

30150

70-145

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES - FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES DE POSTGRADO**



**UN MODELO DE SIMULACION DE CRECIMIENTO  
EN PLANTACIONES DE TECA  
(TECTONA GRANDIS LINN.)**

**SERBIULA - TULIO FEBRES CORDERO**

**Por: STEPHANE AYANGMA**



SD397 T4A9

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OPTAR EL TITULO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN LA OPCION  
MANEJO DE BOSQUES.

SD397  
T4A9

**MERIDA - VENEZUELA  
1983**

SERVICIOS BIBLIOTECARIOS GENERALES  
"TULIO FEBRES CORDERO"  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

## AGRADECIMIENTOS :

a Laurence W. Vincent, profesor guía de esta Tesis, quien, con su dedicación, me abrió los ojos a las inmensas posibilidades de aplicación, que a los estudiosos ofrece el campo de la simulación de procesos de crecimiento.

a Antonio Quintero, profesor de computación de la Facultad de Ciencias Forestales por haberme enseñado esta materia y proporcionado sólidas bases que permitieron la culminación de este trabajo.

a Mariano Redondo por su entera dedicación a la preparación del documento mecanografiado, por sus atinadas correcciones en el texto y en reconocimiento a su calidad humana.

al personal del Centro de Computación de la U.L.A. por la gentileza y voluntad con que me ayudaron en la solución de numerosas dificultades.

a CORDIPLAN por el financiamiento de mis estudios.

## RESUMEN

Se analizan algunas variables de crecimiento en parcelas permanentes de rendimiento de Teca (*Tectona grandis* Linn) y se llega al diseño de un modelo de simulación de crecimiento basado en los resultados de dichos análisis. El modelo de distribución diamétrica lognormal ha sido examinado y seleccionado para la descripción de este componente. También se ha determinado, con base en los datos de parcelas no aclareadas, una ecuación de regresión de la mortalidad en función de la densidad inicial de plantación y de la edad. Se ha empleado el modelo de crecimiento de Richards-Chapman en el análisis de crecimiento del área basal. Se llegó a la estimación de los parámetros de esta función no lineal mediante una determinación de valores iniciales y al ajuste final por un proceso iterativo. Dada la carencia de información los modelos matemáticos referentes a la altura y el volumen se han establecido en base a datos provenientes de las tablas de rendimiento para plantaciones de Teca en la India. La edad joven de las parcelas estudiadas (12 años) limita la significación del análisis de ciertas variables, como la distribución diamétrica. Sin embargo, resultó satisfactoria la caracterización del crecimiento del área basal por la función de Richards-Chapman. El modelo de simulación permite probar una amplia gama de alternativas de manejo en plantaciones para dos calidades de sitio y aporta resultados detallados acerca de las características de la plantación y de los aclareos. Este modelo puede constituir una base para los necesarios estudios futuros y un instrumento de trabajo de uso inmediato para ciertas aplicaciones teóricas y prácticas.

## R E S U M E

Cette étude traite de l'analyse de quelques paramètres de croissance en plantations de Teck (*Tectona grandis* Linn.) et de la construction d'un modèle de simulation pour ordinateur, élaboré sur la base des résultats des précédentes analyses. Les données proviennent de parcelles permanentes de rendement situées dans la réserve forestière de Caparo (Venezuela). Un modèle de distribution diamétrique lognormale a été retenu pour la caractérisation de ce paramètre. Une équation de régression de la mortalité selon la densité initiale de plantation et de l'âge a été déterminé à partir des données de plusieurs parcelles non éclaircies. Le modèle de croissance de Richards-Chapman a été utilisé pour l'étude de la croissance de la surface terrière. L'estimation des valeurs des paramètres de ce modèle a été faite en déterminant des valeurs initiales, puis en appliquant une méthode itérative pour l'obtention des valeurs finales. Par manque de données sur la croissance de la hauteur et du volume, des modèles mathématiques sont proposés à partir de l'analyse des tables de rendement pour plantations de Teck en Inde. Le jeune âge (12 ans) des parcelles étudiées limite la signification de l'analyse de certains paramètres comme la distribution diamétrique, quoique la caractérisation de la croissance de la surface terrière par le modèle de Richards-Chapman résulte satisfaisante. Le modèle de simulation permet d'essayer de multiples possibilités de conduites en plantations et fournit des résultats détaillés des caractéristiques du peuplement et des éclaircies. Le modèle proposé, peut être une base de travail pour de futures recherches et un instrument utile pour quelques études théoriques ou appliquées.

## A B S T R A C T

This study involves analyses of some growth parameters in Teak plantations (*Tectona grandis* Linn). and construction of a simulation growth based-computer model derived from results of previous analysis. Data come from permanent yield plots in stands in the Forest Reserve of Caparo (Venezuela). A lognormal diameter distribution model was tested for characterization of this component in the simulation model. A mortality regression equation depending on initial planting density and age was determined from data analysis of unthinned stands. The Richards-Chapman growth model was used for basal area growth study. Estimation of parameters for this non linear model was made by a previous determination of initial values and final parameter values obtained by an iterative process. Lacking data on height and volume growth, the respective mathematical models were obtained from data analysis of yield tables for Teak plantations in India. The young age (12 years) of the stands studied restricted significance of such variables as diameter distributions, however characterization of basal area growth by Richards-Chapman growth model resulted satisfactory. The simulation model allows testing of a large range of management alternatives in two sites qualities available and furnishes detailed results of main crop and thinning characteristics. This model could be an interesting basis for future investigations and a useful working instrument for theoretical and applied studies.

## I N D I C E

RESUMEN	I
RESUME	II
ABSTRACT	III
I. INTRODUCCION	1
I.1.    Presentación y antecedentes generales	1
I.2.    Objetivos específicos del estudio	4
II. METODOLOGIA DE LA FORMULACION DE UN SISTEMA	6
II.1.    Presentación de las parcelas estudiadas	6
II.2.    Acercamiento al problema	8
II.3.    Las variables del modelo	9
II.3.1.  Las especies estudiadas	9
II.3.2.  La edad	10
II.3.3.  Calidad de sitio	10
II.3.4.  Las prácticas silviculturales	10
II.3.5.  Los otros factores	10
II.4.    El sistema	11
III. ANALISIS DE LOS ELEMENTOS DE LA REALIDAD	14
III.1.    Distribución diamétrica	14
III.1.1.  Antecedentes	14
III.1.2.  Datos de distribuciones diamétricas	16
III.1.3.  Análisis gráfico de los datos	16
III.1.4.  Prueba numérica ji cuadrado	20
III.1.5.  Resultados del análisis	23

III.1.6.	Fredicci3n de los par3metros	24
III.2.	Mortalidad	28
III.3.	Area basal	36
III.3.1.	Introducci3n	36
III.3.2.	La funci3n de crecimiento de Richards- Chapman	38
III.3.2.1.	Estimaci3n de los par3metros	39
III.3.2.2.	Discusi3n de los resultados	43
III.3.2.3.	Aplicaci3n de la funci3n de Ri- chards-Chapman en el crecimiento de parcelas aclareadas	46
III.4.	Altura	55
III.5.	Volumen	57
PRACTICAS SILVICULTURALES		60
IV.1.	Densidad inicial de plantaci3n	60
IV.2.	Las pr3cticas de aclareo	61
V. MODELO DE SIMULACION		64
V.1.	Presentaci3n del modelo	64
V.1.1.	Caracteristicas del programa	64
V.1.2.	Posibilidades de uso del modelo	65
V.1.3.	Restricciones para el uso del modelo	66
V.2.	Funcionamiento	68
V.2.1.	Programa principal	68
V.2.2.	Subrutina "Inicio"	71
V.2.3.	Subrutina "Mortal"	71
V.2.4.	Subrutina "Ddiam"	72
V.2.5.	Subrutina "Altura"	73

VI

V.2.6.	Subrutina "Volum"	73
V.2.7.	Subrutina "Aclar"	74
V.2.8.	Subrutina "Abasal"	75
VI.	EVALUACION DEL MODELO	76
VI.1.	Resultados	76
VI.2.	Conclusiones de la evaluación del mo- delo	82
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
	REFERENCIAS	86

-oOo-

INDICE DE CUADROS

INDICE DE FIGURAS

Cuadro 1	7	Figura 1	13
Cuadro 2	18	Figura 2	19
Cuadro 3	22	Figura 3	26
Cuadro 4	31	Figura 4	27
Cuadro 5	33	Figura 5	32
Cuadro 6	36	Figura 6	51
Cuadro 7	45	Figura 7	52
Cuadro 8	50	Figura 8	53
Cuadro 9	81	Figura 9	69

A N E X O S

- \* Listado del programa del modelo
- \* Listado de salida de simulación

-----

## I.- INTRODUCCION

### I.1. PRESENTACION Y ANTECEDENTES GENERALES

La Silvicultura de los últimos decenios se ha caracterizado por un desarrollo importante de las investigaciones y técnicas del sector de plantaciones. Esta constatación parece válida tanto en los países de la zona templada, como en los países del mundo tropical. La coyuntura económica mundial durante los últimos años ha creado, además, condiciones propicias a la puesta en marcha de numerosos proyectos de plantaciones a campo abierto localizados en países tropicales y, particularmente, en América Latina (Brasil, Venezuela).

La concientización de las autoridades nacionales de estos países acerca de la protección de los bosques naturales y las ventajas económicas que ofrecen las plantaciones, debido a una alta productividad de materia prima, son algunos de los factores que explican las tendencias inversionistas señaladas.

Venezuela no ha escapado a esta evolución y desde hace más de quince años ha venido estableciendo plantaciones forestales con el fin, principalmente, de incrementar la producción de tableros de partículas y de contraenchapados, como, asimismo, desarrollar una producción, hoy insuficiente, de pulpa de papel. Las extensas plantaciones de pinos del Oriente del País simbolizan las tendencias actuales de la silvicultura venezolana.

El incremento de la producción de madera de aserrio es

indispensable para cubrir la demanda creciente y frenar la tendencia evidente, pero negativa de las importaciones.

En el Occidente del País un programa de introducción de especies exóticas fue iniciado en los primeros años de la década del setenta por la Facultad de Ciencias Forestales en Mérida y la Corporación de los Andes (CORPOANDES) en la Reserva Forestal de Caparo y alrededor de treinta parcelas permanentes de rendimiento han sido establecidas y medidas con el objeto de estudiar el crecimiento y el rendimiento de la Teca bajo diversas condiciones de calidad de sitio y de prácticas silviculturales.

En la misma región del Estado Barinas dos compañías forestales (Emallca y Contaca) han sembrado durante el mismo periodo cerca de 1.000 hectáreas de Teca en la Reserva Forestal de Ticoporo, a las cuales hay que añadir 700 hectáreas de plantaciones en la unidad experimental de esta Reserva.

En la actualidad existe una problemática común a todas las plantaciones de Teca. Esta problemática puede resumirse en la necesidad de establecer normas de manejo de plantaciones basadas en el estudio de crecimiento de la Teca en las condiciones de sitio previamente determinadas. La definición de un régimen de raleo fácil de aplicar en relación con la espesura del vuelo de plantación o con un índice de espaciamento, es de gran urgencia.

Diversas técnicas experimentales como el establecimiento de parcelas permanentes de rendimiento (PPR) o los ensayos (CCT) permiten (curvas de tendencia correlacionadas) permiten el análisis del crecimiento y del rendimiento bajo varias alternativas de ma-

nejo (PPR) o varias densidades nominales de plantación (ensayos CCT).

Por lo tanto, la existencia de parcelas permanentes de rendimiento en la Reserva Forestal de Caparo constituye la mejor fuente de información de que se dispone para realizar un análisis de diferentes componentes del crecimiento y, en base a éste, establecer las normas de manejo requeridas.

La determinación de las calidades de sitio ha sido el objeto de los trabajos de Tobar (1975), Luque (1981) y Torres Lezama (1982). Este último autor concluyó sobre la definición de dos calidades de sitio en base a un análisis de los datos de altura mayor y de área basal.

Tomando en cuenta la edad temprana de las plantaciones creadas, los datos locales deben ser comparados con los datos provenientes de otras regiones del mundo (Trinidad, India, Nigeria) a fin de establecer las correspondencias entre las calidades de sitios locales y aquellas determinadas en otras regiones y, así disponen de una base de referencia para la estimación del crecimiento futuro de estas plantaciones, bajo diversas condiciones de espesura.

La elaboración de un modelo de simulación de crecimiento y de rendimiento en base al análisis de los datos locales constituye a priori una interesante vía, para obtener unas estimaciones acerca de algunos componentes (o parámetros) del crecimiento bajo varias alternativas de manejo. Además, los resultados de tal proceso no deberían ser de una calidad inferior de los que se pueden

obtener por una extrapolación directa de las informaciones foráneas.

La metodología seguida en la construcción de un modelo de simulación es básicamente la que rige en el dominio de análisis de sistemas.

- a) Se analizan los componentes identificados en la realidad estudiada. Se determinan las ecuaciones de regresión obtenidas mediante métodos de ajuste. Puede ser exigida la asunción eventual de ciertas hipótesis específicas para su inclusión oportuna en este modelo matemático;
- b) Se propone un sistema coherente con las variables identificadas y sus interrelaciones;
- c) Se elabora un modelo de simulación. Este modelo simula o imita, de forma dinámica, el sistema previamente definido.
- d) Se instrumenta un programa computarizado en el lenguaje de comunicación adoptado (o logicial). El lenguaje FORTRAN 77 ha sido el seleccionado para el presente trabajo.

La prueba o evaluación del modelo se efectúa en base a la información total procesada en la definición del modelo y, en una segunda etapa, se evalúa el modelo en base a un conjunto de datos no utilizados previamente, cuando ello sea posible.

## I.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS DEL ESTUDIO

Los objetivos principales del estudio fueron:

- i) aportar elementos de metodología de análisis de las diferentes variables del crecimiento en plantaciones;

- ii) ajustar un modelo de crecimiento que sea lo suficientemente flexible como para poder representar adecuadamente el crecimiento de la Teca en diferentes categorías de calidad de sitio y con diversas densidades de vuelo;
- iii) aportar elementos de formulación de alternativas de manejo de plantación.

Los objetivos secundarios son:

- i) aportar información sobre el crecimiento volumétrico de la Teca.
- ii) Crear un instrumento de trabajo para uso docente que pueda guiar las investigaciones futuras al señalar las fallas y carencias de información. Cabe recordar que este trabajo se incluye dentro de una línea de investigación iniciado recientemente (Vincent, 1983) sobre análisis y simulación de crecimiento.

Este trabajo representa un paso suplementario en este sentido. Por lo tanto no se pretende que los resultados obtenidos tengan aplicación inmediata en la planificación del manejo de las plantaciones de Teca existentes, pero suministrará una base, en el estado actual de conocimientos, tan válida como cualquiera otra extraída de experiencias foráneas.

## II. METODOLOGIA DE LA FORMULACION DE UN SISTEMA

---

### II.1. PRESENTACION DE LAS PARCELAS ESTUDIADAS

Se expone brevemente las parcelas de Teca estudiadas. Torres Lezama (1982) ha descrito ampliamente las características ecológicas y edafológicas de la zona en estudio, así como el histórico sobre la realización de las plantaciones de Teca en Caparo.

Las plantaciones de Teca estudiadas se ubican en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo, en los Llanos Occidentales de Venezuela, Estado Barinas. Las semillas provienen de la Isla de Trinidad. La procedencia original no fue plenamente certificada, aun cuando Keogh (1979) precisa que el país de origen es Birmania.

Las primeras plantaciones en Caparo se iniciaron en el año 1971. El Cuadro 1 resume los datos de plantación referente a las parcelas permanentes de rendimiento consideradas en este estudio.

