dos parámetros) y los parámetros que definen la distribución vertical de esas magnitudes: rango o intervalo de situación de la magnitud, valor medio, desviación, momentos y tipo de distribución. Ver Figuras 3 y 4.

El modelo básico está contenido en el MODELO I como vamos a ver a continuación, y es este modelo el que sirve para elaborar y formular los otros dos.

### 2.2. Fundamentos y proceso de elaboración de los modelos

Aunque en este trabajo vamos a considerar fundamentalmente el MODELO I, exponemos a continuación los principios en que se basan los tres modelos.

#### MODELO I

Este modelo es un esquema de distribución vertical de las transformadas de las variables de estructura, que resulta válido para cualquier árbol de la especie que vegete en las condiciones para las que se determina.

Para mejorar esta invariancia en la distribución vertical se transforman lo mismo las variables de estructura  $E(z)$  que la coordenada  $(z)$ . La transformación más sencilla que hemos utilizado es la normalización de cada variable dividiendo su valor por el valor total o máximo.

Desde hace algunos años, venimos llevando a cabo estudios en diferentes especies para verificar el carácter estable de los perfiles medios obtenidos al expresar cada variable de estructura normalizada en función de la altura también norma-

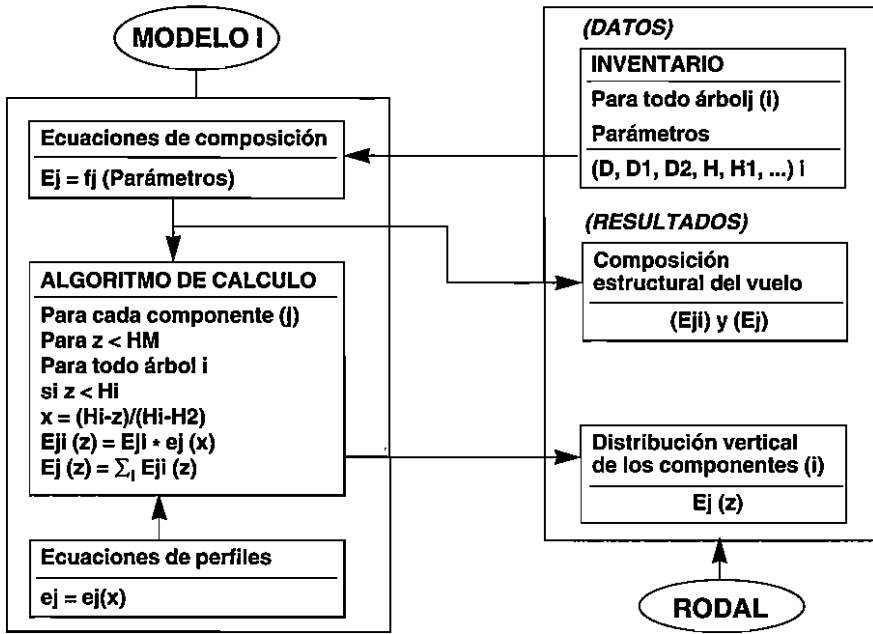


Fig. 1. MODELO I.

lizada. Los resultados obtenidos aconsejan la continuación de estas experiencias, especialmente los obtenidos a partir de repoblados de *Eucalyptus globulus* en la zona costera de Huelva.

Para elaborar el MODELO I se eligen árboles tipo, representativos de la masa del rodal, y se miden y apean para obtener de ellos los valores de las magnitudes de composición y estructura (E).

La distribución vertical de cada árbol tipo se determina fraccionando su copa en estratos sucesivos y midiendo para cada estrato la superficie foliar y externa, el volumen de copa, etc.; es decir, las magnitudes (E).

Acumulando los valores desde la cima del árbol hasta un nivel (z) y dividiendo el acumulado hasta (z) por el valor total, obtenemos los valores normalizados correspondientes a cada valor de (z) elegido. La coordenada (z) se transforma según la fórmula homográfica:

$$(4) \quad x = \frac{H - z}{H - H_2} \quad (\text{Ver Figuras 5 y 6})$$

Cada variable de estructura normalizada se expresa en función de (x).

Así, por ejemplo,  $sf(x) = \frac{sf(z)}{sf}$ , para la superficie foliar.

En general:

$$(5) \quad e(x) = \frac{e(z)}{e}$$

A la expresión  $e = e(x)$  que relaciona (x), transformada de (z), con e, transformada de la variable de estructura, la denominamos modelo básico.

El conjunto de pares de valores  $\left\{ \frac{e(z)}{e}, x \right\}$  de cada variable, obtenidos de esta forma, sirve para establecer las relaciones funcionales que constituyen el denominado MODELO I, utilizando para ello las fórmulas de composición estructural  $e=f(\text{parámetros})$ .

La Figura 6 ofrece un ejemplo de perfiles de la superficie envolvente de la copa a) y del volumen encerrado por esa superficie o volumen aparente b), así como un esquema de la correspondencia entre la variable altura (z) y su transformada x, c).

El conjunto de las ecuaciones de composición (2), los perfiles (5) y un método o algoritmo del cálculo, que sirve para aplicarlos a un rodal o conjunto de árboles, constituye el MODELO I:

$$\left. \begin{aligned}
 &e = f(\text{parámetros}) \\
 (5)' \quad e(x) &= \frac{e(z)}{e} = \frac{e[x(H - H_2) - H_1]}{e}
 \end{aligned} \right\} \text{MODELO I}$$

Algoritmo de cálculo

La hipótesis de que los perfiles de todos los árboles obtenidos normalizando las variables son coincidentes es una condición muy fuerte.

Trabajos anteriores establecen supuestos aún más alejados de la realidad. STEPHENS (1969) considera que las distribuciones individuales de las magnitudes de los elementos que componen la copa, son normales, centradas en el tramo verde de dicha copa. HADLLIN (1985) trabaja con la hipótesis de una distribución triangular para cada árbol, PEREDA *et al.* 1980 y BEADLE *et al.* 1982. Al agregar los resultados de aplicar estas hipótesis resulta para el rodal una distribución muy próxima a la normal en los dos casos. Este feliz resultado no puede considerarse sin embargo como una confirmación de la validez de la hipótesis adoptada para la distribución individual. El Teorema Central del límite puede explicarlo. Se pone de manifiesto cierta independencia entre la distribución individual y el tipo de la final; pero los parámetros de la distribución están condicionados por dicha distribución individual.

Nuestra hipótesis se relaja si consideramos el perfil del MODELO I como un perfil medio y lo utilizamos acompañado de un término de error. Aunque hemos calculado este sumando aleatorio, prescindimos de él en esta presentación en beneficio de la claridad.

Como señalamos anteriormente, las transformaciones de las variables utilizadas fueron las más sencillas posibles. Hemos ensayado otras homografías para aproximarnos a la forma de las copas, pero no encontramos mucha precisión en el marco de las formas euclídeas. Por el contrario, algunos tanteos dentro de la geometría «fractal» parecen prometedores, aprovechando el poten-

cial para generar formas arborescentes de las transformaciones homográficas aplicadas reiterativamente a partir de un módulo y la independencia de la forma final respecto al módulo inicial. (Recordamos a este propósito la generación de un helecho partiendo de un rectángulo y una transformación sencilla, ZEIDE *et al.*, 1991).

### MODELO II

El conjunto de los perfiles y de las ecuaciones de composición (e) del MODELO I puede ser directamente utilizado para obtener la distribución vertical del vuelo, si se dispone de todas los valores de parámetros que figuran en dichas fórmulas. El número de estos parámetros es excesivo puesto que incluye la distribución de todas las variables dimensionales (1) (D, DØ, H, H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, A, ...), es decir, el valor de todos esos parámetros para cada árbol del rodal.

Generalmente no se dispone del valor de todos los parámetros individuales del rodal, se cuenta habitualmente con la distribución de uno de ellos (el diámetro normal o la altura total) obtenida mediante inventario extenso (conteo censal o muestreo estadístico), y con relaciones entre éste y los demás parámetros ajustados a partir de datos de muestreo.

Para elaborar el MODELO II se siguen dos vías de dificultad diferente: Una en la que se utilizan las regresiones entre los parámetros generales con el diámetro (o con el parámetro básico), expresando todas las variables de composición estructural en función de ese parámetro (D).

Este conjunto de ecuaciones se incorporan al modelo junto con las de los perfiles individuales del modelo básico, e = e(x).

La segunda vía consiste en el cálculo de las matrices de distribución conjunta de cada par de parámetros, especialmente las distribuciones (H, H1) y (H, D), las cuales junto con las regresiones anteriores nos remiten a la situación de información completa (calculada) del MODELO I.

La simulación partiendo de diferentes composiciones del vuelo permite establecer otras relaciones simplificadoras y conocer los límites y funciones de error. (Ver Figura 2).

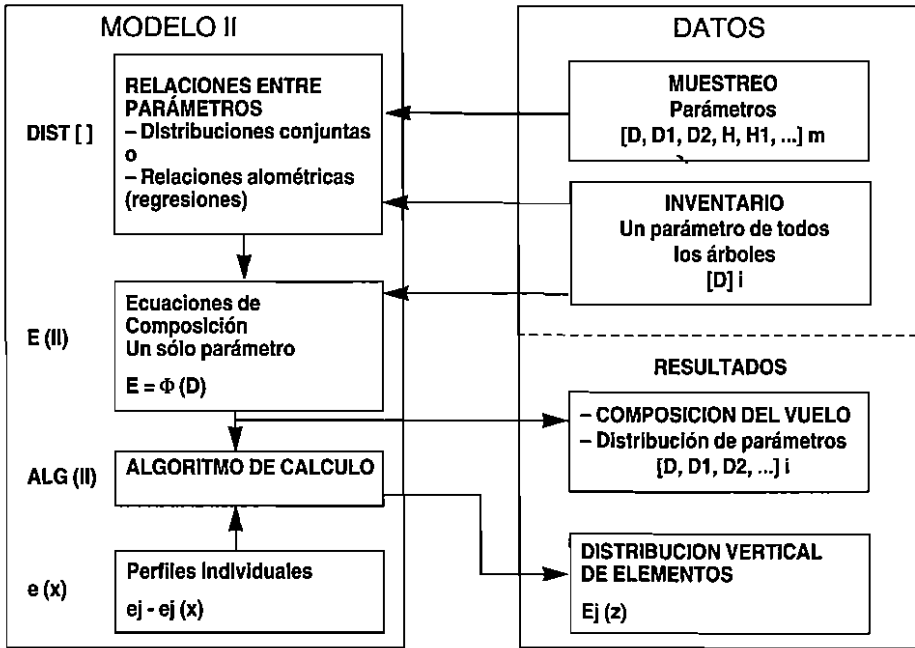


Fig. 2. MODELO II.

**MODELO III**

Se obtiene aplicando el modelo básico,  $e = e(x)$  a diferentes distribuciones de todos los parámetros y extrayendo las relaciones entre parámetros de esta distribución y los de distribución vertical de las variables según se representa en la Figura 3 (ver también Figura 4).

**3. OBTENCION Y APLICACION DEL MODELO I**

Partiendo de la información obtenida en los estudios llevados a cabo en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de 14 años de edad, se presenta la metodología para obtener el MODELO I, que es el que vamos a estudiar en este trabajo.

Se aplica a un rodal de características análogas al área de selección de árboles tipo y se obtiene la distribución vertical de dicho rodal para las siguientes variables estructurales (E):

- Volumen sólido de las copas VSC (z).
- Superficie externa foliar SF (z).
- Superficie externa no foliar SE (z).
- Superficie externa no foliar de copas SEC (z).
- Superficie externa no foliar de fustes SEF (z).

Finalmente haremos un somero análisis de las distribuciones obtenidas, comparándolas con la distribución normal y Log-normal.

Para la superficie foliar, hemos llevado a cabo también un ensayo del MODELO II, prescindiendo de parte de la información disponible para comparar los resultados.

Dejamos, por lo tanto, pendiente el análisis de lo que hemos denominado MODELOS II y III; únicamente, como hemos dicho, hacemos una aplicación al caso de la superficie foliar.

**3.1. Material y métodos**

*Elección de árboles tipo*

El punto de partida es una muestra de árboles tipo (AT) elegidos en la masa o rodal por un procedimiento de muestreo habitual. En este caso se procedió mediante muestreo sistemático y selección distribuida por clases diamétricas proporcionalmente a la distribución de la población. Las muestras de (AT) fueron obtenidas de repoblados de edades de 4, 7, 10 y 14 años; considerando la muestra de cada edad separadamente

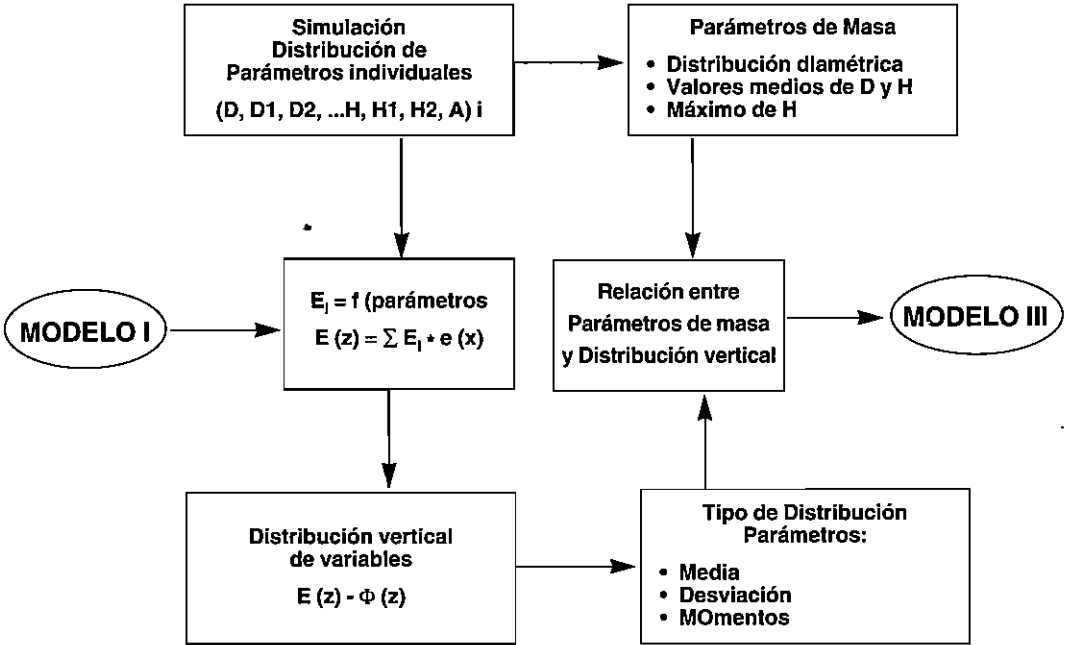


Fig. 3. Generación del MODELO III.

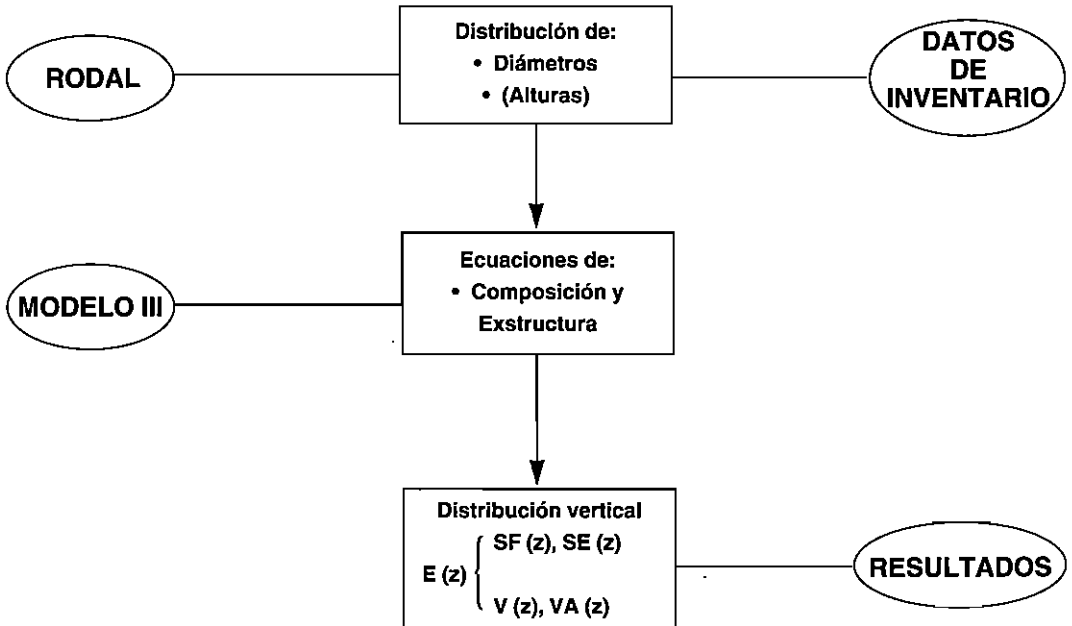


Fig. 4. MODELO III.