El método de siembra de tocones de 9-10 meses de edad fue adoptado en áreas de rastrojo y bosque deforestado correspondiente al tipo deciduo de banco (Torres L., 1982).

CUADRO 1

Datos de plantación de las parcelas estudiadas  
(Fuente: Torres Lezama, 1982)

Parcela número	Año de plantación	Densidad inicial (árboles/ha)	Edad al aclareo años	Categoría de Calidad de sitio *
3	1971	1600	5.7	II
4	1971	1600	5.8	II
6	1971	2500	---	II
7	1971	1600	5.8	II
8	1971	625	---	II
9	1971	1600	5.8	II
10	1971	1600	5.7	II
11	1971	1600	5.8	II
12	1971	1600	5.8	II
13	1971	1600	---	II
14	1971	2500	---	I
15	1971	1600	---	II
16	1971	625	---	II
17	1971	1600	---	II
19	1973	1600	3.7/5.9	I
20	1973	2500	---	I
21	1973	1600	3.7/5.9	I
25	1973	1600	3.7	I

(\*) Clasificación de calidad de sitio de Torres Lezama, 1982.

El espaciamiento inicial predominante fue de 2.5 m x 2.5 m (1.600 árboles por ha). Ciertas parcelas fueron sembradas con densidad mayor de 2.0 m x 2.0 m (2.500 árboles por ha) y otras con una densidad menor de 4.0 m x 4.0 m (625 árboles por ha); (Corpoandes-ULA, 1972). La historia de los primeros años de las plantaciones ha sido expuesta por Torres Lezama (1982). La mortalidad fue elevada debido en parte a una sequía fuerte (Torres Lezama 1975) y al ataque de hongos en las raíces de los árboles, según Saldarriaga (1979).

Se siguen probando varios regímenes de aclareo en estas parcelas. Vincent y Luque (1981) expresaron la necesidad de realizar los aclareos a una edad bastante temprana (3-5 años) para las plantaciones de alta densidad, en base a los datos de crecimiento de área basal.

## II.2. ACERCAMIENTO AL PROBLEMA

Generalmente se usan dos vías de acercamiento para describir la dinámica de una plantación. La primera vía que fue adoptada en este trabajo consiste en seleccionar y analizar unas variables o componentes que reflejan la dinámica del conjunto de árboles por la unidad de superficie escogida. Esta metodología es utilizada a menudo debido al hecho de que los datos de crecimiento necesarios son más fácilmente obtenibles. La segunda vía reconoce, por su lado, que el desarrollo de una masa forestal es moldeada por las fuerzas internas de la masa, generadas por la dinámica individual de los árboles. Consecuentemente, el árbol individual es una unidad básica en la simulación.

Este último razonamiento, que es más constructivo, implica disponer de datos de crecimiento relativo a los individuos de la masa forestal, como el diámetro de la copa, la longitud de ramas o raíces principales y las datos de posición espacial en relación a los árboles vecinos.

Vincent (comunicación personal) está desarrollando un modelo de este tipo, aplicable a las plantaciones de Teca de Caparo.

### II.3. LAS VARIABLES DEL MODELO

La selección de las variables a incluir en el modelo es una etapa que debe permitir la escogencia de las variables que contribuyen en mayor medida a la caracterización de la dinámica de la masa forestal (Mitchell, 1969). La falta de datos acerca de unas variables conlleva a su eliminación del modelo, aunque pudiera ser de interés incluirla.

#### II.3.1. LAS ESPECIES ESTUDIADAS

Solamente una especie, la Teca (*Tectona grandis* linn) es considerada en este trabajo. El desarrollo de modelos aplicables a plantaciones o bosques mixtos es mucho más complejo y todavía se limita a especies que tienen comportamientos bastante similares.

#### II.3.2 La edad

La edad es una variable muy importante, especialmente desde el punto de vista conceptual y, por lo tanto, es incluida en el

modelo.

### II.3.3. La calidad de sitio

Los factores edafológicos y ecológicos afectan la productividad de la masa forestal. La calidad de sitio es considerada como una variable sintética de estos factores. Los parámetros de crecimiento del rodal son expresiones integradas de la calidad de sitio. En el presente modelo sólo ciertos componentes, como el área basal, el volumen son afectados directamente por la escogencia de la calidad de sitio como dato operativo de la simulación, mediante el uso de modelos matemáticos ajustados para cada categoría de sitio presente.

### II.3.4. Las prácticas silviculturales

La densidad inicial de plantación y los aclareos son los únicos factores de manejo incluidos en el modelo. La simulación de otras prácticas silviculturales como, por ejemplo, la fertilización, no son contempladas en el modelo y se ha de asumir que las prácticas silviculturales no reconocidas en el sistema han afectado en la misma medida las parcelas estudiadas.

### II.3.5. Los otros factores

Los efectos de incendios, los ataques de insectos o enfermedades no son simulados en la mayoría de los modelos existentes. Se han desarrollado recientemente modelos que incluyen ciertos parámetros de este tipo; el modelo Forcyte desarrollado por Kimmins, Scoullar y Feller (1981) es un ejemplo de modelo ecológico en que la dinámica del ciclo de los principales nutrientes

minerales es simulada. El estudio de este tipo de efectos, así como la aplicabilidad de tales modelos se realizan sobre superficies extensas.

#### II.4. EL SISTEMA

Un rodal de Teca en su concepción como sistema puede representarse esquemáticamente por un diagrama en el cual diferentes unidades básicas actúan sobre un conjunto (o vuelo) de árboles del rodal. La figura 1 muestra el modelo de sistema determinado a fin de simular la evolución de la realidad estudiada. Los factores ambientales forman las unidades que influyen conjuntamente sobre la población de árboles. Considerando esta población como un subsistema, los componentes que lo integran representan las características esenciales, en este estudio, del sistema real. Las relaciones que unen estos componentes no pueden ser interpretadas como adecuadas para explicar la funcionalidad del sistema real. Como se ha señalado previamente la vía de estudio escogida aquí permite la simplificación de una realidad mucho más compleja. Por lo tanto, las relaciones presentadas entre los componentes del subsistema corresponden a la funcionalidad del sistema propuesto.

El crecimiento del área basal constituye en este sistema un elemento incorporando los efectos de la competencia interárboles y condiciona la evolución de las otras características consideradas, salvo la mortalidad.

La construcción de un modelo de simulación del sistema es la última etapa que consiste en desarrollar un segundo sistema im-

plementado en una computadora electrónica a fin de simular o imitar el sistema presuntamente definido en su estado dinámico.

El modelo de simulación de este trabajo es del tipo determinístico en su esencia, aunque una subrutina del modelo incluye una función de probabilidad para generar la distribución diamétrica.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

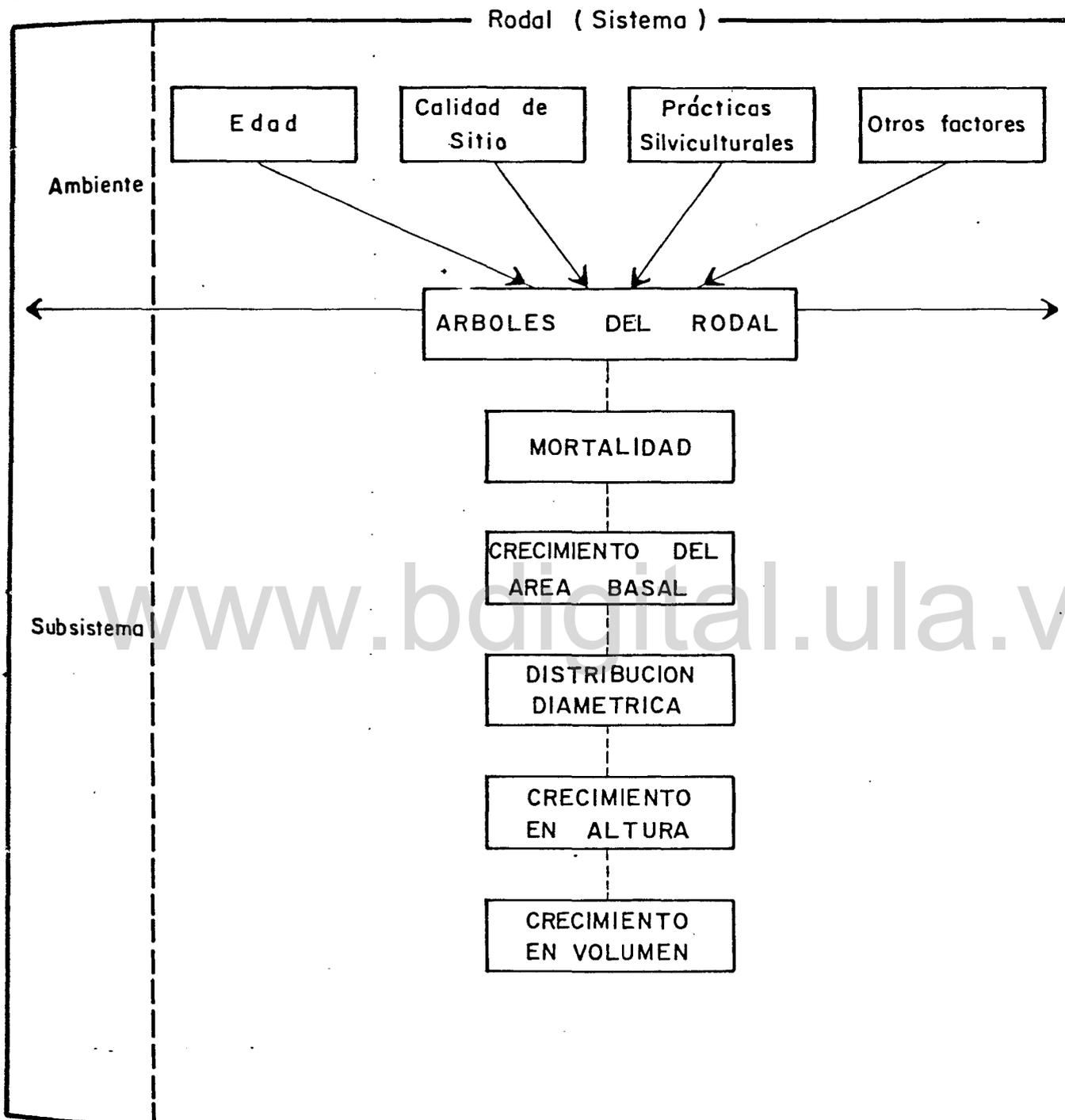


Figura 1. Una parcela de Teca vista dentro del contexto del sistema.

### III. ANALISIS DE LOS ELEMENTOS DE LA REALIDAD

El entendimiento de la dinámica de la realidad estudiada es un proceso analítico. La definición de un sistema satisfactorio ha permitido seleccionar los diferentes elementos que deben ser analizados. La especificidad de una realidad dada determina en parte la importancia del análisis de ciertos elementos.

#### III.1. DISTRIBUCION DIAMETRICA

El análisis de la distribución diamétrica en las parcelas de Teca de Caparo, obedece a dos preocupaciones principales:

- a) describir correctamente la distribución diamétrica en las condiciones iniciales de la simulación.
- b) buscar un modelo de distribución diamétrica que pueda estimar satisfactoriamente las características de una distribución diamétrica futura bajo determinadas condiciones de espesura.

##### III.1.1. Antecedentes

Diferentes funciones matemáticas han sido empleadas para la distribución diamétrica de masa forestal.

La función de distribución Gamma fue probada por Nelson (1964) en un estudio de distribuciones diamétricas de 103 parcelas de Loblolly pine (*Pinus taeda*). Schreuder y otros (1979) utilizaron la función de distribución de Weibull para la caracterización de las distribuciones diamétricas en 175 parcelas de

Slash pine (*Pinus Elliotii*).

Bailey (1973) usò tambièn esta ùltima funciòn con resultados satisfactorios. Bliss y Reinker (1964) han demostrado la eficiencia de la distribuciòn Lognormal para caracterizar las funciones diamètricas de 16 parcelas de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*).

Dagnelie y Rondeux (1971) estudiaron la distribuciòn diamètrica de 176 parcelas de *Pinus silvestris* mediante la distribuciòn Lognormal. Ellos retuvieron el mètodo de los dèciles (\*) de Jedlinski. Yang y otros (1978) han destacado la flexibilidad de las funciones de Weibull para caracterizar las funciones diamètricas en bosques no coetàneos o compuestos de varias especies.

Se pueden enunciar ciertas constataciones de esta revisiòn bibliogràfica. La caracterizaciòn de la distribuciòn diamètrica se hace generalmente en base a datos provenientes de gran nùmero de parcelas. Se desechan en los estudios los datos de parcelas presentando una irregularidad no explicable. Las masas forestales jòvenes (menos de 15 a 20 años) son poco estudiadas a causa de una variabilidad mäs elevada que las de las masas forestales maduras. La distribuciòn Lognormal se ha revelado adecuada para la descripciòn de distribuciones diamètricas en plantaciones coetàneas. La utilizaciòn de funciones matemàticas mäs complejas conlleva problemas de parametrizaciòn. La precisiòn suplementaria que aportan estas funciones parecerà justificada cuando se disponga de datos confiables.

\* Los dèciles de una distribuciòn de frecuencia son los nueve valores que dividen esta distribuciòn en diez clases de igual efectivo.

### III.1.2. Los datos de distribuciones diamétricas

La mayoría de las parcelas de Teca tiene una edad de 12 años. Se ha dispuesto de los datos referentes a la distribución diamétrica para edades entre 1.9 y 11 años. Se ha decidido eliminar del análisis los datos recogidos después de un aclareo, porque se ha constatado que la desviación promedio calculada con los datos de medición del diámetro a la altura del pecho (dap) generalmente presentaba un incremento con respecto a su valor anterior al aclareo. Se eliminaron también del análisis los datos que parecían poco confiables. Por lo expuesto se han retenido los datos provenientes de 16 parcelas. El número de distribuciones diamétricas estudiadas fue más elevado, porque se incluyeron en el análisis los datos tomados a diferentes edades para ciertas parcelas (Cuadro 2).

### III.1.3. Análisis gráfico de los datos

El análisis gráfico tiene el propósito de averiguar la adecuación de la distribución Lognormal para caracterizar las distribuciones diamétricas estudiadas.

La prueba gráfica consiste en plotear en un gráfico las frecuencias acumuladas (en porcentaje) y los límites superiores de las clases correspondientes. La prueba es más exacta al convertir las frecuencias acumuladas en "probit" (\*) gracias a una tabla adecuada como la de Fisher y Yates (1957).

\* El probit es el equivalente normal de la frecuencia acumulada aumentado en 5.

Se plotean los "probits" en función de sus respectivos límites de clases en abscisas.

Cuando la distribución es normal los puntos ploteados deben seguir una línea recta, a pesar de la oscilación debida a la correlación existente entre puntos sucesivos, Bliss y Reinker, (1964). Cuando se presente una convexidad hacia lo alto, la distribución puede ser de tipo Lognormal y descrita con dos parámetros solamente (la media geométrica y la varianza). La Figura 2 indica esta posibilidad. A fin de averiguar esta hipótesis los mismos probits son ploteados en función de los logaritmos decimales de las frecuencias acumuladas correspondientes (Figura 2). Si los puntos ploteados siguen una recta, la distribución puede ser descrita correctamente con 2 parámetros. En el caso de que aparezca una tendencia convexa hacia lo bajo es necesario estimar un tercer parámetro para caracterizar la distribución mediante la ley lognormal, Bliss y Reinker, (1964), aunque Dagnelle y Rondeux (1971) discuten el beneficio de precisión obtenido por esta operación suplementaria. La prueba gráfica aplicada con los datos retenidos ha mostrado que la distribución lognormal de 2 parámetros podía describir correctamente la distribución en las parcelas de Teca. Sin embargo, varias distribuciones presentan un aspecto irregular como, por ejemplo, una bimodalidad difícilmente caracterizable.

## CUADRO 2

Características de las distribuciones diamétricas estudiadas

Parcela	Edad	Número de árboles	Diámetro promedio
03	1.9	1451	5.8
04	2.9	1408	8.9
04	5.8	1383	13.3
06	3.9	2142	8.3
06	11.8	1766	14.6
07	3.7	1266	9.1
08	5.8	615	13.7
08	11.8	587	23.1
09	3.7	1026	10.4
10	3.7	1300	10.3
11	3.7	1320	10.6
12	3.7	1418	10.6
13	6.7	1217	14.9
14	5.8	1790	12.9
14	6.7	1620	14.0
15	6.7	1334	14.1
16	6.7	482	19.9
19	3.7	1584	11.4
20	7.8	1667	14.3
26	7.8	(1200)	15.8

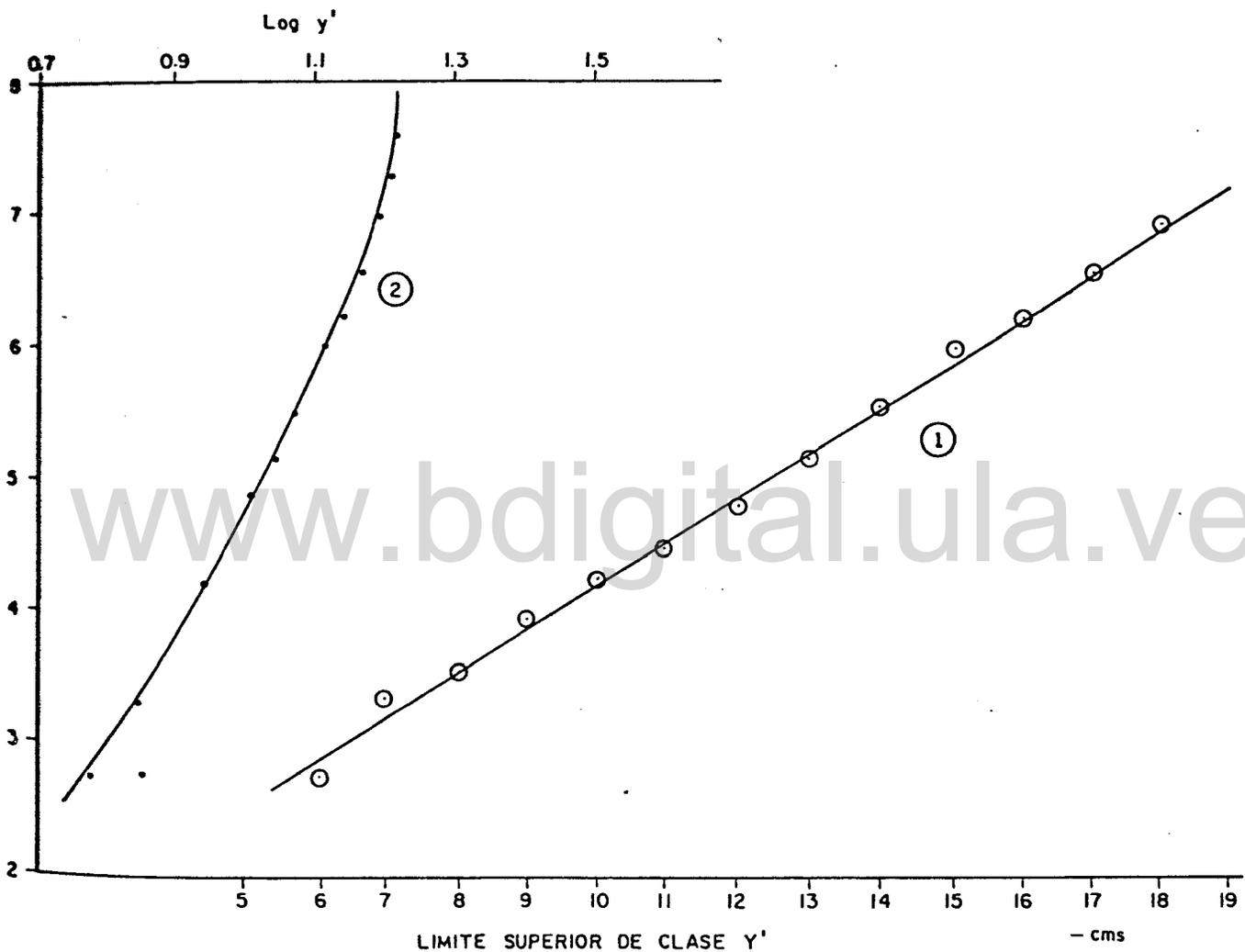


Figura 2: Frecuencias acumuladas en porcentaje de la distribución diamétrica, ploteadas en una escala probit (ordenadas) con los límites superiores de clase  $y'$  en cm (Curva 1) y con los logaritmos de  $y'$  (Curva 2).  
Parcela 06; edad 5.8 años.

### III.1.4. Prueba numérica ji cuadrado

La prueba más conveniente para la distribución lognormal consiste en la comparación de las frecuencias observadas  $f$  y de las frecuencias esperadas  $\Phi$  (de la distribución lognormal) mediante el análisis ji cuadrado. La metodología siguiente de Bliss y Reinker (1964) fue aplicada.

Los límites de clase ( $y'$ ) son transformados en sus logaritmos decimales  $y = \text{Log } y'$  y se computa el producto  $(fy)$  para cada clase diamétrica (Cuadro 3).

La media geométrica  $\bar{y}$  y la desviación promedio  $s$  son dadas por las ecuaciones siguientes:

$$\bar{y} = \frac{\sum (fy)}{N} \quad (1)$$

$$[y] = \sum (fy)^2 - \frac{(\sum fy)^2}{N} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{[y]}{N-1}} \quad (3)$$

en las cuales

$\bar{y}$  es la media geométrica

$fy$  es el producto de la frecuencia observada  $f$  por el logaritmo del límite superior de clase  $y$

$N$  es la suma de las frecuencias observadas

$$N = \sum f$$

$[y]$  es la varianza de  $y$

$$[y] = \text{Var } (y)$$

Se computan los valores  $X_L$  correspondientes a la ley normal reducida  $N(0,1)$

$$X_L = \frac{\bar{y} - y}{s} \quad (4)$$

Con una tabla de función de repartición de la ley normal como la tabla II, de Fisher y Yates (1957) se obtiene el área proporcional (P) correspondiente a cada  $X_L$  después de una in-

terpolación lineal. P es obtenido directamente para  $X_L$  negativo y

(1-P) es obtenido para  $X_L$  positivo. P o (1-P) es multiplicado por

N a fin de obtener las frecuencias acumuladas sucesivas correspondientes a los límites de clases. Las diferencias entre estas frecuencias acumuladas forman las frecuencias esperadas para una muestra lognormal de 2 parámetros.

Las frecuencias observadas (f) son comparadas con sus respectivas frecuencias esperadas  $\Phi$  por:

$$\chi^2 = \sum (f / \Phi)^2 - N \quad (5)$$

las frecuencias terminales de f y  $\Phi$  son eventualmente agrupadas para eliminar valores inferiores a 1.

Los grados de libertad son iguales al número de pares de frecuencias menos tres, uno para el total N, y uno para cada uno de los dos parámetros requeridos en la computación de las frecuencias esperadas.

Se ha utilizado el paquete estadístico BASIS para la prueba ji cuadrado. La prueba ji cuadrado ha sido aplicada a cada distribución estudiada.

## CUADRO 3

EJEMPLO DE LA DETERMINACION DE LOS PARAMETROS  
Y DE LAS FRECUENCIAS ESPERADAS DE DISTRIBUCION  
LOGNORMAL PARA LA PARCELA 08 (edad 3.7 años;  
diámetro promedio 11.4 cms.)

Limite sup.de Clase diamèt. y'	Número de árboles f	$y = \log(y')$	$f \times y$	Desviación X L	Frecuen- cia acu- mulada	Frecuen- cia es- perada
5	38		29.5716			10.22
6	63	0.7782	52.2413	2.1295	10.2151	39.40
7	75	0.8451	67.7325	1.4015	49.6182	86.00
8	113	0.9031	107.8246	0.7704	135.6065	120.23
9	125	0.9542	125.00	0.2144	255.2250	121.05
10	100	1.000	104.40	0.2840	376.2770	101.81
11	50	1.044	53.96	0.7628	478.0641	59.56
12	38	1.0792	42.3282	1.1458	537.5223	38.23
13	13	1.1139	14.8993	1.5234	575.7507	20.51
14		1.1461		1.8738	596.2609	
	615		598.95			

Valores de los parámetros:  $\bar{y} = 0.9739$

$\sigma^2 [y] = 5.1815$

$s = 0.0919$

### III.1.5. Resultados del análisis

Los resultados no han mostrado un ajuste significativo del ajuste a la distribución lognormal. En efecto el nivel de significancia se encuentra inferior a 0.5 para P (probabilidad de que la hipótesis propuesta sea aceptada). Se han enunciado algunos factores limitantes de este análisis. El modelo, sin embargo conserva todo su interés; es conocido que a menudo la distribución de diámetros en una población coetánea es disimétrica, Prodan, (1965). El estudio realizado ha permitido revelar esta tendencia. La desviación promedio relativa entre las frecuencias observadas y las frecuencias esperadas para todo el conjunto de datos es inferior al 20%. Este resultado indica que el modelo de distribución lognormal puede ser adoptado para su inclusión en el modelo de simulación, siendo consciente del carácter preliminar de este estudio. Es razonable suponer que el ajuste de esta distribución teórica podría mejorarse para edades más avanzadas de las parcelas; pero otras vías de estudio, permitiendo un acercamiento probabilístico de esta realidad, pueden parecer más indicadas desde el enfoque de la simulación.

La segunda etapa del análisis de la distribución diamétrica se refiere a la predicción de los parámetros de la función lognormal.

### III.1.6. Predicción de los parámetros

Siguiendo la metodología presentada por Bliss y Reinker (1964) se ha buscado la relación matemática uniendo la media aritmética observada y la media geométrica computada con los

datos de las distribuciones estudiadas.

La figura 3 muestra una relación ligeramente lineal. La regresión determinada mediante el uso del paquete estadístico BASIS es la siguiente:

$$\text{Log } \bar{y} = + 0.13184 + 0.90929 \text{ Log } m_a - 0.09587 (\text{Log } m_a)^2$$

donde:

$\bar{y}$  es la media geométrica

$m_a$  es la media aritmética

Nivel de confianza con  $P = 0.95$

100 % para el primer término

100 % para el término lineal

96 % para el término cuadrático

Se presentan en el cuadro 4 los valores de media geométrica y desviación promedio observados y esperados.

La determinación de una relación entre la media aritmética  $m_a$  y la desviación promedio  $s$  ha presentado cierta dificultad debido a las grandes variaciones registradas de  $s$  (Figura 3). Los estudios ya citados dan a conocer una relación lineal entre estas dos variables. La desviación promedio disminuye cuando la media aritmética aumenta.

La relación definida es la siguiente:

$$\text{Log } s = -0.375 \text{ Log } m_a + 1.5375 \quad (7)$$

Se puede disponer ahora de un modelo de distribución diamétrica que ha sido ajustado en base a los datos disponibles.

Varias hipótesis tienen que ser asumidas al incluir este modelo dentro del sistema que se quiere simular.

- a. La función lognormal puede describir correctamente unas distribuciones diamétricas correspondientes a edades más avanzadas. Esta hipótesis es perfectamente razonable tomando en cuenta los trabajos anotados sobre el tema.
- b. Las ecuaciones de regresión de los parámetros de la función lognormal pueden ser utilizadas para la estimación de dichos parámetros. La casi linealidad de las relaciones es un factor que tiende a soportar esta hipótesis.
- c. Los aclareos han de ser no selectivos, a fin de conservar el mismo patrón de distribución diamétrica.

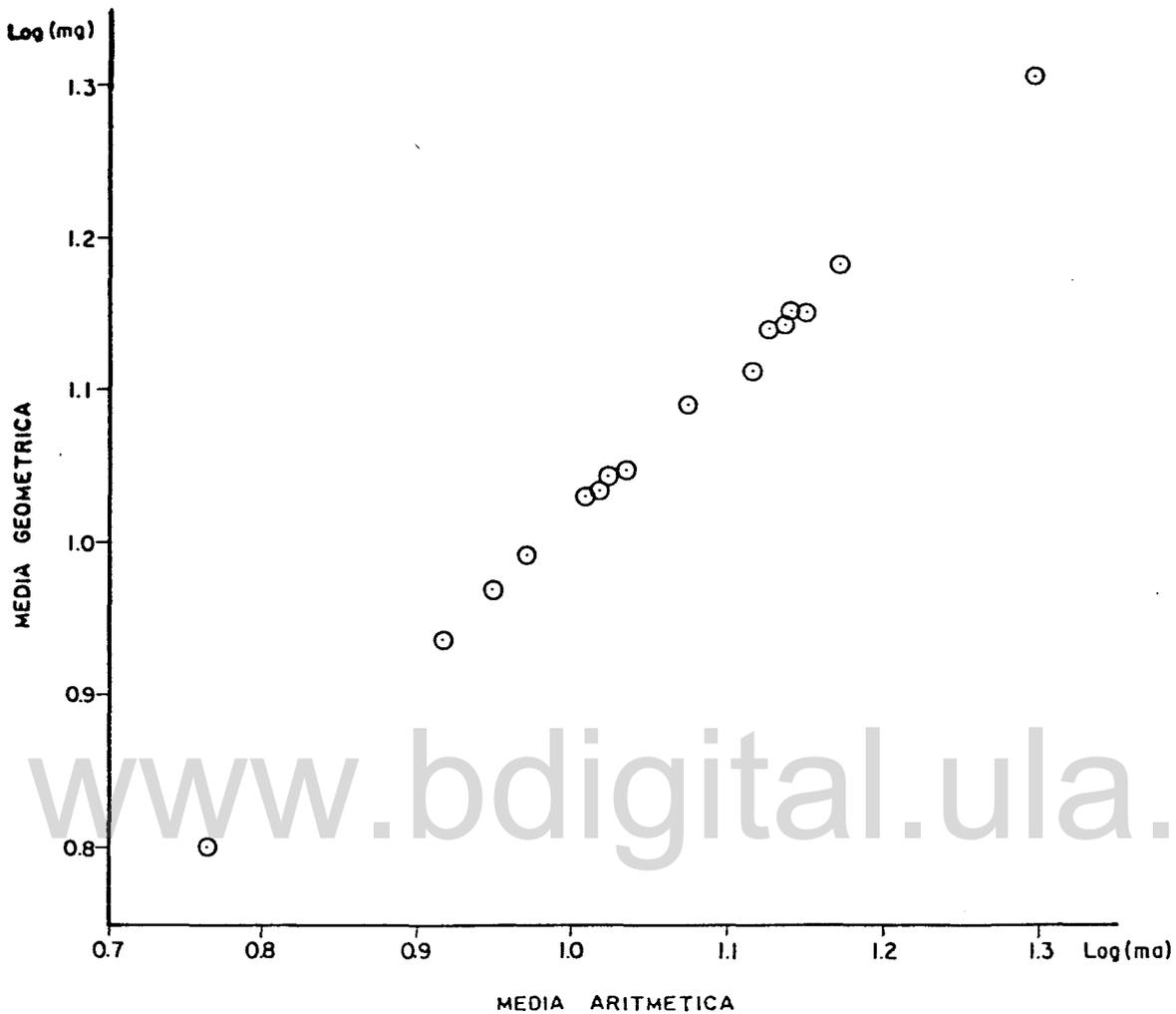


Figura 3: Relación entre la media aritmética ( $ma$ ) y la media geométrica  $mg$  (transformación logarítmica de  $ma$  y  $mg$ ).