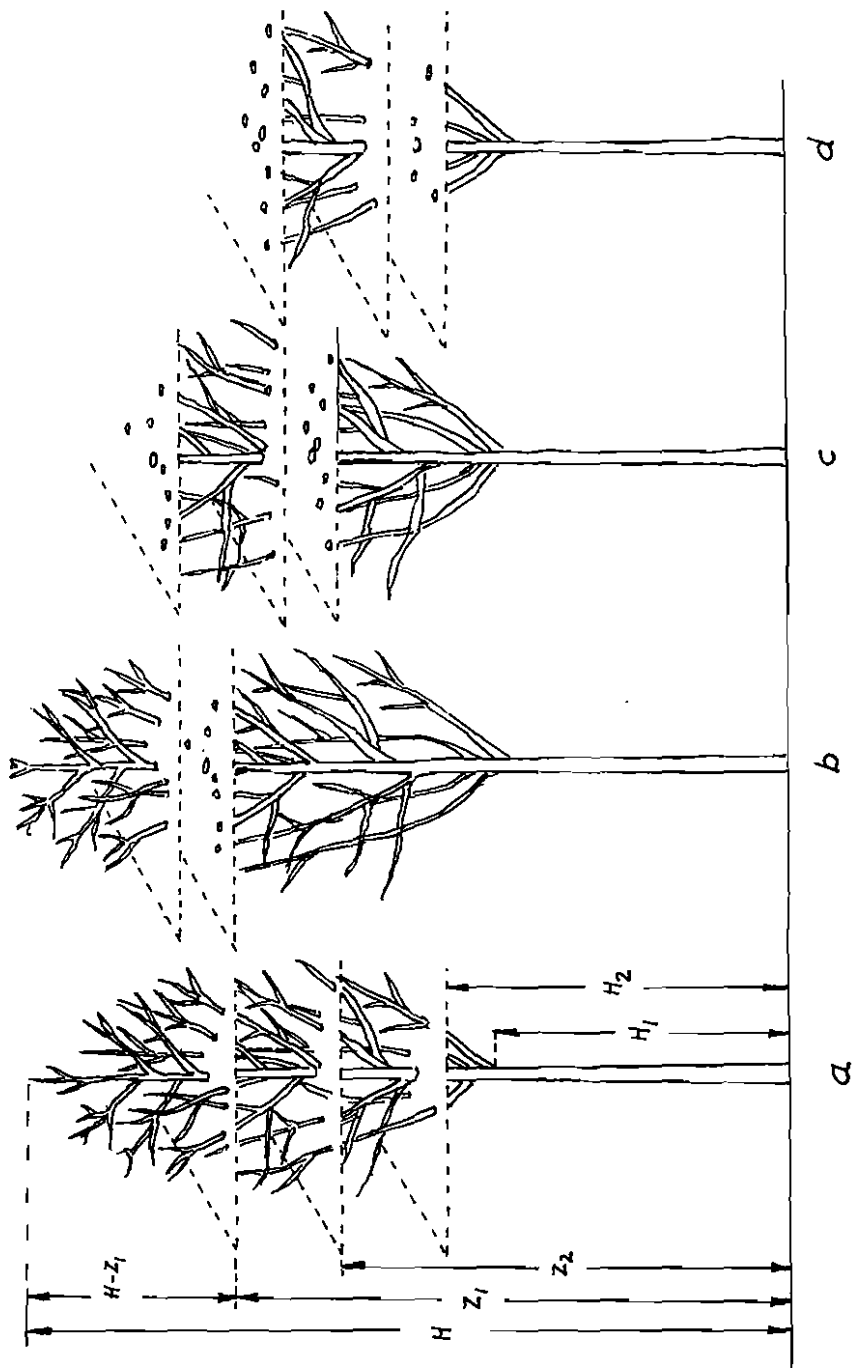


Fig. 5. División de la copa en estratos para un análisis y medición.



para el análisis posterior. Se eligieron unos 30 árboles tipo para cada edad.

*Mediciones en pie de los árboles tipo*

Previo al apeo, se efectúa la medición de anchura de copa a varias alturas conocidas, dividiendo el conjunto de la copa en tres o cuatro bloques separados por planos horizontales cuya intersección con el fuste se señala en él y en las ramas mayores. Ver Figura 5.

*Apeo de los árboles tipo*

Se lleva a cabo con el máximo cuidado, haciendo un derribo controlado mediante sujeción con vientos laterales, para evitar el arrastre de ramas de árboles vecinos o desprendimiento de ramas propias.

*Mediciones en los árboles tipo apeados*

La primera operación, una vez apeados, consiste en replantear la división en estratos de la copa, de forma que vuelvan a su posición inicial aquellas ramas que hayan sido desplazadas.

Se miden todos los parámetros dimensionales a que nos hemos referido [D, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, H, H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, L, A, ...].

A partir del extremo superior de la copa y tomando porciones de 1 m (o mayores), medidas sobre el fuste, se procede a la medición, recogida y clasificación de todo el material de tronco, ramas, hojas y frutos, dentro de cada estrato.

- Los frutos se cuentan y pesan.
- Las hojas se extraen y pesan, tomando una muestra para determinar la superficie.
- Las ramillas se trocean en porciones de longitud fija, se pesan y miden por clases diamétricas. Una muestra se recoge para evaluar el porcentaje de corteza.
- Las ramas más gruesas se pesan igualmente y se extrae una muestra de ellas.
- Se efectúa un análisis del fuste troceándolo en porciones de 1 m.

En las Tablas I y II figuran los resultados de las mediciones generales y de la copa del árbol n.º 53, uno de los 30 apeados para elaborar el modelo de un rodal de *E. globulus* de 14 años.

TABLA I  
PARAMETROS DE LAS DIMENSIONES Y VARIABLES DE LOS COMPONENTES MEDIDOS EN CADA ÁRBOL TIPO. (VALORES DEL ÁRBOL N.º 53)

	Denominación	Símbolo	Valor	Unidades
DIMENSIONES [Parámetros]	ÁRBOL NUMERO		53	
	Fecha de apeo		14/12/83	
	Diámetro normal (sc)	DØ	19,5	[cm]
	Diámetro normal (cc)	D	22,6	[cm]
	Altura total	H	19,3	[m]
	Altura del ancho máximo de copa	H1	15,0	[m]
	Altura de la base de la copa	H2	11,0	[m]
	Longitud de la copa	L	8,3	[m]
	Diámetro (cc) base de copa	D2	13,1	[cm]
	Ancho máximo de copa	A	3,0	[m]
COMPONENTES [E]	Volumen del fuste (sc)	vØ	270	[dm <sup>3</sup> ]
	Volumen del fuste (cc)	v	342	[dm <sup>3</sup> ]
	Peso del fuste (sc)	pØ	302	[kg]
	Peso del fuste (cc)	p	370	[kg]
	p + ramas maderables (Rm)	p1	370	[kg]
	p1 + ramas gruesas (RG)	p2	373	[kg]
	p2 + ramas medias (Rm)	p3	385	[kg]
	p3 + ramillas (r)	p4	401	[kg]
	p4 + hojas	p5	427	[kg]
	p5 + frutos	p6	455	[kg]
	Superficie del fuste	s	8,28	[m <sup>2</sup> ]
	Superficie del raberón	sr	1,99	[m <sup>2</sup> ]
	Superficie meridiana de la copa	sm	18,77	[m <sup>2</sup> ]
	Superficie aparente de la copa	sa	63,64	[m <sup>2</sup> ]
	Superficie foliar total	sf	53,32	[m <sup>2</sup> ]
	Volumen sólido de copa	vc	76,9	[dm <sup>3</sup> ]
Volumen aparente de copa	va	39,14	[m <sup>3</sup> ]	
Volumen del raberón	vr	46,7	[dm <sup>3</sup> ]	
Peso de las hojas	ph	26,47	[kg]	

*Tratamiento de los datos obtenidos de los Árboles Tipo*

En primer lugar, utilizando los valores de los parámetros y de los componentes, se obtienen las relaciones entre las variables de composición estructural [E] y los parámetros dimensionales, cuyo conjunto contiene las tarifas de cubicación. Son de tipo alométrico, por ejemplo para el volumen del fuste

$$v = a \cdot D^b \cdot H^c$$

Estas relaciones se ajustan por el método de mínimos cuadrados.

Los resultados figuran en la Tabla III, en forma logarítmica.

En segundo lugar, se obtiene la tabla de transformadas de las variables estructurales, que ser-

virán para ajustar el MODELO I. Para ello, a partir de los datos de la Tabla IIa se obtienen los de la Tabla IIb.

#### *Etapas de obtención del modelo individual MODELO I*

Comprende:

- \* La elaboración de las tablas de valores normalizados.
- \* La elección del tipo de ecuaciones de ajuste.
- \* El ajuste y validación.
- \* El cálculo de la función de error.

#### *Tablas de valores normalizados*

Se obtienen los valores acumulados desde la cima de cada árbol tipo hasta los sucesivos planos que delimitan los bloques, que son los complementarios de los que figuran en el ejemplo de la Tabla IIb.

#### *Elección del tipo de ecuaciones*

Para obtener los perfiles que relacionan los valores de  $(x)$  con los de las variables estructurales normalizados  $[e(x)]$  se ensayaron modelos polinómicos y exponenciales. Los modelos elegidos han de satisfacer las condiciones de borde  $e(0) = 0$  y  $e(1) = 1$  como funciones de distribución acumuladas.

TABLA II  
a) RESUMEN DE DATOS DE ESTRUCTURA VERTICAL DE LA COPA DE UN ARBOL TIPO  
(VALORES DEL ARBOL N.º 53)

(z)	Altura sobre el nivel del suelo	[m]	normal 1,3	H <sub>2</sub> 11	12,5	H <sub>1</sub> 15	17	Total 19,3
d(z)	Diámetro del fuste (cc) en z	[cm]	22.6	13.1	10.8	8.6	5.6	0
a(z)	Ancho de copa en (z) a (z)	[m]		0	3	3	2.8	0
	Número de ramas			1		102	133	1
	Diámetro medio de ramas	[cm]		13.1		5.2	5.3	0
	Diámetro cuadrado medio de ramas	[cm]		13.1		10.1	7.2	0
	Sección normal	[cm <sup>2</sup> ]		134.78		81.68	53.76	0
sm(z)	Superficie meridiana acumulada	[m <sup>2</sup> ]		0	2.25	9.75	15.55	18.77
vc(z)	Volumen sólido copa acumulada	[dm <sup>3</sup> ]		0		47.39	66.17	76.86
sf(z)	Superficie foliar acumulada	[m <sup>2</sup> ]		0		10.61	30.59	53.32
sa(z)	Superficie aparente acumulada	[m <sup>2</sup> ]		0	10.0	33.56	51.80	63.64
va(z)	Volumen aparente	[m <sup>3</sup> ]		0	3.5	21.21	34.42	39.14

TABLA II  
b) VALORES NORMALIZADOS PROCEDENTES DE a)

(z)	Altura sobre el nivel del suelo	[m]	normal 1,3	H <sub>2</sub> 11	12,5	H <sub>1</sub> 15	17	Total 19,3
(x)	(H-z)/(H-H <sub>2</sub> )			1	0.819	0.518	0.227	0
sm(x)	Superficie meridiana acumulada			0	0.120	0.519	0.828	1
vc(x)	Volumen sólido copa acumulada			0		0.617	0.861	1
sf(x)	Superficie foliar acumulada			0		0.199	0.574	1
sa(x)	Superficie aparente acumulada			0	0.157	0.527	0.814	1
va(x)	Volumen aparente			0	0.089	0.542	0.879	1

Los perfiles ajustados son los acumulados o de distribución desde  $x = 0$  a  $x = 1$ .