Datos de 17 distribuciones diamétricas.

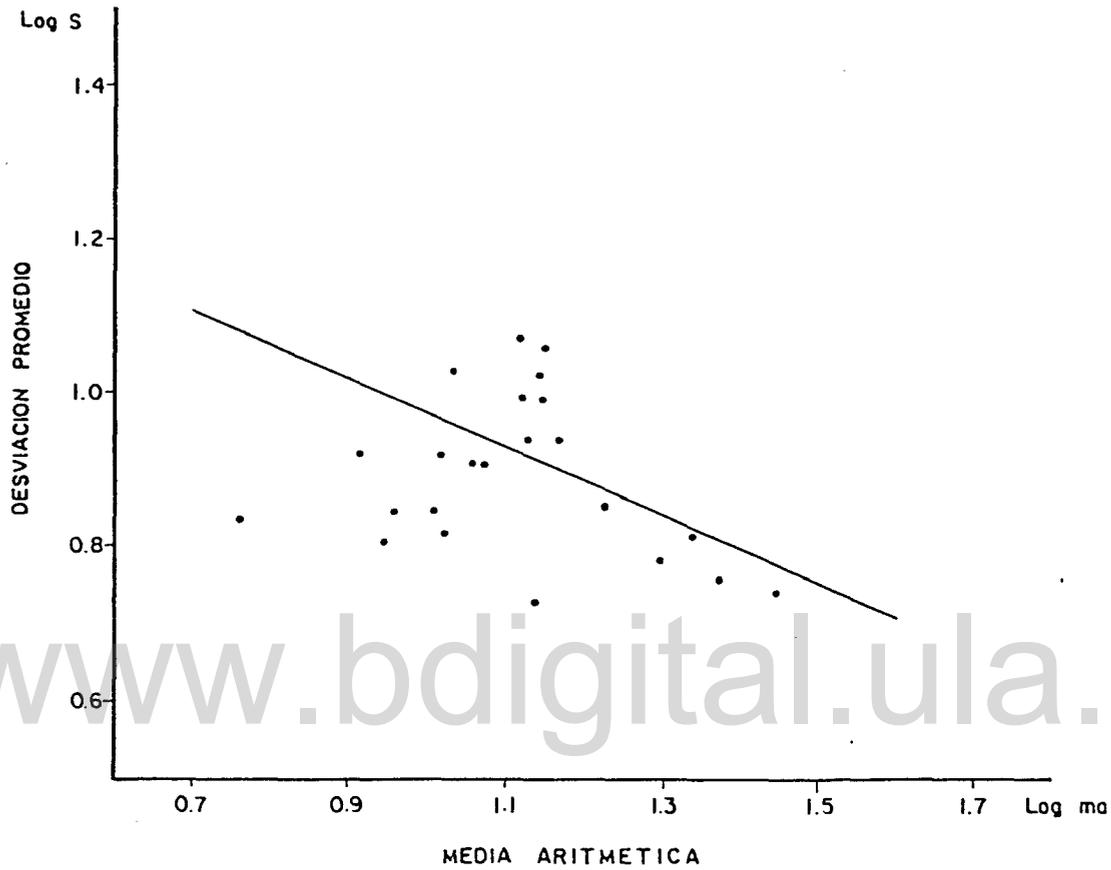


Figura 4: Relación entre la media aritmética  $m_a$  y la desviación promedio  $s$  (transformación logarítmica para  $m_a$  y  $s$ )

Datos de 17 distribuciones diamétricas.

### III.2. MORTALIDAD

El análisis de la mortalidad en las parcelas estudiadas ha sido efectuado en razón de la importancia de este factor en los primeros años de crecimiento. Torres L. (1982) estima esta mortalidad en 20 % antes de cinco años.

Dos tipos de mortalidad son generalmente distinguidos en el análisis de este factor. El primer tipo de mortalidad se refiere a la misma relacionada con los efectos de la competencia inter-árbol o intra-específica que se desarrolla en el rodal de plantación. Además es claro que una fracción de la tasa de mortalidad es imputable a las técnicas de preparación de material vegetal y de plantación usadas. Cuanto más alta sea la densidad del rodal más alta es la mortalidad. Van Laar (1978) la expuso en base a datos provenientes de un ensayo C.C.T. Por lo tanto, si se toma una edad de referencia (10 o 15 años) es posible determinar una relación que une la tasa de mortalidad en la parcela y su densidad nominal de plantación. La densidad nominal de una parcela se refiere a la densidad inicial de plantación o a la densidad de vuelo principal de la parcela después de un aclareo realizado antes de que empezara la competencia inter-árboles (caso del ensayo C.C.T.).

El segundo tipo de mortalidad existente es el debido a factores del medio ambiente. Se puede citar entre ellos los agentes patógenos o la degradación de condiciones edafológicas.

Al asumir estas diferencias entre las causas de mortalidad no hay que olvidar que todas estas causas pueden influir simultáneamente.

El objetivo específico de este análisis ha sido hallar una relación que exprese la mortalidad (en porcentaje de la densidad nominal) en función del tiempo y de esta densidad nominal, a fin de incluirla en el modelo de simulación.

Se ha tenido que seleccionar cuidadosamente los datos a usar en el análisis (cuadro 4).

Los datos provenientes de parcelas aclareadas no han sido usados debido a la dificultad de medir el efecto del aclareo sobre la mortalidad.

Tres densidades nominales están representadas en las parcelas de Caparo (625 árboles/ha, 1.600 árboles/ha y 2.500 árboles/ha). A pesar de este número reducido se ha buscado la expresión matemática de la regresión de la tasa de mortalidad a una edad de referencia de 10 años en función de la densidad.

El modelo de Van Laar (1978) ha sido adoptado a priori y la expresión encontrada es la siguiente:

$$\text{Log } Y = - 15.162 + 9.741 \text{ Log Nom} - 1.825 (\text{Log Nom})^2 \quad (1)$$

en la cual:

Y es la mortalidad expresada en porcentaje;

Nom es la densidad Nominal de plantación

La Figura 5 permite apreciar la forma de la curva trazada en base a la ecuación. Sin embargo, para los fines de este estudio, esta ecuación es insuficiente porque la variable edad no es incluida en ella.

Por lo tanto, se ha buscado en base al conjunto de datos del Cuadro 4 una relación matemática que expresa la tasa de mortalidad en función de la densidad inicial y de la edad.

La relación siguiente ha sido determinada

$$\text{Log } Y = -4.95195 + 0.07399 \text{ Log } (\exp T) + 1.21693 \text{ Log } \text{Nom}$$

$$R^2 \text{ (coeficiente de determinación)} = 0.93092$$

en la cual

Y es la mortalidad expresada en porcentaje de la densidad nominal;

Nom es la densidad nominal, y

T es la edad.

Se ha decidido conservar esta última ecuación con vista a incluirla en el modelo de simulación. El promedio de los errores residuales bajo (0.079) demuestra un ajuste aceptable. El cuadro 5 presenta los valores simulados de la mortalidad hasta 10 años para las tres densidades de plantación consideradas. El interés de tener una relación que expresa la mortalidad en función de la densidad nominal y de la edad se puede limitar esencialmente cuando se desee simular el crecimiento en un rodal no aclareado.

## CUADRO 4

## DATOS DE LA MORTALIDAD EN PARCELAS

## NO ACLAREADAS SEGUN LA EDAD

parcela	Densidad inicial árboles/ ha	Edad E (años)	Densidad a la edad árboles/ ha	mortalidad (%)
03	1.600	1.5	1.451	0.093
04	1.600	1.9	1.433	0.104
04	1.600	2.9	1.408	0.120
04	1.600	5.8	1.383	0.136
06	2.500	3.7	2.142	0.143
06	2.500	6.7	2.027	0.190
06	2.500	7.9	1.883	0.247
06	2.500	10.8	1.766	0.294
06	2.500	11.8	1.733	0.307
08	625	3.7	600	0.040
08	625	5.8	596	0.044
08	625	7.9	594	0.046
08	625	9.8	591	0.054
08	625	11.8	587	0.061
14	1.600	3.7	1.418	0.114
15	1.600	3.9	1.436	0.103
15	1.600	5.8	1.414	0.116
15	1.600	6.7	1.334	0.164
15	1.600	7.9	1.264	0.210
15	1.600	8.9	1.229	0.232
17	1.600	11.8	1.200	0.250
20	2.500	3.7	1.819	0.272
20	2.500	6.7	1.742	0.304
20	2.500	7.8	1.716	0.314

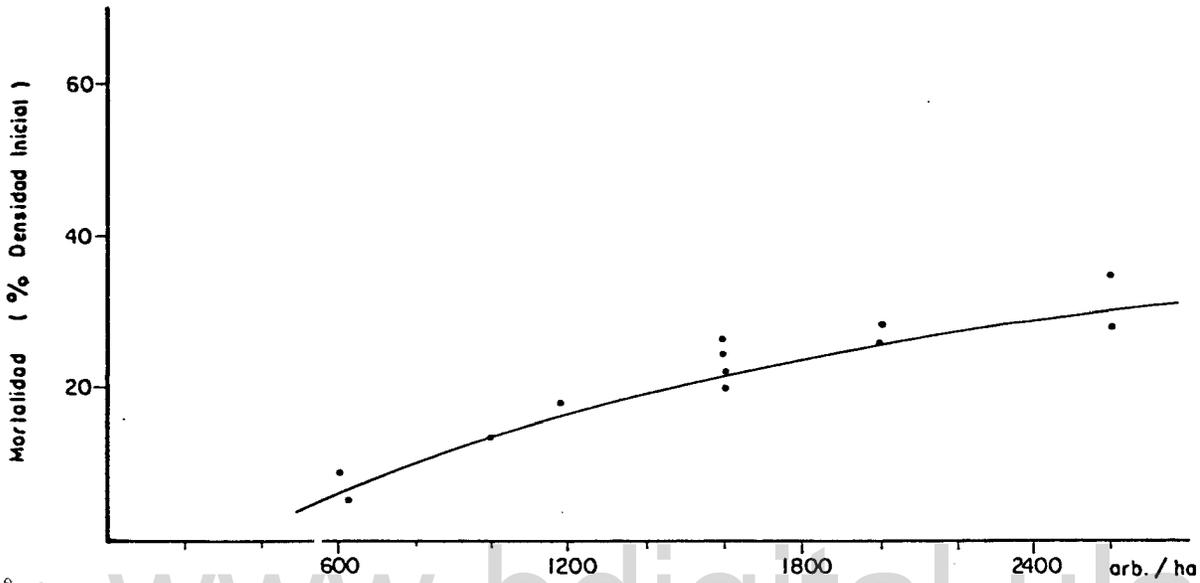


Figura 5.- Mortalidad a 10 años (en porcentaje de la densidad inicial) en función de la densidad inicial.

CUADRO 5  
MORTALIDAD SIMULADA HASTA 10 AÑOS EN PARCELAS  
NO ACLAREADAS PARA TRES DENSIDADES  
INICIALES DE PLANTACION

Edad	Densidad inicial 2500 árb/ha ----- No. árb. a T	Mort. (%)	Densidad inicial 1600 árb/ha ----- No. árb. a T	Mort. (%)	Densidad inicial 625 árb/ha ----- No. árb. a T	Mort. (%)
3	2024	19.04	1423	11.04	603	3.50
4	1988	20.50	1409	11.94	601	3.80
5	1948	22.08	1395	12.81	599	4.10
6	1905	23.76	1379	13.81	596	4.40
7	1860	25.60	1362	14.87	595	4.70
8	1811	27.56	1343	16.06	593	5.10
9	1753	29.88	1324	17.25	591	5.50
10	1701	31.96	1303	18.56	588	5.90

### III.3. AREA BASAL

#### III.3.1. Introducción.

El crecimiento diametral de los árboles de las parcelas de Caparo ha sido seguido desde 1.9 años hasta 11.8 años en ciertas parcelas. El área basal resultante ha sido estudiada por Torres Lezama (1982), lo que le ha permitido estimar los valores máximos de crecimiento del área basal en cada una de las dos calidades de sitio determinadas. Los datos de crecimiento recolectados en 1983 permiten una estimación más precisa de los potenciales de sitio para el área basal debido al hecho de que las parcelas de mayor densidad parecen haberlo alcanzado. (Cuadro 6).

El análisis del crecimiento del área basal después de realizarse los aclareos es también posible dentro de los límites impuestos por los datos.

La escogencia de una ecuación de crecimiento adecuada en la descripción de la evolución de esta variable debe constituir el primer paso del análisis. Varios modelos matemáticos han sido estudiados para describir el crecimiento del área basal. Las funciones no lineales son consideradas las más adecuadas debido a sus potenciales de flexibilidad, permitiendo obtener unos ajustes muy buenos.

Las más conocidas son la función logística, la función monomolecular, la función de Gompertz y la función de Richards Chapman. Se presentan las expresiones matemáticas de estas fun-

ciones a continuación.

Función logística:

$$W = A / (1 + be^{-kT})$$

Función monomolecular de crecimiento:

$$W = A (1 - e^{-kT})$$

Función de Gompertz:

$$W = A \cdot e^{-b \cdot e^{-kT}}$$

Función de Richards-Chapman:

$$W = A (1 - be^{-kT})^{1/(1-m)}$$

en los cuales

W es valor de la variable estudiada a la edad T

a, b, k y m son los parámetros de la edad considerada

T es la edad

Las funciones de crecimiento estudiadas presentan, en general, las dos características siguientes (Rawat y Franz, 1973):

- a) Tienen un límite asimptótico de crecimiento  $W = A$  al cual se acercan cuando T tiende al infinito.
- b) Las curvas de estas funciones presentan un punto de inflexión a una cierta edad, dependiendo de la especie y de la calidad de sitio. Lo que quiere decir que el incremento corriente anual crece hasta un máximo alcanzado para el punto de inflexión y después baja paulatinamente.

Estas características corresponden a los principios generales biológicos del crecimiento en plantaciones coetáneas. La Función de crecimiento de Richards-Chapman ha sido escogido en este análisis

**CUADRO 6**  
**CRECIMIENTO DEL AREA BASAL EN LAS PARCELAS DE**  
**TECA SELECCIONADAS EN EL ANALISIS**

Par- ce- las	Densidad inicial	Calidad de sitio	Edad de aclareo	Edad media										
				1.9	2.9	3.7	4.7	5.8	6.7	7.9	8.9	9.8	10.8	
06	2500	II	--			11.48		21.24	23.92	25.77		<b>25.45</b>	31.55	30
08	625	II	--			3.74		9.13	12.73	14.95	16.56	17.64	(17.95)	
13	1600	II	--			11.30		18.30	20.84	23.75	24.39	25.55		
15	1600	II	--			13.48		19.64	20.81	22.93	<b>22.40</b>	<b>24.10</b>		
16	625	II	--					11.83	14.96	18.83	20.04	21.57	22.82	
17	2500	II	--			11.16		18.16	20.83		23.80	(25.43)	27.12	
14	2500	I	--			16.35		23.35	25.00	27.60	<b>27.52</b>	29.30		
20	2500	I	--			16.83	21.36	26.34	27.83	28.16				
03	1600	II	5.7	3.87	9.83			19.61	15.65	17.31	18.69	20.15		
04	1600	II	5.8	3.77	8,52			19.28	15.12	16.55	18.24	19.71		
09	1600	II	5.8			8.70		15.67	12.77	14.37	15.69	17.40		
12	1600	II	5.8			12.56		20.27	18.77	20.56	21.50	23.26		
18	1600	I	3.8			9.35	14.66	18.27	21.67	24.05				
19	1600	I	3.8/5.9			10.49	15.24	19.47	15.58	18.43				
21	1600	I	3.7/5.9			12.66	14.67	18.42	18.58	20.45				
						10.66		15.56						

Nota:

Los números enfatizados en **negrita** corresponden a datos dudosos.