*Proceso de ajuste de los modelos*

Se reduce al modelo lineal efectuando las transformaciones adecuadas para conseguir que se cumplan las hipótesis del modelo.

Para que se cumplan las condiciones de borde se aplica el método de multiplicaciones de Lagrange al establecer las condiciones de mínimo de los residuos por el método de mínimo-cuadrático, o se eligen ecuaciones que satisfacen esta exigencia.

Se han tomado las precauciones de rigor para reducir los efectos de multicolinealidad en los modelos de polinomio. También se ha limitado el grado del polinomio mediante ajustes sucesivos para evitar el ajuste de los restos.

Los resultados para la plantación de 14 años se resumen en la Tabla IV.

**4. RESULTADOS**

**4.1. MODELO I. Pefiles individuales**

El resultado de aplicar la metodología anterior a un conjunto de 30 árboles tipo de la plantación de 14 años, se expone en forma gráfica, de ecuaciones matricial simbólica y de tablas.

*En Formna Gráfica*

En las Figuras 6-a, 6-b, 6-c; 7-a, 7-b, 7c.

*En forma de ecuaciones*

Componentes estructurales  $E = f$  (parámetros) en la Tabla III.

Perfiles individuales  $e = e(x)$  en la Tabla IV.

*En forma matricial simbólica*

Componentes estructurales  $E = f$  (parámetros) en la Tabla V.

Perfiles individuales  $e = e(x)$  en la Tabla VI.

*En forma tabular de frecuencias acumuladas*

Perfiles en la Tabla VII.

**4.2. MODELO I. Aplicación. Distribución vertical**

Se ha aplicado el MODELO I anterior a un rodal de las características del área de que fueron selec-

cionados los Arboles Tipo para elaborar el modelo individual. La aplicación se hizo pie a pie, puesto que se disponía del inventario individualizado de rodal con el valor de todos los parámetros dimensionales de cada árbol, utilizando el algoritmo de cálculo o programa elaborado para el MODELO I.

No incluimos los datos inventariales, por su excesiva extensión, únicamente los principales parámetros y variables de masa:

Densidad de plantación inicial	625 [pies/ha]
Arboles vivos en la fecha de inventario	511 [pies/ha]
Diámetro medio normal	19,2 [cm]
Media de la altura total	18,6 [m]
Altura total máxima	25,0 [m]
Altura de la base de copas mínima	2,0 [m]
Altura de la base de copas media	10,1 [m]
Area basimétrica	18,1 [m <sup>2</sup> /ha]
Volumen de los troncos sin corteza	103,4 [m <sup>3</sup> /ha]
Volumen de los troncos con corteza	125,45 [m <sup>3</sup> /ha]
Volumen sólido total	144,59 [m <sup>3</sup> /ha]
Peso fresco de la biomasa aérea total	158,30 [cm/ha]
Peso foliar (fresco)	11,5 [cm/ha]
Superficie foliar total	39,52 [m <sup>2</sup> /ha]
Crecimiento corriente del tronco	8,3 [m <sup>3</sup> /ha]
Crecimiento corriente de la biomasa total	9,6 [cm/ha]

*Algoritmo de cálculo*

- 1) Para cada árbol (i) se calculan los valores totales de la variable de composición estructural. Ejemplo:  $E_i \{v_i / vc_i / sf_i / se_i / \dots etc\}$ .
- 2) Se generan valores de (z) de metro en metro a partir de la altura máxima del rodal (HM).
- 3) Para cada (z), se toman uno a uno los árboles que tienen altura total superior a (z)  $H_i > z$ .
- 4) Se determina el valor de (x) para ese árbol (xi) en función de (z).
- 5) Se obtiene el valor acumulado de cada magnitud estructural de ese árbol desde la cima hasta el nivel z.

$$E_i(z) = E_i * e(xi)$$

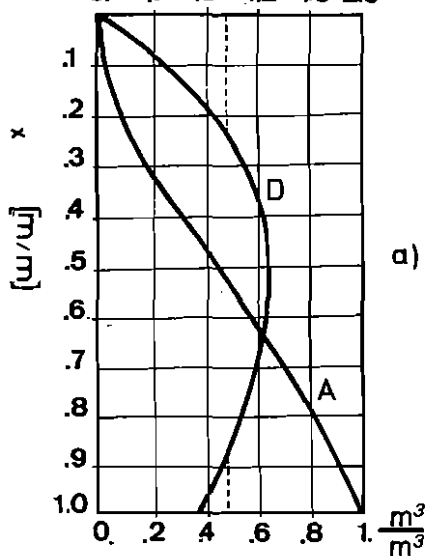
- 6) Se suman para cada (z) todos los valores obtenidos por árbol.

$$E(z) = \sum E_i(z)$$

Esta es la distribución vertical de la magnitud E, Figura 11.

sa ∞ SUPERFICIE ENVOLVENTE

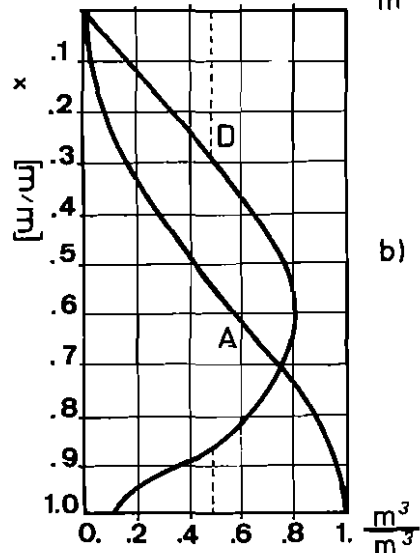
(copa)  $\frac{m^2/m^2}{m/m}$



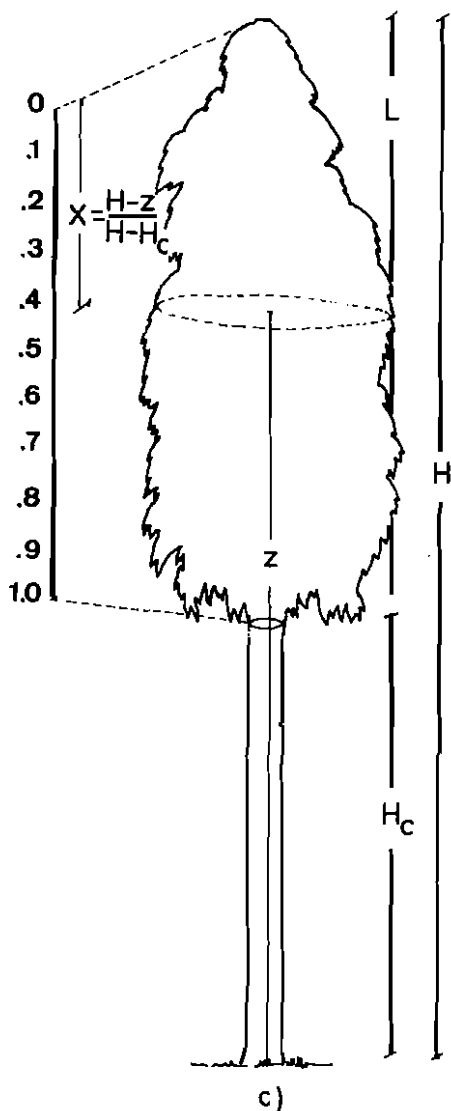
a)

sf ∞ VOLUMEN APARENTE

(copa)  $\frac{m^3/m^3}{m/m}$



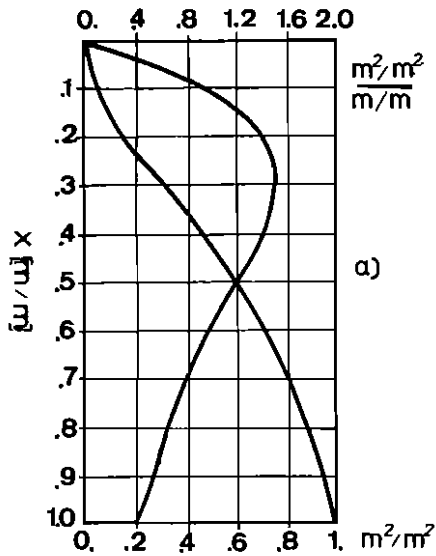
b)



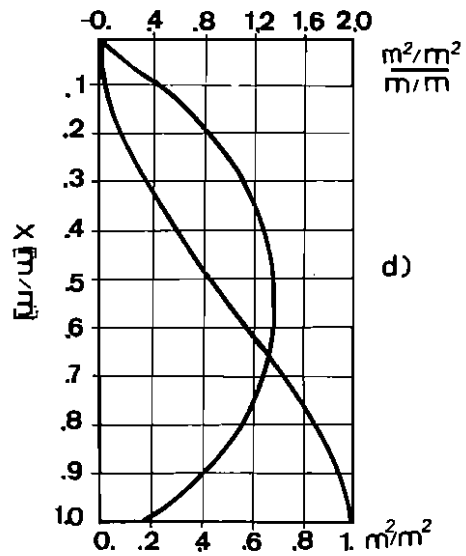
c)

Fig. 6. Perfiles individuales medios en la superficie envolvente a), volumen aparente de copa, b) y transformada homográfica de z, c).