CUADRO 6

ESTADO DEL AREA BASAL EN LAS PARCELAS DE  
SELECCIONADAS EN EL ANALISIS

Edad media									
3.7	4.7	5.8	6.7	7.9	8.9	9.8	10.8	11.8	
11.48		21.24	23.92	25.77		25.45	31.55	30.88	
3.74		9.13	12.73	14.95	16.56	17.64	(17.95)	20.06	
11.30		18.30	20.84	23.75	24.39	25.55			
13.48		19.64	20.81	22.93	22.40	24.10			
		11.83	14.96	18.83	20.04	21.57	22.82	24.88	
11.16		18.16	20.83		23.80	(25.43)	27.12	27.52	
16.35		23.35	25.00	27.60	27.52	29.30			
16.83	21.36	26.34	27.83	28.16					
		19.61	15.65	17.31	18.69	20.15		23.16	
		13.12							
		19.28	15.12	16.55	18.24	19.71		22.58	
		12.49							
8.70		15.67	12.77	14.37	15.69	17.40		19.55	
		10.09							
12.56		20.27	18.77	20.56	21.50	23.26			
		15.58							
9.35	14.66	18.27	21.67	24.05					
10.49	15.24	19.47	15.58	18.43					
		13.54							
12.66	14.67	18.42	18.58	20.45					
10.66		15.56							

corresponden

Algunos factores de relevancia guían esta escogencia. Esta función es una generalización de las tres otras funciones presentadas. Ciertos valores de los parámetros permiten la obtención de las expresiones precedentes, Ayangma, (1983).

La flexibilidad de esta función la hace particularmente idónea para describir el crecimiento del área basal en diferentes condiciones de densidad de plantación, Pienaar y Turnbull, (1973).

Las limitaciones debidas a datos de crecimiento obtenidos en un periodo de 10 años obligan a usar una función que permita asumir ciertas hipótesis. La función de Richards-Chapman ofrece estas posibilidades; el potencial de sitio (expresado en área basal) puede ser estimado en función de las informaciones disponibles. El autor (1982) mostró que unas estimaciones halladas empíricamente permiten una representación bastante buena del crecimiento del área basal para varias densidades de vuelo en las parcelas de Teca de Caparo.

El modelo de simulación exige una función de crecimiento del área basal que permite obtener valores del crecimiento de esta variable en parcelas aclareadas.

Esta función ofrece esta posibilidad, Pienaar y Turnbull, (1973), Pienaar, (1977), Ayangma, (1983).

### III.3.2. La función de crecimiento de Richards-Chapman

Los principios biológicos que guiaron la elaboración del modelo inicial de Von Bertalanffy (1957) y a su generalización

por Richards (1959) y Chapman (1961) han sido expuestos por Pienaar y Turnbull (1973) y resumidos en un trabajo del autor (1983).

Von Bertalanffy y después Richards, quien generalizó el modelo, postularon que la tasa de crecimiento de un organismo (o de una variable sintética del crecimiento, como el volumen) está relacionado a la tasa metabólica y se expresa así:

$$\frac{dW}{dt} = \eta^m - \gamma \cdot \frac{W}{t} \quad (1)$$

en la cual

$W$  es la variable estudiada

$\eta$  y  $\gamma$  son las tasas respectivas del anabolismo y catabolismo.

La integración de (1) mediante el uso de ecuaciones de Bernoulli (Pienaar, 1973) conlleva a la forma final del modelo:

$$W_t = A \left( 1 - b e^{-kt \frac{1}{1-m}} \right) \quad (2)$$

en la cual

$W_t$  es el valor de la variable estudiada al tiempo  $t$ .

$A$  representa el límite asintótico de la función, o sea el valor máximo que pueda alcanzar  $W$ .

$b$  es un parámetro sin importancia biológica que representa la edad inicial para la medición de  $W$ .

$k$  y  $m$  son dos parámetros estrechamente ligados. Richards (1950) dice que el valor  $k/m$  representa la tasa promedio relativa de crecimiento de una población en la cual todas las clases de tamaño son representadas igualmente.

Se destaca que la función de tasa de crecimiento es enteramente dependiente de la función de crecimiento. Cuando los parámetros de (2) son determinados, los parámetros de (1) son dados por las relaciones siguientes:

$$Y = k/(1-m) \quad (3)$$

$$\eta = Y \cdot A^{(1-m)} \quad (4)$$

El punto de inflexión, cuando ocurre, corresponde a

$$W = A \cdot m^{1/(1-m)} \quad (5)$$

o sea 
$$\frac{W}{A} = m^{1/1-m} \quad (6)$$

El parámetro  $m$  es el único responsable de la ubicación del punto de inflexión  $y$ , por lo tanto, determina la forma de la curva asigmoidal.

### III.3.2.1. Estimación de los parámetros

Generalmente se usa el método de Stevens (1951) para la estimación inicial de los parámetros  $A$ ,  $b$  y  $k$ ;  $m$  es estimado al calcular la suma de cuadrados residuales para un conjunto de valores de  $m$  y se conserva el valor de  $m$  que produce la suma mínima de cuadrados residuales. Se estiman enseguida, nuevamente, los parámetros  $A$ ,  $b$  y  $k$  con el valor de  $m$  encontrado. Mediante un proceso iterativo (cinco iteraciones bastan) se llega a la obtención de valores estables para  $A$ ,  $b$ ,  $k$  y  $m$ .

Una técnica de linearización presentada por Draper (1966) ha sido también utilizada para la estimación final de los parámetros por algunos autores (Pienaar y Turnbull, 1973).

El uso del método de Stevens no fue posible con los datos disponibles, porque ellos tienen que provenir de mediciones a intervalos constantes y, por lo tanto, se ha recurrido a la técnica siguiente para la estimación inicial de los parámetros.

La ecuación (2) puede escribirse así:

$$W_t^{1-m} = A (1-be^{-kt})^{1-m} \quad (7)$$

Si se estima A y m inicialmente (siendo A el potencial de sitio para el área basal), se hallan unas estimaciones de b y k por el proceso siguiente:

para  $t = i$  y  $t = j$  la ecuación (7) se escribe

$$W_i^{1-m} = A (1-be^{-k_i})^{1-m} \quad (8)$$

y

$$W_j^{1-m} = A (1-be^{-k_j})^{1-m} \quad (9)$$

o sea:

$$1 - \left( \frac{W_i}{A} \right)^{1-m} = be^{-k_i} \quad (10)$$

$$y \quad 1 - \left( \frac{W_j}{A} \right)^{1-m} = be^{-k_j} \quad (11)$$

por transformación logarítmica se llega a:

$$\text{Log } e^{-ki} = \text{Log} \left[ 1 - \left( \frac{W_i}{A} \right)^{1-m} \right] - \text{Log } b \quad (12)$$

y

$$\text{Log } e^{-kj} = \text{Log} \left[ 1 - \left( \frac{W_j}{A} \right)^{1-m} \right] - \text{Log } b \quad (13)$$

sustrayendo (12) de (13), una estimación de  $k$  se encuentra:

$$\hat{k} = \frac{\text{Log} \left[ 1 - \left( \frac{W_j}{A} \right)^{1-m} \right] - \text{Log} \left[ 1 - \left( \frac{W_i}{A} \right)^{1-m} \right]}{\text{Log} (e^{i-j})} \quad (14)$$

una estimación de  $b$  se obtiene después al sumar (10) y (11):

$$\hat{b} = \frac{2 - \left( \frac{W_i}{A} \right)^{1-m} - \left( \frac{W_j}{A} \right)^{1-m}}{e^{-ki} + e^{-kj}} \quad (15)$$

La estimación del parámetro  $A$  es de relevante importancia, ya que este parámetro no es estimado en el proceso iterativo.

El parámetro  $A$  representa el potencial de sitio para el área basal. Torres Lezama (1982) avanzó los valores de  $28 \text{ m}^2/\text{ha}$  y  $24 \text{ m}^2/\text{ha}$  en las calidades de sitio I y II, respectivamente.

Los últimos datos disponibles (años 1982 y 1983) permiten estimar el potencial de sitio a  $32 \text{ m}^2/\text{ha}$  y  $28.5 \text{ m}^2/\text{ha}$  en las calidades I y II respectivamente. Se ha de notar una cierta discre-

pancia entre el potencial de sitio registrado en ciertas parcelas

(ej: parcela 6,  $AB_{max} = 31.5 \text{ m}^2/\text{ha}$  en 1982) y la clasificación del sitio según Torres Lezama (1982).

La clasificación de sitio se hizo en base a la altura mayor y esta variable puede ser influenciada por la densidad del vuelo, al menos para las densidades extremas. Esto fue demostrado por Van Laar (1978) en su estudio en base a la altura máxima (\*) del crecimiento de *Pinus patula* en ensayos C.C.T. en Sur Africa.

La determinación del índice de sitio en base a la altura mayor o máxima permitiría obtener una clasificación de sitio tal vez más amplia que la presente y se podría expresar el parámetro A en función del tal índice SI según una ecuación de la forma siguiente:

$$A = a - b \log SI$$

en la cual:

a y b son los parámetros de la regresión.

### III.3.2.2. Discusión de los resultados

Los parámetros de la función de Richards-Chapman han sido estimados para todas las parcelas no aclareadas y algunas aclareadas. El Cuadro 7 presenta los resultados finales. El ajuste de la función a los datos es particularmente satisfactorio, lo que se muestra por la suma residual de cuadrados débil.

-----  
 (\*) El concepto de altura máxima es definido como la altura promedio de los 100 árboles de mayor diámetro por ha.

La disponibilidad de una computadora que permita estimar los parámetros por método iterativo ha ayudado considerablemente a la obtención de los ajustes correctos a pesar del empirismo del método.

Se debe notar la variabilidad reducida del parámetro  $m$  a través del rango de densidad en una misma calidad de sitio. El parámetro  $b$  presenta una variabilidad más elevada, sin embargo, la influencia del parámetro  $b$  es sobre todo sensible para los valores iniciales. La evolución decreciente del parámetro  $k$  con la densidad, concuerda perfectamente con las bases teóricas del modelo.

El parámetro  $A$  ha sido fijado en  $32 \text{ m}^2/\text{ha}$  y en  $28.5 \text{ m}^2/\text{ha}$  para las parcelas de calidad I y II respectivamente. Estas estimaciones deben ser consideradas válidas para las parcelas de alta densidad que muestran un crecimiento cerca del potencial de sitio. Para las otras parcelas se ha asumido estos valores en base a la clasificación preliminar de calidades de sitio de Torres Lezama (1982).

El método utilizado de estimación de los parámetros, así como un reducido conjunto de datos, no ha permitido averiguar, como lo hicieron otros autores (Van Laar, 1978; Van Laar y Brendkamp, 1979) una posible correlación entre la densidad y los valores de los parámetros.

Es cierto, en cuanto al parámetro  $A$  que una densidad nominal muy baja conlleva una baja del valor de  $A$ , pues un número reducido de árboles, probablemente no llegará a alcanzar al potencial

basimétrico del sitio.

A pesar de las limitaciones expuestas se ha de destacar las posibilidades de estudio de crecimiento ofrecidas por el modelo de Richards Chapman. A pesar de haber utilizado un método de estimación de los parámetros de la función empírica y disponiendo de series de datos limitados, se ha llegado a unos ajustes bastante satisfactorios.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

CUADRO 7

VALORES ESTIMADOS DE LOS PARAMETROS DE LA FUNCION  
DE CRECIMIENTO DE RICHARDS-CHAPMAN PARA LOS PAR-  
CELAS SELECCIONADOS EN EL ANALISIS

Par- ce- las	Densidad inicial o después aclareo arb./ha	Calidad de sitio	A 2 (m /ha)	k	b	m	Suma residual de cuadrados
* 3	* 851	II	28.50	0.18247	1.2357	0.2050	1.0467
* 4	* 806	II	28.50	0.16529	1.1907	0.2010	0.9758
6	2500	I	32.00	0.40317	2.4846	0.297	7.3524
8	625	II	28.50	0.14745	1.3885	0.153	1.7954
* 9	* 651	II	28.50	0.11894	1.04397	0.213	0.3580
13	1600	II	28.50	0.300	1.60152	0.220	1.6740
14	2500	I	32.00	0.29375	1.25832	2.201	0.4213
16	625	I	32.00	0.18441	1.60228	0.1830	0.86775
17	2500	II	28.50	0.25381	1.18728	0.261	3.7563
* 18	* 871	I	32.00	0.28649	1.76541	0.279	0.30667
20	2500	I	32.00	0.3541	1.64507	0.312	4.0971
* 25	* 983	I	32.00	0.24207	1.51449	0.296	0.4462

(\* ) Parcela aclareada.

### III.3.2.3. Aplicación de la función de Richards-Chapman en el crecimiento de parcelas aclareadas.

El examen estimado de los parámetros muestra una buena estabilidad de los valores de A, b y m para el rango de densidades estudiada. El parámetro k varía sensiblemente en función de la densidad. Pienaar y Turnbull (1973), a fin de estudiar la aplicabilidad de la función de Richards-Chapman para el crecimiento de parcelas aclareadas, propusieron la hipótesis siguiente:

Los parámetros de la función A, b y m pueden ser considerados constantes para describir el crecimiento de rodales bajo un rango amplio de densidades nominales en una misma calidad de sitio.

El parámetro k es el único parámetro que cambia de valor con densidad nominal. De la ecuación (2) se obtiene la expresión siguiente de k:

$$k = \frac{1}{T} \left[ \log_e b - \log_e \left( 1 - \left( \frac{W}{A} \right)^{1-m} \right) \right] \quad (16)$$

k puede ser considerado como el índice de una familia de curvas de crecimiento basimétrico para una misma calidad de sitio (Figura 6). A cada curva corresponde una densidad nominal de plantación particular. La Figura 6 permite visualizar que el valor de k varía en la misma dirección que la densidad nominal de plantación.

En vista de lo anterior se debe ahora examinar la plausibi-

lidad de la hipótesis del rango de Moller (1954), la cual especifica que dentro de cierto rango de valores de la espesura del vuelo de plantación, la tasa de crecimiento del área basal se mantiene más o menos constante.

Esta hipótesis, comprobada en algunos casos, no puede ser aceptada en la mayoría de los estudios por falta de información. Staebler (1960) consideró, en un estudio de rendimiento sobre Douglasfir (*Pseudotsuga menziesii*) que la edad desarrolla un papel importante en este aspecto. Clutter (1963) obtuvo curvas de crecimiento del área basal para loblolly pine relativamente planas lo que soporta la hipótesis de Möller. Curtis (1967) en un estudio de rendimiento sobre Douglasfir consideró aceptable esta hipótesis para edades superiores a 40 años. Cuando la teoría de Möller parece ser verificada en ciertos estudios, lo es referente al rendimiento volumétrico y, como lo señala Staebler, es poco probable que la tasa de crecimiento volumétrico o basimétrico se mantenga constante. La comprobación de la hipótesis de Möller ha permitido en algunas situaciones (con *P. Elliotii* en Queensland; Begeve, 1972) proponer unas normas de régimen de raleo eficientes. En el caso de plantaciones de Teca, Miller, (1969) propuso, para las plantaciones de Trinidad, un régimen de raleo en el cual se reduce drásticamente la densidad del rodal en los dos primeros aclareos y después se mantiene la espesura del vuelo entre  $14 \text{ m}^2/\text{ha}$  y  $21 \text{ m}^2/\text{ha}$ . La evaluación de este régimen de raleo en lo que se refiere al rendimiento total no es conocida, todavía, pero conviene anotar que estas normas son muy diferentes a las de la India, donde se procura aumentar continuamente el área

basal total del rodal a fin de obtener unos pocos árboles (entre 50 y 80 árboles) de diámetro muy importante al cabo de un turno de 80 años. Sagreiya (1955) en una serie de artículos titulados "Single Stern Silviculture", aprovechando las posibilidades ofrecidas por la labor de O'Connor (\*) y sus ensayos C.C.T. trató de buscar algunas soluciones a ciertos problemas de manejo.