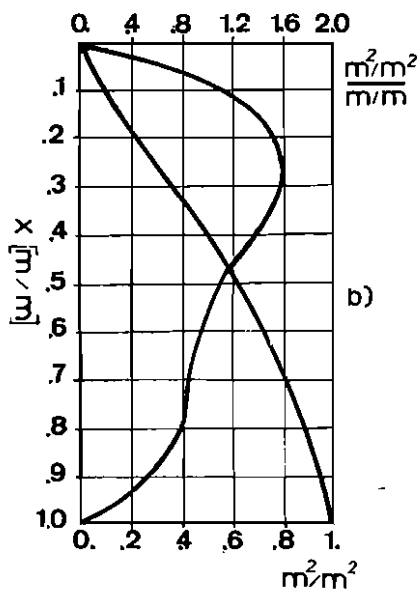
**[s<sub>ex</sub>(x)] SUPERFICIE EXTERNA  
(no foliar)**



**[s<sub>mx</sub>(x)] SUPERFICIE MERIDIANA**



**[s<sub>fx</sub>(x)] SUPERFICIE EXTERNA  
foliar**



**[v<sub>sx</sub>(x)] VOLUMEN SÓLIDO  
(copa + rabeón)**

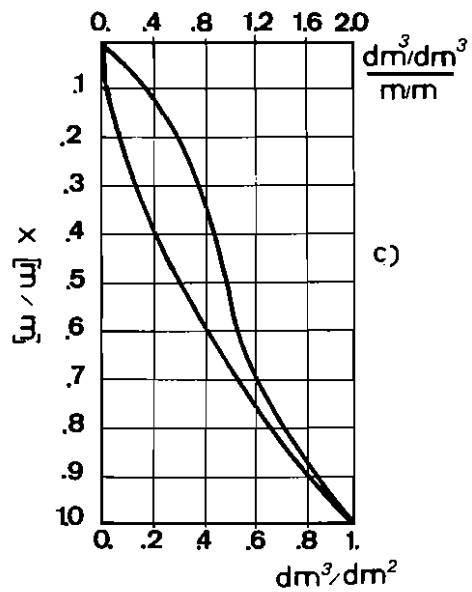


Fig. 7. Perfiles individuales medios de superficie externa a), superficie foliar b), volumen sólido de la copa c) y superficie meridiana d).

TABLA III  
 ECUACIONES DE REGRESION DE LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES  
 (TARIFAS DE CUBICACION) E= f (PARAMETROS)

	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>5</sub>	m <sub>6</sub>	m <sub>7</sub>
Superficie envolvente de copas (sa)	29.52	-1.99	1.50	0.00	0.00	0.00	1.05	0.70
Superficie externa no foliar (se)	0.01	8.07	-2.42	2.15	-1.00	0.00	-5.65	0.00
Superficie externa fuste (sef)	0.025	0.96	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
Superficie foliar (sf)	180.19	-3.79	2.25	1.17	0.00	-2.83	3.02	0.35

$$\left. \begin{array}{l} sa \\ se \\ sef \\ sf \\ sm \\ v \\ va \\ vc \end{array} \right\} = m_0 H^{m_1} L^{m_2} D^{m_3} D_2^{m_4} H_1^{m_5} H_2^{m_6} A^{m_7}$$

Superficie meridiana de copas (sm)	2.65	-1.75	1.74	0.00	0.00	0.00	1.08	0.66
Volumen de fuste (v)	0.045	1.01	0.00	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00
Volumen aparente de copas (va)	19.07	-3.31	2.05	0.00	0.00	0.00	1.82	1.41
Volumen sólido de copas (vc)	0.0005	8.07	-2.42	2.15	0.00	0.00	-5.65	0.00

TABLA IV  
ECUACIONES DE LOS PERFILES INDIVIDUALES  $e = e(x)$

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
Superficie foliar $sf(x)$	0	8.067	-18.242	17.282	-6.107
Superficie externa $se(x)$	0	6.62	-12.47	9.70	-2.84
Superficie meridiana $sm(x)$	0	2.781	-2.013	0.232	0
Superficie aparente $sa(x)$	0	2.918	-2.624	0.706	0

$$\left. \begin{array}{l} f(x) \\ e(x) \\ m(x) \\ sa(x) \\ vc(x) \\ b(x) \\ y(x) \end{array} \right\} = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5$$

Volumen sólido de copa $vc(x)$	0	1.943	-1.962	1.020	0
Volumen aparente $va(x)$	0	1.448	1.235	-1.683	0
Sección fuste y ramas $b(x)$	1.408	-0.802	0.394	0	0
Perfil de fuste	0	1.723	2.215	-7.575	4.637
$y = \left\{ \frac{d(z)}{D} \right\}^2 x_1 = \frac{z - 1.3}{H - 1.3}$					

TABLA V

MATRIZ QUE RESUME LOS COEFICIENTES DE LAS VARIABLES DE COMPOSICION ESTRUCTURAL EN FUNCION DE LOS PARAMETROS DIMENSIONALES (LINEALIZADOS POR TRANSFORMACION LOGARITMICA)

$$\begin{bmatrix} \text{Log [sa]} \\ \text{Log [se]} \\ \text{Log [sef]} \\ \text{Log [sf]} \\ \text{Log [sm]} \\ \text{Log [v]} \\ \text{Log [va]} \\ \text{Log [vc]} \\ \text{Log [p0]} \\ \text{Log [p6]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.38 & -1.99 & 1.50 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.05 & 0.70 \\ -4.60 & 8.07 & -2.42 & 2.15 & -1.00 & 0.00 & -5.65 & 0.00 \\ -3.70 & 0.96 & 0.00 & 0.95 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 5.19 & -3.79 & 2.25 & 1.17 & 0.00 & -2.23 & 3.02 & 0.35 \\ 0.94 & -1.75 & 1.74 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.08 & 0.66 \\ -3.10 & 1.01 & 0.00 & 1.90 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 2.95 & -3.31 & 2.05 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.82 & 1.41 \\ -7.62 & 8.07 & -2.42 & 2.15 & 0.00 & 0.00 & -5.65 & 0.00 \\ -2.94 & 1.05 & 0.00 & 1.83 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -1.82 & 0.72 & 0.00 & 1.84 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ \text{Log [H]} \\ \text{Log [L]} \\ \text{Log [D]} \\ \text{Log [D2]} \\ \text{Log [H1]} \\ \text{Log [H2]} \\ \text{Log [A]} \end{bmatrix}$$

Ejemplo:  $\text{Log [sa]} = 3.38 - 1.99 \text{Log [H]} + 1.5 \text{Log [H}_1\text{]} + 0,7 \text{Log [H}_2\text{]}$ .

TABLA VI

MATRIZ QUE RESUME LOS COEFICIENTES DE LAS REGRESIONES DE LOS PERFILES INDIVIDUALES DEL MODELO  $I e = e(x)$

$$\begin{bmatrix} sf(x) \\ se(x) \\ vc(x) \\ b(x) \\ sm(x) \\ sa(x) \\ va(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00 & 8.07 & -18.24 & 17.28 & -6.11 \\ 0.00 & 6.62 & -12.47 & 9.70 & -2.84 \\ 0.00 & 1.94 & -1.96 & 1.02 & 0.00 \\ 1.41 & -0.80 & 0.39 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 2.78 & -2.01 & 0.23 & 0.00 \\ 0.00 & 2.92 & -2.62 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 1.45 & 1.23 & -1.68 & 0.00 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \\ x^5 \end{bmatrix}$$

Ejemplo:  $sf(x) = 8.07x^2 - 18.24x^3 + 17.28x^4 - 6.11x^5$

TABLA VII

PERFILES INDIVIDUALES, FRECUENCIAS ACUMULADAS DE 0 A 1  
 $X = (H - z)/(H - H_2)$

x	sf(x) Superficie foliar	se(x) Superficie externa no foliar	vc(x) Volumen sólido de copas	sm(x) Superficie meridiana de copas	sa(x) Superficie envolvente de copas	va(x) Volumen aparente de copas
0.1	0.064	0.055	0.018	0.026	0.027	0.016
0.2	0.202	0.179	0.064	0.096	0.097	0.065
0.3	0.359	0.33	0.130	0.198	0.197	0.150
0.4	0.503	0.479	0.211	0.322	0.317	0.268
0.5	0.626	0.612	0.304	0.458	0.446	0.411
0.6	0.728	0.723	0.408	0.596	0.875	0.570
0.7	0.819	0.815	0.524	0.728	0.699	0.729
0.8	0.901	0.889	0.656	0.844	0.813	0.870
0.9	0.968	0.951	0.812	0.937	0.915	0.960
1.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000



El resultado de la aplicación, MODELO I, se recoge

*En forma gráfica* - Figs. 8, 9 y 10.