Este autor manifiesta que en plantaciones de Teca de la India, la relación entre el número de árboles por acre, después del aclareo y el diámetro promedio del vuelo resultante es, más o menos, independiente de la calidad del sitio y de la edad. Al constatar que el método de aclareo empleado enfatiza en un espaciamiento uniforme y la forma del árbol, Sagreiya presentó unas soluciones teóricas derivadas del uso de la curva normal  $N/D$  (número de árboles/diámetro promedio). Su trabajo se refiere particularmente a la selección de árboles "elite" a llevar hasta la cosecha final.

Los trabajos que se acaban de citar deben ayudar a definir las condiciones de aplicación del modelo de Richards-Chapman en la simulación del crecimiento de parcelas aclareadas.

Pienar y Turnbull (1973), después de haber demostrado que la función Richards-Chapman podía ser ajustada correctamente para describir el crecimiento de las parcelas de un ensayo C.C.T. en Suráfrica al determinar unos valores comunes para los parámetros  $A$ ,  $b$  y  $m$  y valores particulares a cada densidad nominal para  $k$

-----  
\* A.J. O'Connor: Forest Research with special reference to planting distances and thinning. British Empire Forestry Conference, (1935).

propusieron la hipótesis siguiente:

Para un rango amplio del régimen de aclareo, la tasa de crecimiento en una parcela aclareada es idéntica a aquella de una parcela no aclareada de la misma edad y misma área basal.

Al asumir esta hipótesis las condiciones siguiente han de ser respetadas:

La competencia en la parcela no tiene efectos medibles, es decir, que los aclareos han de ser correctamente programados:

Los aclareos no son selectivos en ninguna dirección.

No se pretende en este estudio demostrar o negar dicha tesis dado que los datos disponibles no lo permiten, pero en vista de la elaboración de un modelo de simulación esta hipótesis permite disponer de una flexibilidad de trabajo satisfactoria. En la figura 7 se han representado las curvas de crecimiento de la parcela 9 aclareada y de la parcela 8 no aclareada. Se puede apreciar que las tasas de crecimiento son bastantes cercanas después del aclareo de la parcela 9. La figura 8 muestra el ejemplo de aplicación de la hipótesis de crecimiento de Pienaar y Turnbull, en parcela aclareada. El valor del parámetro  $k$  es calculado por la ecuación (16).

En el cuadro 8 se presentan los valores de parámetros escogidos en base a los resultados obtenidos. Estos valores se refieren a dos densidades nominales (1600 arb./ha y 2500 arb./ha) para las dos calidades de sitio presentes. Cabe destacar el carácter preliminar de estos datos.

## CUADRO 8

VALORES ESTIMADOS DE LOS PARAMETROS DE LA FUNCION DE  
 CRECIMIENTO DE RICHARDS-CHAPMAN PARA DOS CATEGORIAS  
 DE CALIDAD DE SITIO

Parámetro	Calidad de sitio I		Calidad de sitio II	
	1600 arb/h	2500 arb/ha	1660 arb/ha	2500 arb/ha
A (m <sup>2</sup> /ha)	32.0	32.0	28.5	28.5
b	1.3	1.3	1.1	1.1
m	0.38	0.38	0.20	0.20
k	0.27	0.36	0.22	0.29

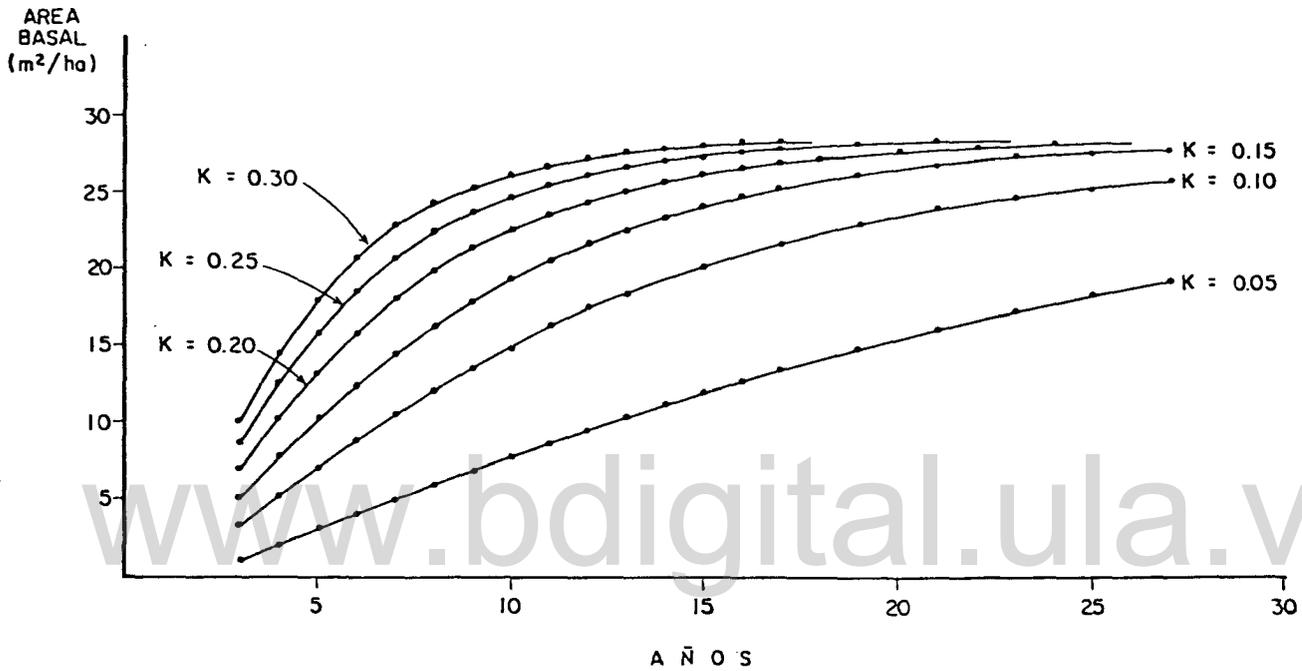


Figura 6. Familia de curvas de crecimiento de área basal para parcelas no aclareadas con los valores de parámetros siguientes:

$$A = 28.5 \text{ m}^2/\text{ha}; B = 1.20 \text{ m} = 0.20.$$

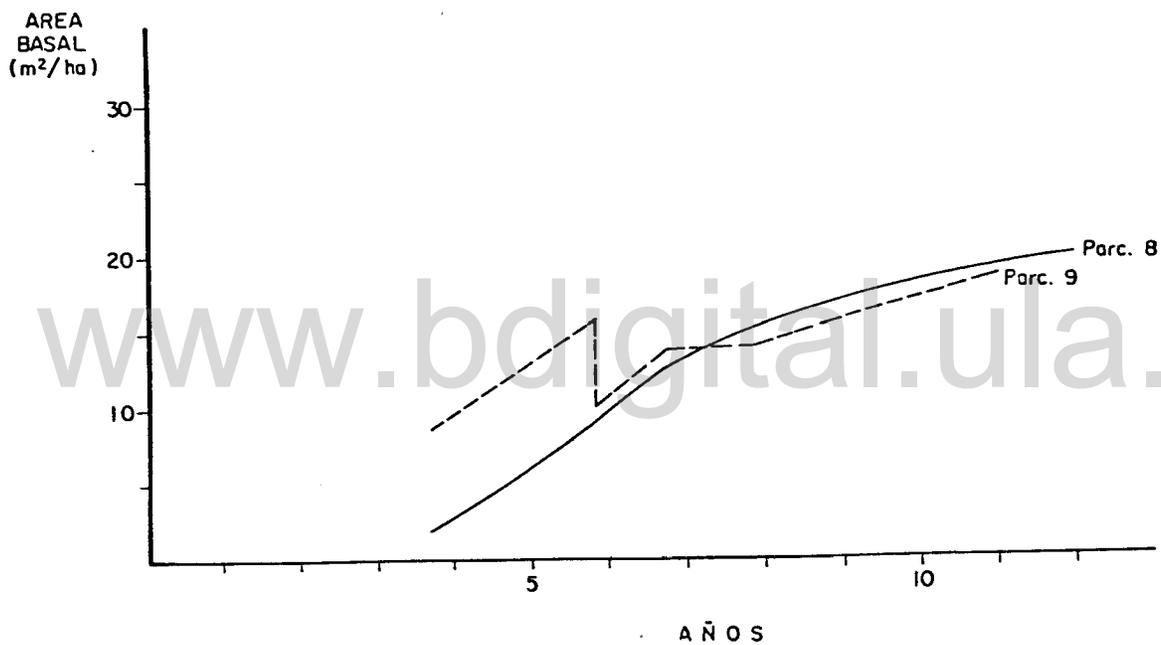


Figura 7. Curvas de crecimiento de área basal para las parcelas 9 y 8 (calidad de sitio II).

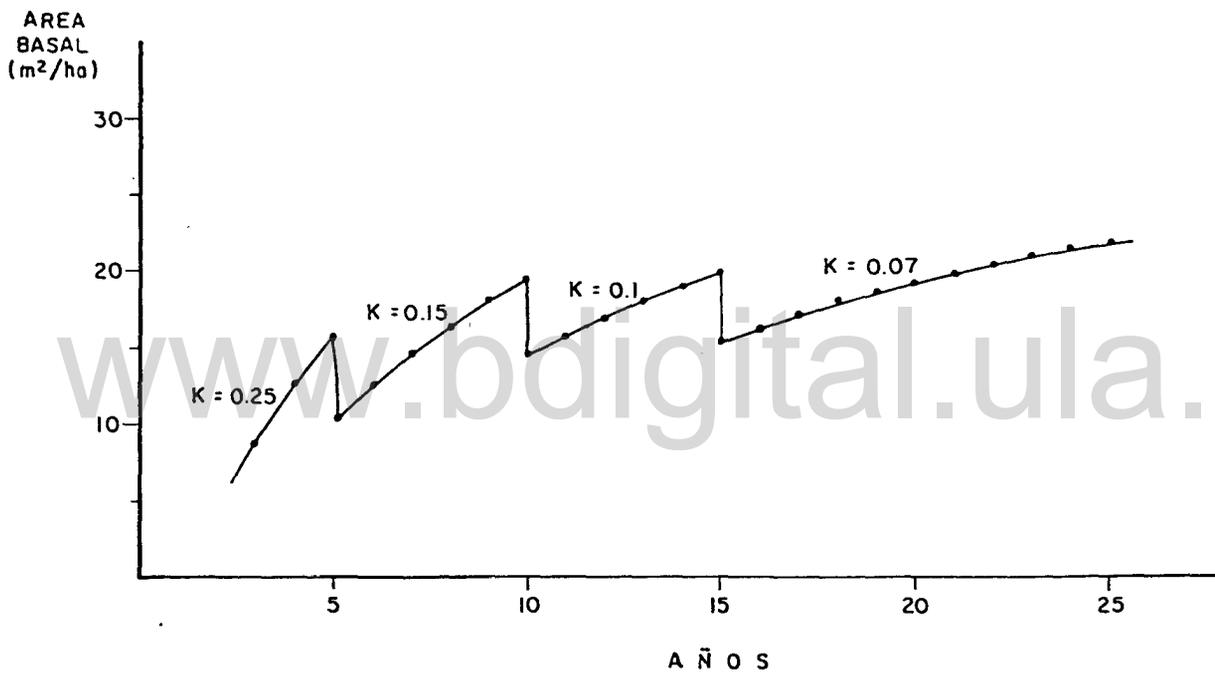


Figura 8. Curva de crecimiento de área basal para una parcela aclareada con los valores de parámetros:

$$A = 28.5; B = 1.20; m = 0.18$$

En las limitaciones expuestas a las especificaciones de los aclareos pueden aparecer demasiadas restricciones en el modelo de simulación propuesto. Por lo tanto, se ha dejado la posibilidad de explicarlas más flexiblemente según el modelo propuesto por Pienaar (1977) y adaptado en el modelo de crecimiento de Pimstein (1978) por Ayanma (1983).

La expresión matemática de este modelo es la siguiente:

$$\left(\frac{b}{B}\right) = \left(\frac{n}{N}\right)^{\alpha}$$

en la cual:

B y N son el área basal y el número de árboles por hectárea removidos por el aclareo;

$\alpha$  es un coeficiente que según su valor expresa la selectividad del aclareo.

En realidad los aclareos en plantaciones tienden a ser selectivos por lo bajo, es decir, que el porcentaje de número de árboles removidos es superior al porcentaje del área basal removida. Estas condiciones corresponden a  $\alpha > 1$ .

Un aclareo selectivo hacia lo alto se traduce por  $\alpha < 1$ .

Al realizar un aclareo selectivo en cualquier dirección, las condiciones que se fijan para usar el modelo de crecimiento de Richards-Chapman no son más cumplidas y el valor de la simulación del crecimiento es desconocido por falta de información. La búsqueda de un modelo general de índice de supresión no puede ser contemplada con los datos disponibles. Pienaar (1977) señala que

una base de datos sustancial es requerida para tal propósito y no se halla disponible todavía.

El enfoque global de este problema sugiere que ello constituye un límite de los modelos de crecimiento del área basal en base al rodal, en oposición a los modelos de crecimiento, partiendo del árbol individual.

#### III.4. ALTURA

El análisis del crecimiento en altura ha sido realizado por Torres L. (1982) y Luque (1981).

Estos estudios se refieren a la altura mayor (altura promedio de los cien árboles más altos por hectárea; Voorhoeve y Schulz, 1968). Tres calidades de sitio han sido determinadas en base al análisis de estos datos por Luque (1981). Torres L. redujo este número a dos. Sus conclusiones permiten ubicar la calidad I de Caparo dentro de la clase I para Centroamérica y el Caribe, según la clasificación preliminar de Keogh (1979) y dentro de la clase I (subclase 2.0) de la India, según la clasificación del Forest Research Institute, Dehra Dun, de la India (1964).

La calidad II de Caparo correspondería a la calidad II (subclase 2.0) de la India. Estas conclusiones tienen un carácter preliminar. Lamb (1957) cita un descenso de clasificación de las calidades de sitio en Trinidad en base a las tablas de la India, entre 10 y 25 años.

Para los propósitos de este trabajo se requiere conocer, al menos, los valores de altura de los árboles en función del diámetro (dap) a fin de calcular el volumen de los vuelos principal y eliminado según el método usado para la elaboración de las tablas de la India. Se ha decidido, por lo tanto, recurrir a los datos provenientes de las mejores fuentes extranjeras a fin de disponer de un modelo completo que podrá ser refinado en el futuro mediante la obtención de la información de la cual hoy carecemos. Las tablas generales de volumen para Teca en la India, elaboradas por Von Wulffing (1933), dan los valores de altura en función del diámetro. Se ha determinado la regresión matemática entre estas variables para valores de altura entre 5 m y 50 m; los diámetros correspondiente son incluidos en un rango de 4.8 y 68 cms.