*En forma tabular* - Tablas VIII, IX y X.

### 4.3. MODELO II. Resultados

Hemos hecho una aplicación del procedimiento descrito para el MODELO II, utilizando los mismos datos anteriores pero tomando los datos completos de un solo parámetro: los de la altura total H.

Presentamos aquí algunos resultados del desarrollo, siguiendo las dos vías señaladas: análisis de la distribución conjunta de parámetros y ajuste de regresiones entre parámetros.

*Distribución de la altura total (H) y de la altura de la base de copas (H<sub>2</sub>)*

Transformados de H y H<sub>2</sub> que se ajustan a la distribución normal.

De H

$$y = \frac{1}{30^2} \left[ \text{Log} \frac{H}{30 - H} + \frac{30}{30 - H} \right]$$

De H<sub>2</sub>

$$z = \frac{1}{23^2} \left[ \text{Log} \frac{H_2}{23 - H_2} + \frac{23}{23 - H_2} \right]$$

*Regresiones entre parámetros*

$$D = -3.2 + 1.16 * H$$

$$H_2 = 1.81 + 0.44 * H$$

*Regresiones entre las variables de estructura y el diámetro y la altura*

$$sf = 0.717 * D^{1.365}$$

### 4.4. Comparación entre los datos obtenidos mediante aplicación de los MODELOS I y II.

Consideramos la distribución de la superficie foliar por los procedimientos:

a) MODELO I, utilizando toda la información.

b) MODELO II,

— utilizando la distribución de un parámetro como dato y

— calculando las regresiones respecto a ese parámetro de las variables de composición.

— ajustando la distribución de los demás parámetros, mediante una muestra.

c) MODELO II, como en b) sin ajuste de distribuciones.

Los resultados se recogen en la Tabla XI.

## 5. DISCUSION

Modelo básico

Las fórmulas que expresan el valor de las variables de composición [e<sub>j</sub>] en función de los parámetros dimensionales [D, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, H, H<sub>1</sub>, ...] fueron ajustadas mediante formas alométricas y linealizadas por transformación logarítmica. Se obtuvieron distintos ajustes modificando el número de parámetros como regresores; los que se incluyen ofrecen un coeficiente de determinación superior siempre a 0.9.

Las ecuaciones que representan los perfiles individuales medios [e<sub>j</sub>(x)] se ajustaron utilizando fórmulas polinómicas. Los ajustes ofrecen también un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) mayor que 0.9. También se ensayaron fórmulas exponenciales, como

$$y = \text{Exp} \left[ a \left( \frac{1-x}{x^2} \right)^b \right]$$

que para el área foliar resultó:

$$sf(x) = \text{Exp} \left[ 0.283 \left( \frac{1-x}{x^2} \right)^{0.57} \right]$$

Por uniformidad de los resultados presentamos sólo las formas polinómicas

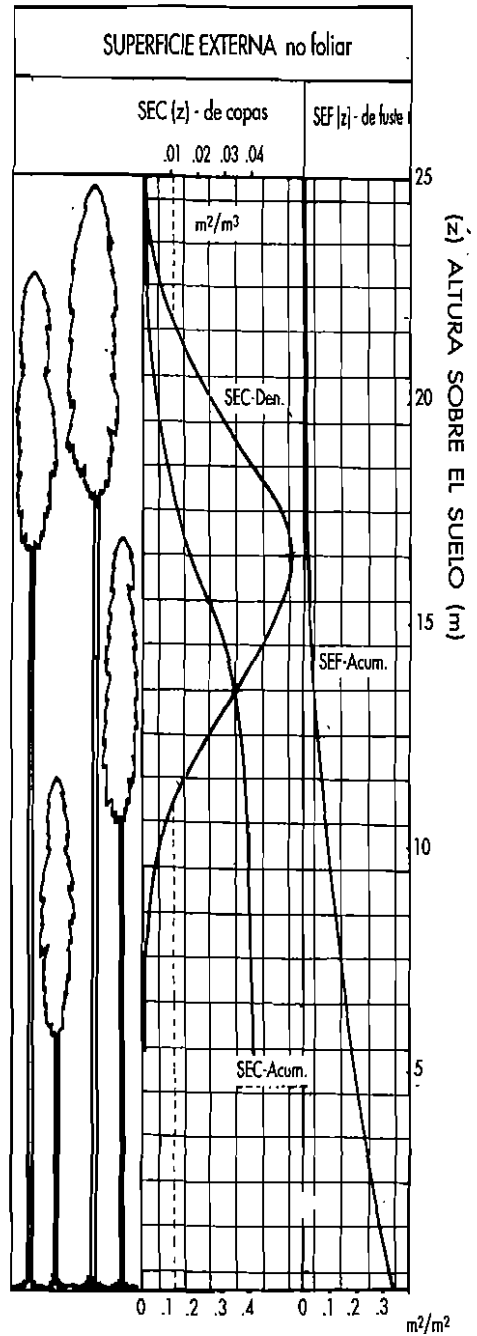
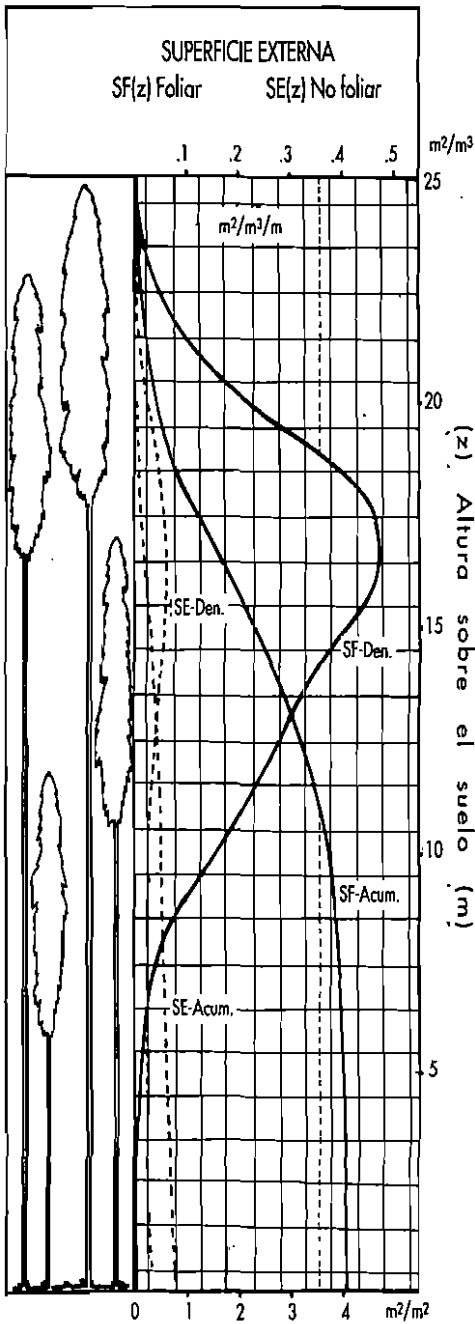


Fig. 8. Distribución vertical de la superficie externa foliar y no foliar en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 14 años.

Fig. 9. Distribución vertical de los diferentes componentes de la superficie no foliar en un repoblado de *Eucalyptus globulus* de 14 años.

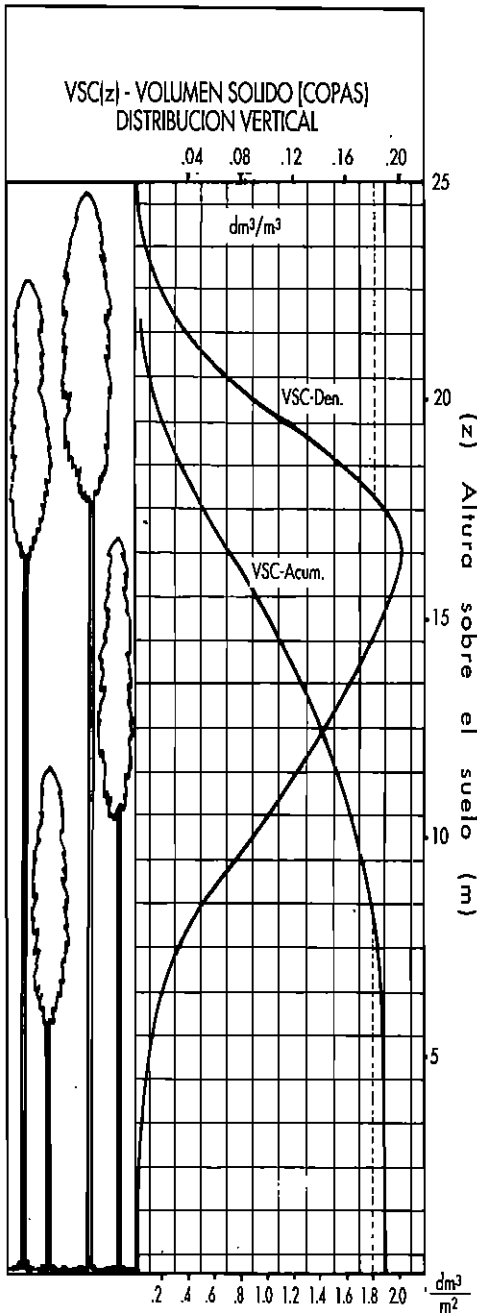
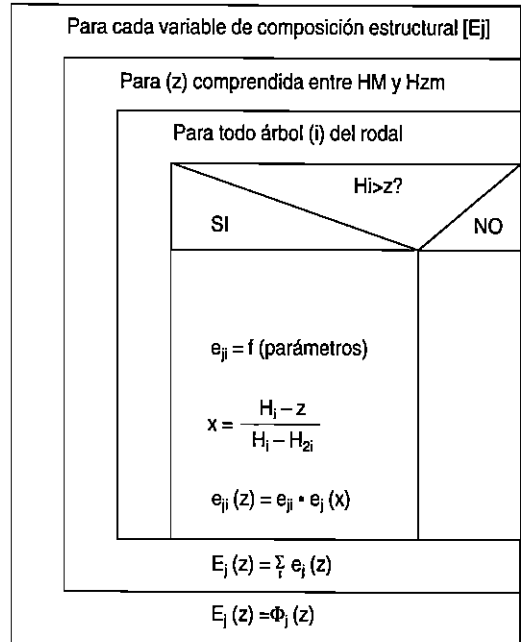


Fig. 10. Distribución vertical del volumen sólido de las copas en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 14 años.