La mejor regresión determinada es la siguiente:

$$A = 1.65693 + 0.68500 D - 0.00203 D^2 + 0.00003 D^3$$

nivel de confianza 100% por  $P = 0.99$ , de los tres términos de la regresión,

en la cual:

A es la altura en metros

D es el diámetro en centímetros.

Se puede apreciar que la relación es casi lineal.

La calidad de sitio no influencia directamente el crecimiento de la altura en el modelo escogido. Sin embargo, la altura se expresa en función del diámetro, lo cual está directamente ligado

al área basal del rodal. El crecimiento de esta última variable, por estar relacionado a la calidad del sitio, determina que el diámetro lo esté también y, por ende, la altura. Así, el rendimiento volumétrico estará correctamente condicionado al sitio.

### III.5. VOLUMEN

La carencia de informaciones locales acerca del crecimiento y rendimiento volumétrico obliga a referirse totalmente a otras fuentes. Si se ha decidido, a pesar de la falta de información, incluir esta variable dentro del modelo de simulación, es a fin de obtener un modelo más completo para el uso docente y, eventualmente, susceptible de mejoramiento mediante el aporte de la información faltante.

Se ha recurrido al método adoptado para la elaboración de las tablas de rendimiento de la India.

Se computa la altura promedio del vuelo principal (o eliminado) por la fórmula de Lorey, que es:

$$H = \frac{ab_1 h_1 + ab_2 h_2 + \dots + ab_n h_n}{ab_1 + ab_2 + \dots + ab_n}$$

en la cual

H es la altura promedio

ab es el área basal de cada clase diamétrica

h es la altura correspondiente al diámetro promedio de cada clase diamétrica.

El volumen por hectàrea es dado por la relaci3n siguiente:

$$V = AB \times H \times fm$$

en la cual:

AB es el àrea basal total por hectàrea

H la altura promedio del vuelo principal

fm el factor m3rfico

El volumen de madera de fuste y el volumen de madera pequena se refieren, respectivamente, al volumen bajo corteza del fuste desde el suelo hasta un diàmetro sobre corteza de 20 cms y al volumen sobre corteza del fuste y de las ramas desde un diàmetro de 20 cm hasta 5 cm.

Se utilizaron los datos de las tablas de rendimiento de la India para calcular las regresiones, factor m3rfico-edad en base a las correspondencias de calidades de sitio avanzadas por Torres Lezama (1982) y asumidas en este estudio.

Las expresiones determinadas son las siguientes:

para la calidad de sitio I:

$$\text{Log FM} = -12.241 + 20.197 \text{ Log T} - 11.738 (\text{Log T})^2 - 2.30358 (\text{Log T})^3$$

$$\text{Log FP} = -0.07953 - 0.02989 \times T - 0.00098 \times T^2$$

para la calidad de sitio II:

$$\text{Log FM} = -15.566 + 26.023 \text{ Log T} - 15.110 (\text{Log T})^2 + 2.949 \times (\text{Log T})^3$$

$$\text{Log FP} = -0.2881 + 0.00546 \times T - 0.00171 \times T^2$$

en las cuales:

FM y FP son los factores mórficos para volumen de madera de fuste y volumen de madera pequeña respectivamente  
T es la edad.

El nivel de confianza de las regresiones es de 100% para cada término de las regresiones al nivel  $P = 0.95$  (paquete Basis)

La evaluación de tales modelos no puede hacerse sino dentro de la evaluación global de las simulaciones. (Capítulo VII)

Las asunciones hechas, en cuanto al cálculo de la altura y del volumen, permiten así disponer de un modelo de simulación más completo. Ellas habrán de ser comprobadas en el futuro. La determinación del volumen de madera por clase diamétrica presente no puede ser contemplada actualmente y unas asunciones suplementarias parecerían demasiado inconsistentes.

#### IV. PRACTICAS SILVICULTURALES

---

Este capítulo se refiere a ciertas prácticas silviculturales establecidas en varias regiones del mundo en plantaciones de Teca.

El modelo de simulación propuesto aquí tiene el propósito de permitir la evaluación de numerosas alternativas de manejo, dentro de una gama realista de prácticas silviculturales. Por lo tanto, el valor de referencia que pueda constituir este capítulo lo será sólo para el usuario del modelo.

La Teca es una especie conocida por la calidad de su fina madera. La producción de fustes de diámetro aceptable y de buena forma constituye el objetivo principal para los silvicultores. Es por ello que la determinación del régimen óptimo de aclareo que permita obtener la producción deseada en el menor tiempo posible es un requisito esencial para garantizar el éxito económico de un proyecto de plantaciones de Teca.

##### IV.1. DENSIDAD INICIAL DE PLANTACION

La escogencia del espaciamiento inicial depende en parte de la calidad del sitio. En la India el espaciamiento de 6 x 6 pies (aprox. 2m x 2m) es lo más común y es lo recomendado en los sitios de calidad II inferior, III y IV. Un aclareo fuerte es necesario a los cinco años a fin de reducir la supresión debida al cierre del dosel y limitar la formación de ramas bajas. En la India la importancia económica de la madera pequeña como combus-

tible justifica la adopción de una densidad de plantación elevada. Para los sitios de calidad I la adopción de un espaciamento inicial mayor obedece a varios factores (Kadambi, 1972). El cierre del dosel ocurrido a una edad más temprana, 3 años, aconseja realizar a esta edad el primer aclareo, a fin de liberar los árboles dominados. Vincent y Luque (1980) hizo unas recomendaciones en tal sentido para las parcelas de Caparo, ubicadas en los mejores sitios. El espaciamento de 2.5 x 2.5 m (1.600 árboles por ha) puede ser recomendado para los sitios de calidad I de Caparo y el primer aclareo deberá realizarse a los cuatro años a más tardar. Para los sitios de calidad II la escogencia de la densidad inicial está condicionada por el mercado que se pueda encontrar para los productos del aclareo. Además, una densidad elevada se traduce en costo importantes de vivero y plantación. En las condiciones locales una densidad inicial de 2.000 árboles por ha (2.5m x 2.5 m) parece ser un límite máximo a considerar. Kadambi (1972) señala la importancia del factor climático. La presencia de una estación seca larga, como ocurre en la región Nor-occidental de Venezuela, podría ser un factor muy influyente en el crecimiento de rodales densos.

#### IV.2. LAS PRACTICAS DE ACLAREO

Los aclareos condicionan el desarrollo de la plantación a lo largo de su vida. Los efectos de un aclareo precedente no desaparecen al realizarse el próximo y, por lo tanto, los aclareos deben ser planificados en una línea de continuidad que traduce la persecución de ciertos objetivos de producción prefijados.

Se ha dicho que la fijación de la edad del primer aclareo esta íntimamente ligado a la densidad inicial de plantación. Este aclareo puede presentar una ligera selectividad por la eliminación preferencial de los árboles más pequeños. Sin embargo, el criterio básico para este aclareo es la conservación de un espaciamiento uniforme.

El aclareo de grado C en la India se basa en la eliminación de los árboles menos prometedores, manteniendo un buen espaciamiento entre los árboles restantes. La intensidad del aclareo es de 50% aproximadamente en los sitios de calidad I y de 40% en los sitios de calidad II. Es lógico que en los mejores sitios se pretenda obtener árboles de mayores diámetros lo más temprano posible, mientras que en los sitios de calidades inferiores se buscará el desarrollo del rodal hacia una producción volumétrica total elevada.

Las tablas de rendimiento de la India han sido elaboradas en base a un régimen de aclareos de grado C a efectuarse cada 5 años. Estas tablas constituyen la mejor referencia disponible sobre el tema. En otras regiones del mundo los trabajos de Keogh (1977 y 1979) en la región del Caribe y Centroamérica son una guía útil para los silvicultores de esta región. Keogh propone un régimen de raleos en base a las recomendaciones de Miller (1969) para Trinidad. El espaciamiento inicial es de 2 m x 2.5 m (2.000 árboles por ha). Se recomienda hacer los dos primeros raleos intensos (50%) y los siguientes en base al área basimétrica. Cuando dicha área basimétrica alcance 20 a 21 metros cuadrados se remueve 6 metros cuadrados.

La fijación de la rotación se basa en consideraciones económicas. Conviene señalar que el turno físico determinado en base al incremento volumétrico medio anual no llega a ser inferior a cincuenta años en los mejores sitios de la India. Así como lo anota Keogh (1979): "Contrariamente a lo que se cree, la Teca no es una especie de crecimiento rápido, a pesar de que su desarrollo inicial es relativamente acelerado". En las condiciones reinantes en Venezuela, los productos de los primeros aclareos pueden tener acceso a un mercado para la producción de machihembrado, por ejemplo. Las perspectivas económicas a mediano plazo orientan hacia la obligación de incrementar drásticamente la producción de madera de todo tipo y tamaño, para aliviar al país de la carga excesiva que hoy representa en divisas el volumen de las importaciones madereras.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## V. EL MODELO DE SIMULACION

---

### V.1. Presentación del modelo

#### V.1.1. Características del programa

El modelo de simulación de crecimiento para computadora constituye un sistema (o logicial) cuya función es la simulación del sistema que se ha definido para representar una parcela. Este logicial es elaborado sobre la base de los resultados de los análisis referentes a los diferentes componentes del sistema.

El logicial ha sido concebido en lenguaje Fortran 77, para ser ejecutado por una computadora Burroughs 5900, equipo de la familia de las maxicomputadoras.

A título de referencia se dan las informaciones siguientes sobre la compilación del programa, sin comentarios incluidos. El tiempo máquina de procesamiento es de 42 segundos aproximadamente; el número total de palabras (words) generadas por el programa objeto es de 2029 (48 bits por palabra).

#### V.1.2. Posibilidades de uso del modelo

El modelo de simulación propuesto permite la simulación del crecimiento de un rodal de Teca a partir de una edad inicial no inferior a 3 años y hasta una edad de 60 años.

La edad inicial mínima para la simulación se recomienda que no sea inferior a 3 años porque los análisis realizados en este

estudio se refieren a datos recogidos a edades superiores a 3 años. Sin embargo, el programa no presenta un límite de orden lógico o aritmético que impida escoger una edad inicial inferior. La edad final ha sido fijada en 60 años, lo que parece suficiente, dado los posibles usos que pueda encontrar este modelo. Habrá necesidad de redimensionar los arreglos del programa en el caso de que se desee obtener simulaciones para periodos más largos. Es posible, por lo tanto, escoger una edad inicial de simulación superior a 3 años y una edad final inferior a 60. Actualmente las opciones disponibles para el usuario son: 3 densidades iniciales de plantación y 2 categorías de calidad de sitio.

Estas densidades iniciales de plantación corresponden a 2500, 2000 y 1600 árboles por ha, lo que representa las opciones más corrientes que se encuentran en plantaciones locales con fines de producción. Se ha considerado conveniente no ampliar estas opciones debido a la poca información existente. La extensión de estas opciones puede ser contemplada para la simulación del crecimiento de parcelas con fines experimentales. Se tendrán que evaluar los parámetros de la función de crecimiento de Richards-Chapman para cada caso suplementario y redimensionar algunos arreglos, lo que afectará ligeramente los requerimientos de memoria del programa.

La fijación del régimen de aclareo se dejó enteramente al usuario. Hasta 15 aclareos (con la corta final que no se especifica) pueden realizarse durante el periodo de simulación, lo que cubre las necesidades de cualquier simulación "realista" en plantaciones de Teca con un turno no superior a 60 años. Es posible

también programar una simulación de crecimiento sin realizar aclareo.

### V.1.3. Restricciones para el uso del modelo

El modelo está básicamente concebido para la simulación del crecimiento de un rodal a partir de una edad inicial temprana (entre 3 y 10 años) hasta la edad final de la simulación, en la cual se efectúa el corte final.

Ciertas asunciones formuladas para el análisis de los componentes del sistema y unas limitaciones derivadas de la estructura del programa del modelo de simulación restringen las posibilidades de definición por el usuario de las condiciones de simulación.

Las características del rodal en la edad inicial escogida por el usuario, no pueden ser definidas por éste. El número de árboles del vuelo de plantación es determinado por la subrutina MORTAL hasta la edad de 10 años (el décimo año incluido), a menos que se haya realizado un aclareo entre la edad inicial de la simulación y la edad de 10 años. En este caso el número de árboles de vuelo de plantación se modifica solamente al realizarse un aclareo. La modificación del programa a fin de disponer de aquella posibilidad no presenta ninguna dificultad.

La distribución diamétrica del rodal inicial, como la proyección de las distribuciones diamétricas futuras, depende de la subrutina DDIAM, la cual determina las características de una distribución diamétrica lognormal en función del diámetro prome-

dio del vuelo de plantación, de la desviación promedio que depende del diámetro promedio y del número total de arboles. No es posible ninguna modificación del programa.

La simulación del crecimiento basimétrico se computa por la subrutina ABASAL. El uso del modelo de crecimiento de Richards-Chapman impone una limitación a la especificación de los aclareos. Se recomienda la simulación de regímenes de aclareo no selectivo, a menos que se quiera comparar los resultados de simulación con datos de crecimiento provenientes de parcelas aclareadas para las cuales es posible calcular el coeficiente de selectividad de aclareo presentado en este estudio. Además la distribución diamétrica del vuelo principal, después de la realización de un aclareo selectivo, no se ajustará al modelo lognormal, lo que retira toda plausibilidad a las proyecciones diamétricas futuras.

La definición del cuadro en el cual se formulan las condiciones iniciales de las simulaciones puede permitir al usuario del modelo un entendimiento correcto de las posibilidades ofrecidas por el modelo y, de esta forma, ayudarlo a la obtención de resultados aceptables de simulación.

## V.2. FUNCIONAMIENTO

### V.2.1. Programa principal

El diagrama de flujo (Figura 9) representa las relaciones que unen las diferentes subrutinas del modelo. Un programa principal coordina la dirección de las subrutinas en función de

ciertas variables exógenas suministradas por el usuario.

El programa empieza por leer el valor de los parámetros de las funciones matemáticas utilizadas en las diferentes subrutinas del modelo. Estos valores son almacenados en un archivo, para facilitar modificación posterior, si ello es aconsejable.

A continuación se llama a la subrutina INICIO. Esta subrutina lee los datos suministrados por el usuario de un segundo archivo de datos de entrada y ordena imprimir los datos operativos de la simulación. La simulación del crecimiento empieza a partir de la edad inicial escogida por el usuario.

En el año inicial el mando siguiente es la subrutina MORTAL, que calcula el número de árboles presentes partiendo de la densidad inicial de plantación.

La siguiente subrutina que se llama se titula ABASAL. Calcula el área basal inicial de la simulación.

El programa sigue con la llamada de la subrutina DDIAM que establece la distribución diamétrica inicial.

La siguiente subrutina se titula ALTURA. Calcula la altura en cada clase diamétrica representada y la altura promedio del vuelo.

Después la subrutina VOLUM determina los valores de volumen de madera de fuste y de madera pequeña para el vuelo.

Si se realiza un aclareo en el año inicial la subrutina ACLAR determina el número de árboles a remover en cada clase diamétrica.