[HM]: máximo de [H] en el rodal  
[H<sub>2m</sub>]: mínimo de [H<sub>2</sub>] en el rodal

Fig. 11. Algoritmo de cálculo

### Distribuciones verticales de superficies

La distribución de las superficies externas (ver Figuras 8 y 9 y Tablas VIII, IX y X) muestra que el total de superficie externa se reparte entre un 84,4% de superficie foliar y un 15,6% de superficie no foliar. La superficie foliar considerada incluye las dos caras de cada hoja.

Este reparto es sensiblemente distinto en el tramo de copas, en donde la proporción de superficie foliar alcanza casi el 90%.

El total de la superficie no foliar se distribuye en partes casi iguales entre el fuste y las ramas, aunque lógicamente en la zona de copas domina la superficie de las ramas.

### Tipo de distribuciones resultantes

Un análisis del tipo de distribuciones aplicando la prueba de JI-CUADRADO y el análisis de la recta de Henri, revela que las distribuciones de los elementos de la copa son muy próximos a la normal.

TABLA VIII  
DISTRIBUCION DE LA SUPERFICIE EXTERNA Y LOS VOLUMENES SOLIDOS CON LA ALTURA

Altura (H)	Indices de superficie externa [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]				Volumen sólido (dm <sup>3</sup> /ha)		
	Foliar	No foliar			Total	De fustes	De copas
		Total	De fustes	De copas			
24	0,002				7	0,3	7
22	0,041	0,006	0,003		218	13	205
20	0,283	0,036	0,002	0,034	1405	144	1261
18	0,944	0,115	0,008	0,107	4744	795	3949
16	1,871	0,236	0,019	0,217	10754	2741	7833
14	2,681	0,356	0,038	0,318	18432	6873	11559
12	3,273	0,440	0,064	0,376	28514	13871	14643
10	3,685	0,493	0,097	0,396	41054	24015	17039
8	3,894	0,534	0,134	0,400	55462	37206	18256
6	3,943	0,576	0,176		72008	53188	18820
4	3,950	0,622	0,222		91033	72032	19001
2	3,952	0,672	0,272		114080	94945	19142
0	3,952	0,731	0,333		144594	125455	19142

TABLA IX  
DISTRIBUCION VERTICAL DE LA SUPERFICIE DE LA SECCION MERIDIANA, DE LA SUPERFICIE ENVOLVENTE Y DEL VOLUMEN APARENTE DEL VUELO

z	SM(z) Superficie meridiana (silueta de copa)	SA(z) Superficie envolvente (copa)	VA(z) Volumen aparente (copa)
Altura [m]	[m <sup>2</sup> /ha]	[m <sup>2</sup> /ha]	[m <sup>3</sup> /ha]
24	2	4	1
22	43	131	44
20	300	944	350
18	1108	3521	1484
16	2545	8100	3755
14	4261	13611	6797
12	5772	18719	9519
10	6726	22272	11023
8	7138	23938	11455
6	7332	24644	11552
4	7490	25154	11581
2	7655	25679	11609
0	7845	26274	11640

**TABLA X**  
**RELACION ENTRE LOS INDICES DE SUPERFICIE EXTERNA (FOLIAR Y NO FOLIAR DE RAMAS DE COPA Y FUSTES) Y SU VARIACION CON LA ALTURA O PISO**

Altura [m]	Indice de superficie externa total [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Porcentaje sobre la superficie externa total				Porcentaje sobre la superficie externa no foliar de	
		La superficie externa foliar	La superficie externa no foliar			La superficie de copas	La superficie de fustes
			De copas	De fustes	De copas y fustes		
23	0.01	91.7	7.5	0.8	8.3	90.0	10.0
21	0.13	88.2	11.3	0.6	11.8	93.7	6.3
19	0.63	88.9	10.5	0.6	11.1	94.3	5.7
17	1.57	89.1	10.1	0.8	10.9	92.3	7.7
15	2.61	88.4	10.5	1.1	11.6	91.9	8.1
13	3.40	88.2	10.3	1.5	11.8	87.3	12.7
11	4.00	88.1	9.9	2.0	11.9	83.0	17.0
9	4.34	88.2	9.2	2.6	11.8	77.6	22.4
7	4.48	87.6	8.9	3.4	12.4	72.2	27.8
5	4.54	86.8	8.8	4.4	13.2	66.9	33.1
3	4.60	86.0	8.7	5.3	14.0	61.9	38.1
1	4.65	85.0	8.7	6.3	15.0	57.1	42.9
0	4.60	84.4	8.5	7.1	15.6	54.7	45.3

**TABLA XI**  
**INDICES FOLIARES ACUMULADOS, CALCULADOS CON EL MODELO I (a) Y CON EL MODELO II (b) Y (c)**

Altura H [m]	Indice foliar acumulado m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>		
	(a)	(b)	(c)
22	0.04	0.03	0.04
20	0.28	0.23	0.30
18	0.94	0.84	0.96
16	1.87	1.74	1.90
14	2.68	2.56	2.80
12	3.27	3.16	3.54
10	3.68	3.58	3.87
8	3.89	3.80	3.96
6	3.94	3.85	3.98
4	3.95	3.86	3.98
2	3.95	3.86	3.98
0	3.95	3.86	3.98

Un ajuste de la recta de Henri para la superficie foliar y el volumen sólido de la copa proporciona los resultados que aparecen en la Tabla XII.

La distribución Log-normal, que fue igualmente analizada, no se ajusta con la misma precisión.

La longitud o profundidad de las copas oscila entre un máximo de 17 y un mínimo de 2 con un valor medio de 8,5 metros. La distancia entre la altura total máxima (HM) y la altura de la base de copa mínima es de 23 metros. La media de la distribución se sitúa por lo tanto cerca del centro de longitud o profundidad total, casi 1,5 m por encima para la superficie foliar y un metro para el volumen sólido de copas.

**TABLA XII**

Variable	Media	Desviación típica	R2 de ajuste
Volumen sólido de copas	14.21	3.74	0.99
Superficie foliar	15.09	3.14	0.99

Comparación entre la distribución del índice foliar obtenida a través de los MODELOS I y II  
La concordancia entre los resultados que figuran en las tres columnas de la Tabla XI, revelan la

posibilidad de obtener simplificaciones importantes en el cálculo de la distribución, profundizando en el análisis y simulación mediante el modelo básico.

## SUMMARY

A statistic and deterministic basic model of the forest stand canopy structure, is presented in these papers.

The basic model was elaborated under individual tree basis, assuming a idealized modular profile for all individual tree crown. This model can be apply to each of the stand trees and adding the results.

In agreement with several previous studies, the results showed that canopy leaves area and solid volumen distributions are close to normal with the mean in the mid-canopy and standard deviation equal to third of the average depth, or the 20% of the total depth.

## APENDICE 1. SIMBOLOS UTILIZADOS

### Parámetros dimensionales

#### *Del árbol individual*

D	= diámetro normal (a 1.3 m de altura) con corteza (cc) [cm]
D $\emptyset$	= diámetro normal sin corteza (sc) [cm]
D <sub>1</sub>	= diámetro del fuste (cc) a la altura en que es máxima la anchura de la copa [cm]
D <sub>2</sub>	= diámetro del fuste (cc) en la base de la copa [cm]
D(z)	= diámetro del fuste (cc) a la altura (z) [cm]
H	= altura total del árbol [m]
H <sub>1</sub>	= altura a la que es máxima la anchura de copa [m]
H <sub>2</sub>	= altura de la base de copa [m]
L	= longitud de la copa [m]
A	= ancho máximo de la copa [m]
A(z)	= ancho de la copa a la altura (z) [m]
B(H <sub>2</sub> )	= área de la sección del fuste a la altura H <sub>2</sub> [dm <sup>2</sup> ]

#### *De la masa o rodal*

HM	= máximo absoluto de (H) en el rodal [m]
H2m	= mínimo absoluto de (H <sub>2</sub> ) en el rodal [m]
DM	= diámetro medio del rodal [cm]
DCM	= diámetro cuadrático medio del rodal [cm]
H	= altura media de rodal [m]
B	= área basimétrica del rodal m <sup>2</sup> /ha

### Variables y magnitudes de composición estructural [e]

#### *Del árbol individual*

v	= volumen sólido del fuste (cc) [dm <sup>3</sup> ]
v $\emptyset$	= volumen sólido del fuste (sc) [dm <sup>3</sup> ]
p	= peso del fuste (cc) [kg]
p $\emptyset$	= peso del fuste (sc) [kg]
p1	= p + peso de ramas maderables [kg]
p2	= p1 + ramas gruesas [kg]
p3	= p2 + ramas medias [kg]
p4	= p3 + ramas finas [kg]
p5	= p4 + hojas [kg]
p6	= p5 + frutos [kg]
vc ó vsc	= volumen sólido de la copa (incluido rabeón) [dm <sup>3</sup> ]
pc	= peso de la copa (incluido rabeón) [kg]
va	= volumen aparente de la copa [m <sup>3</sup> ]
sa	= superficie envolvente de la copa [m <sup>2</sup> ]
sef ó s	= superficie externa del fuste [m <sup>2</sup> ]
se	= superficie externa total (no foliar) [m <sup>2</sup> ]
sf ó f	= superficie foliar total [m <sup>2</sup> ]
pf	= peso de todas las hojas [kg]
sm ó m	= superficie meridiana de la copa [m <sup>2</sup> ]

#### *De la masa o rodal*

V, V $\emptyset$	= lo mismo que para el árbol [m <sup>3</sup> /ha]
P, P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , ..., P <sub>6</sub>	= lo mismo que para el árbol [tm/ha]
VC	= volumen sólido de las copas [m <sup>3</sup> /ha]
PC	= peso de las copas [tm/ha]
VA	= volumen aparente de las copas [m <sup>3</sup> /ha]

SEF = superficie externa de los fustes [m<sup>2</sup>/ha]  
 SE = superficie externa total [m<sup>2</sup>/ha]  
 SF = superficie foliar del rodal [m<sup>2</sup>/ha]  
 IF = índice foliar del rodal [m<sup>2</sup>/ha]  
 PF = peso de las hojas de una ha. [kg/ha]

SEF(z) } [m<sup>2</sup>/ha] { suma de las superficies corres-  
 SF(z) } pondientes a cada árbol desde  
 SE(z) } el suelo hasta el nivel (z)  
 SM(z) }

**Variables y magnitudes de la estructura espacial [E(z)]**

*Del árbol*

b(z) = área de la sección de ramas y fuste a la altura (z) [dm<sup>2</sup>]  
 v(z) y vØ(z) = volumen sólido del fuste (cc o sc) desde el suelo hasta el nivel (z) [dm<sup>3</sup>]  
 v̄(z) y v̄Ø(z) = complementos a v y vØ [v̄(z) = v - v(z)...]  
 vc(z) = volumen sólido de la copa desde la base de la copa hasta el nivel (z) [dm<sup>3</sup>]  
 v̄c(z) = complemento de vc(z) a vc [v̄c(z) = vc - vc(z)]  
 va(z) = volumen aparente del árbol desde el suelo hasta el nivel (z) [m<sup>3</sup>]  
 v̄a(z) = complemento de va(z) a va [v̄a(z) = va - va(z)]  
 sef(z) = superficie externa del fuste desde el nivel del suelo hasta (z) [m<sup>2</sup>]  
 sef̄(z) = complemento a sef (z) a sef [sef̄(z) = sef - sef(z)]  
 sf(z) = superficie foliar desde la base de la copa hasta el nivel (z) [m<sup>2</sup>]  
 sf̄(z) = complemento de sf(z) a sf [sf̄(z) = sf - sf(z)]  
 se(z) = superficie externa desde la base hasta el nivel (z) [m<sup>2</sup>]  
 sē(z) = complemento de se(z) a se [sē(z) = se - se(z)]  
 sm(z) = superficie meridiana de la copa desde la base hasta el nivel (z) [m<sup>2</sup>]  
 sm̄(z) = complemento de sm(z) a sm [sm̄(z) = sm - sm(z)]  
 p(z) = suma de los perímetros de las ramas y fuste a la altura (z) [cm]

**Variables del modelo individual de estructura espacial [E]**

$$x = \frac{H - z}{H - H_2}; \quad x_1 = \frac{z - 1.3}{H - 1.3};$$

$$v(x) = \frac{v(z)}{v}; \quad \bar{v}(x) = 1 - v(x)$$

$$vc(x) = \frac{vc(z)}{v}; \quad \bar{vc}(x) = 1 - vc(x)$$

$$va(x) = \frac{va(z)}{va}; \quad \bar{va}(x) = 1 - va(x)$$

$$sm(x) = \frac{sm(z)}{sm}; \quad \bar{sm}(x) = 1 - sm(x)$$

$$sf(x) = \frac{sf(z)}{sf}; \quad \bar{sf}(x) = 1 - sf(x)$$

$$se(x) = \frac{se(z)}{se}; \quad \bar{se}(x) = 1 - se(x)$$

$$b(x) = \frac{b(z)}{B(H_2)};$$

$$y = \left[ \frac{D(z)}{D} \right]^2$$

VØ(z) } [m<sup>3</sup>/ha] { suma de los volúmenes desde el  
 V(z) } suelo hasta el nivel (z) de todos  
 VC(z) } los árboles de una parcela  
 VA(z) }

En general  $e(x) = \frac{E(z)}{E}$

## BIBLIOGRAFIA

- AXELSSON, B. & BRÅKENHJELM, S., 1980: «Investigation sites of the Swedish Coniferous Forest Project - biological and physiological features». En: *Structure and Function of Northern Coniferous Forests - An Ecosystem Study*: 25-64. Ed. by T. Persson. Ecol. Bull. (Stockholm) 32.
- BEADLE, C. L.; TALBOL, H. & JARVIS, P. G., 1982: «Canopy structure and leaf area index in a mature Scots pine forest». *Forestry* 55: 105-123.
- BERGEN, J., 1971: «Vertical profiles of windspeed in a pine stand». *For. Sci.* 17: 314-321.
- FLOWER-ELLIS, J. G. K. & PERSSON, H., 1980: «Investigation of structural properties and dynamics of Scots pine stands». En: *Structure and Function of Northern Coniferous Forest - An Ecosystem Study*: 125-138. Ed. by T. Persson. Ecol. Bull. (Stockholm) 32.
- FRITSCHEN, L. J., 1985: «Characterization of boundary conditions affecting forest environmental phenomena». En: *The Forest-Atmosphere interaction*, 3-23. B. A. HUTCHISON y B. B. HICKS (eds.).
- FONS, W. L., 1980: «Influence of forest cover on wind velocity». *J. For.* 38: 481-486.
- GARY, H., 1976: *Crown structure and distribution of biomass in a lodgepole pine stand*. USDA Forest Service Res. Paper RM-165.
- GAY, L. W.; KNOERR, K. R. & BRAATEN, M. O., 1971: *Solar radiation variability on the floor of a pine plantation*. Agr. Meteorol.
- HALLDIN, S. (ed.), 1970: *Comparison of Forest Water and Energy Exchange models*. Proceeding from an IUFRO Workshop, Uppsala (Sweden), Sept. 24-30, 1978, International Society for Ecological Modelling, Copenhagen, 258 pp.
- HALLDIN, S., 1985: «Leaf and bark area distribution in a pine forest». En: *The Forest-Atmosphere Interaction*, 39-58. B. A. HUTCHISON y B. B. HICKS (eds.).
- JANSSON, P. E., 1977: *Soil properties at Ivantjärnsbäcken - Swed.* Conif. For. Proj. Int. Rep. 53, Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, 66 pp (In Swedish, English abstract).
- JARVIS, P. G.; JAMES, G. B. & LANDSBERG, J. J., 1976: «Coniferous forest». En: *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. 2: 171-304. J. L. MONTEITH (ed.). Academic Press, London.
- KINERSON, R. & FRITSCHEN, L. J., 1971: «Modeling a coniferous forest canopy». *Agric. Meteorol.* 8: 439-445.
- LEONARD, R. E. & FEDERE, C. A., 1973: «Estimated and measured roughness parameters for a pine forest». *J. Appl. Met.* 12: 302-307.
- LINDROTH, A. & PERTTU, K., 1981: «Simple calculation of extinction coefficient of forest stands». *Agric. Met.* 25: 97-110.
- PEREIRA, A. R. & SHAW, R. H., 1980: «A numerical experiment on the mean wind structure inside canopies of vegetation». *Agric. Met.* 22: 303-318.
- PERSSON, T. (ed.), 1980: *Structure and Function of Northern Coniferous Forests. An Ecosystem Study*, Ecol. Bull. 32. Swedish Natural Sciences Research Council (NFR), Stockholm, 610 pp.
- STEPHENS, G. R., 1969: «Productivity of red pine, 1. Foliage distribution in tree crown and stand canopy». *Agric. Met.* 6: 275-282.
- TADAKI, Y., 1977: «Forest biomass» 39-64. En: *Primary productivity of Japanese forest-Productivity of terrestrial communities*. T. SHIDEI AND T. KIRA. Ed. Univ. of Tokyo Press. 289 pp.
- ZEIDE, B. & PFEIFER, P., 1991: «A method for estimation of fractal dimension of tree crowns». *Forest Science*.