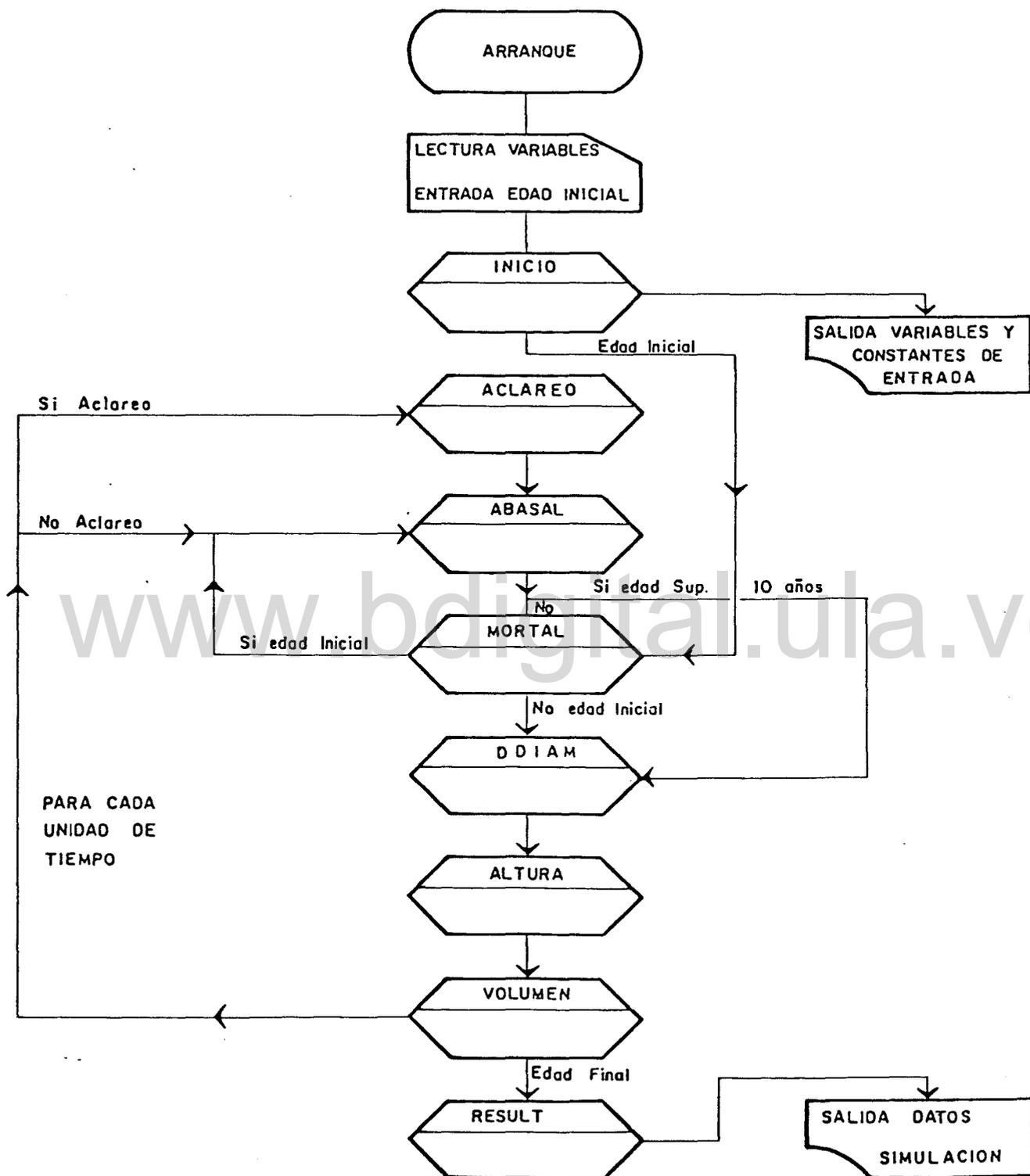


Figura 9. Diagrama de flujo del modelo de simulación.

Las subrutinas ABASAL, MORTAL, DDIAM, ALTURA, VOLUM se llaman en este orden en los ciclos siguientes y calculan los valores de los diferentes variables para el inicio del siguiente año. Los datos del aclareo son, a su vez, calculados en el año de su realización.

El modelo simula el crecimiento del rodal hasta una edad de sesenta años. En este último año se efectúa la corta final y la subrutina RESULT impone los datos siguientes:

- i) distribución diamétrica por año;
- ii) área basal anual por clase diamétrica;
- iii) altura promedio y volumen de producción por año para el vuelo principal;
- iv) datos relativos a los aclareos realizados: altura y volumen del vuelo determinado;
- v) un cuadro en que quedan resumidas las principales características del rodal por año.

#### V.2.2. Subrutina INICIO

Esta subrutina lee los datos suministrados por el usuario, que son los siguientes:

AIS: Edad inicial de la simulación:

AFS: Edad final de la simulación (máximo 60 años. Año de corte total).

CS: Categoría de calidad de sitio (1 o 2)

D: Densidad inicial de plantación

(El modelo ha sido calibrado para cualquiera de los tres valores siguientes: 2.500, 2.000 o 1.600 árboles/ha)

ALPHA: Coeficiente de selectividad de aclareo.

AC (15): Edades en las cuales se efectúan los aclareos

(catorce valores como máximo pueden ser suministrados.

El decimoquinto valor del arreglo corresponde a la edad final y se expresa con el valor 0. Cuando se especifique un régimen de aclareo con menos de 14 operaciones se debe completar el arreglo AC con el valor 0 para las variables siguientes, hasta la decimoquinta.

INT (15): Las intensidades de los aclareos en el orden correspondiente al arreglo AC (15). El valor 0 completa el arreglo.

### V.2.3. Subrutina MORTAL

Esta subrutina se activa para calcular el número de árboles vivos al fin del año A. Las restricciones siguientes son impuestas en el modelo, a fin de que MORTAL sea activada.

- i) El rodal no ha sido aclareado antes del año A.
- ii) Pasada la edad de 10 años MORTAL no es llamada y se asume una mortalidad nula.

ARBM (A): Es el número de árboles muertos hasta fin del año A.

ARB (A): Es el número de árboles sobrevivientes al fin del año A.

YMOR: Es la mortalidad de la densidad inicial, expresada en porcentaje. (Véase sub-capítulo III.2. para la expresión matemática de YMOR)

#### V.2.4. Subrutina DDIAM

Esta subrutina genera la distribución diamétrica al final del año A. Requiere el conocimiento del valor de media aritmética de los diámetros DMA (A).

La subrutina ABASAL calcula previamente el valor del diámetro del árbol de área basimétrica promedio y DDIAM aproxima el valor de la media aritmética de los diámetros.

Se ha desarrollado un algoritmo para la generación de la distribución lognormal. Los parámetros de la ley lognormal la media geométrica DMG y la desviación promedio SD son estimados en base a las regresiones establecidas (véase sub-capítulo III.1.). El algoritmo ha sido probado exitosamente en un programa separado antes de ser implementado en el modelo.

El número de árboles en la clase diamétrica CD en el año A es dado por la variable FCARB (A, CD).

La amplitud de las clases diamétricas es de un cm. El número de clases diamétricas ha sido fijado en 95, lo cual es suficiente para una simulación de turno no superior a 60 años.

#### V.2.5. Subrutina ALTURA

Esta subrutina, en el año inicial, genera los valores de la altura total del árbol correspondiente al punto medio de cada clase diamétrica, según la ecuación establecida (véase subcapítulo III.4.).

En los años posteriores ALTURA calcula el valor de la altura total promedio del vuelo principal al final del año A y, si se ha realizado un aclareo al final del año A, el valor de la altura

promedio del vuelo eliminado.

ALT(CD) representa la altura total del árbol perteneciente a la clase diamétrica CD. ALT(CD) es calculado según la ecuación presentada en el subcapítulo III.4., para el valor del punto medio de clase igual a  $CD + 0.5$  (cm)

ALTPR(A) y RALRPR(A) representan los valores respectivos del vuelo principal y del vuelo eliminado en el año A.

#### V.2.6. Subrutina VOLUM

La subrutina VOLUM calcula los valores respectivos del volumen de madera de fuste y de madera pequeña, al final del año A.

(ver las definiciones en el Capítulo III.5.)

Como ejemplo para el cálculo del volumen de madera de fuste del vuelo principal, se aplica la relación siguiente:

$$VOLUMP(A) = AB(A) * ALTPR(A) * FM(A)$$

en la cual:

VOLUMP(A) es el valor del volumen de maderade fuste en  $m^3/ha$

AB(A) es el área basal al final del año A.

ALTPR(A) es la altura promedio del vuelo al final del año A.

FM(A) es el factor mórfoico para la determinación del volumen de madera de fuste.

Las ecuaciones de regresiones del factor mórfoico (para maderade fuste o madera pequeña) en función de la edad han sido establecidas en el sub-capítulo III.5. En el caso de que se realice un aclareo al principio del año A, VOLME(A) y VOLPE(A) son los valores calculados de volumen de madera de fuste y volumen de madera pequeña del vuelo eliminado.

### V.2.7. Subrutina ACLAR

La subrutina ACLAR se activa cuando el año se iguala a un valor de arreglo AC(N) de las edades en las cuales se efectúan los aclareos.

ACLAR determina el número de árboles a remover. En el caso de que el aclareo sea selectivo, este valor viene determinado por la aplicación del modelo propuesto por Pienaar (1977) (véase sub-capítulo III.3.).

El programa de esta subrutina ha sido probado en el modelo de crecimiento de Pimstein (1978) por el autor (Ayangma, 1983).

Las variables calculadas por ACLAR son las siguientes:

RAB(A) es el área basal removida en el año A.

RABACL(A, CD) es el área basal removida en la clase diamétrica CD.

RARB(A) es el número de árboles removidos en el año A.

RFCARB(A, CD) es el número de árboles removidos en la clase diamétrica CD.

ACLAR establece, después de las operaciones referentes a la remoción, los nuevos valores del área basal AB(A) y del área basal por clase diamétrica ABACL(A, CD).

### V.2.8. Subrutina ABASAL

La subrutina ABASAL calcula el área basal del rodal al final del año A.

En aplicación de los resultados del análisis del crecimiento del área basal (véase sub-capítulo III.3.) el único parámetro de

la función de Richards-Chapman que puede variar es el parámetro  $k = XK(A)$ . En la subrutina  $XK(A)$  es igual al inicio de la simulación a uno de los tres valores de  $k$  almacenados en el archivo de constantes DATAPAR y correspondiente a una de las tres densidades iniciales disponibles para la simulación.  $XK(A)$  es evaluado nuevamente en el caso de que se haya realizado un aclareo al principio del año considerado.

La ecuación (16), que da el valor de  $k$  o  $XK(A)$ , aparece en el sub-capítulo III.3.

ABASAL calcula, por lo tanto, el valor  $AB(A)$  correspondiente al área basal total al final del año  $A$ , y el valor  $DMA(A)$  correspondiente al diámetro del árbol de área basal promedio.

$DMA(A)$  es dada por la relación

$$DMA(A) = \sqrt{\frac{AB(A)}{ARB(A)} \times \frac{4}{\pi}}$$

en la cual

$ARB(A)$  es el número de árboles presentes al final del año  $A$ .

Los parámetros de la función de tasa de incremento son computados y el valor de tasa de crecimiento al final del año,  $TAB(A)$  es calculado (ver ecuación (1) sub-capítulo III.3.).

## VI. EVALUACION DEL MODELO

---

### VI.1. RESULTADOS

Se ha ejecutado el programa del modelo de simulación desde numerosas alternativas de manejo, a fin de averiguar su buen funcionamiento dentro de los límites previamente impuestos. Después de la comprobación del programa se ha tratado de evaluar los resultados de la simulación.

Se recomienda generalmente proceder a la evaluación de los resultados de una simulación en base a un conjunto de datos no utilizados en el análisis de los componentes del sistema, a fin de cuantificar las desviaciones observadas entre los valores observados y los valores simulados.

En las condiciones propias del estudio esta metodología no resultó ser aplicable. El conjunto de datos potencialmente utilizable es relativamente reducido y, por varias razones, se tuvo que seleccionar dentro de este conjunto de datos aquellos de mayor representabilidad. Por lo tanto, se decidió proceder de la siguiente manera:

En vista de que el modelo ha sido calibrado en base a los datos referentes a unas edades inferiores a 12 años, en un primer paso, se han comparado los datos arrojados por la simulación de crecimiento sin aclareo con los datos de varias parcelas no aclareadas, a fin de apreciar la calidad de las simulaciones.

Los datos que se podían comparar eran la mortalidad, la distribución diamétrica y el crecimiento del área basal. Los datos obtenidos referentes a la altura y al volumen, al ser

obtenido de regresiones extrapoladas de las tablas de rendimiento de la India hablan de ser comparados con los datos de dichas tablas.

#### a) Mortalidad

Los datos de mortalidad simulada a la edad de 3 años aparecen en el Cuadro 6 (p.35). La estimación es satisfactoria para una densidad inicial de 1600 árboles/ha. La desviación promedio es inferior al 5%, tomando como base la comparación de 7 parcelas. Para una densidad inicial de 2500 árboles/ha la desviación es inferior al 10% tomando como base la comparación de 3 parcelas. A la edad de 10 años, límite fijado para la simulación de esta variable, la desviación es del orden del 7-8% para las dos densidades iniciales consideradas en base a los datos de las parcelas no aclareadas (6 parcelas). La simulación de esta variable aparece, por lo tanto, suficientemente buena para demostrar el interés de considerarla cuando se desee simular el crecimiento de una parcela no aclareada.

#### b) Distribución diamétrica

La evaluación de la simulación de este componente del modelo de crecimiento no ha podido hacer en forma aislada, sino al considerar también los datos simulados del crecimiento basimétrico y, por ende, del diámetro promedio. Como la simulación de distribución diamétrica depende de las simulaciones de mortalidad y de crecimiento diamétrico, la evaluación se ha limitado a la observación comparativa del conjunto de os datos simulados con datos reales. Se presentan en el Cuadro

9 dos comparaciones de distribuciones observadas y simuladas. Se debe insistir en el hecho de que el modelo de crecimiento correctamente calibrado simula la evolución de diferentes variables del crecimiento, a fin de obtener un conjunto de resultados suficientemente representativo. Por lo tanto, un análisis estadístico de los resultados de la simulación de la distribución diamétrica no aportará más información, a no ser que se disponga de un volumen elevado de datos para proceder a esta prueba. Entonces, se ha de evaluar los resultados en función de los objetivos del estudio. La simulación de aquella variable puede parecer aceptable desde este punto de vista y en el estado de información reducida con que contamos actualmente.

#### c) Área basal

La simulación del crecimiento del área basal es el eje central del proceso global. El crecimiento de esta variable condiciona en el sistema previamente definido el de la distribución diámetro, de la altura y, por ende, del volumen. El análisis del crecimiento de esta variable puso de relieve el potencial de flexibilidad que ofrece el modelo de crecimiento de Richards-Chapman escogido para este estudio. El ajuste de este modelo al crecimiento de área basal de una parcela cualquiera es relativamente fácil; sin embargo, esta apreciación no constituye un objetivo principal de este trabajo. Así, en proceso de calibración del modelo, los valores, de parámetros de la función de Richards-Chapman inicialmente retenidos en base al análisis de esta variable han sido ligeramente modificados a fin de mejorar en su

conjunto los resultados de las simulaciones. La disposición de un archivo de valores de parámetros de las funciones empleadas en el modelo facilita considerablemente esta operación. Los resultados de la simulación han sido comparados con el conjunto de datos utilizado en el análisis de aquella variable. Las simulaciones de crecimiento en parcelas no aclareadas han sido particularmente satisfactorias, lo cual se debe al método de análisis seguido. Se destaca el interés de la simulación del proceso de mortalidad, particularmente en parcelas aclareadas, pues permite obtener resultados de cierta verosimilitud, referentes tanto a la distribución diamétrica, como al diámetro promedio.

d) Altura y volumen

La determinación de los modelos matemáticos de crecimiento de la altura y de rendimiento volumétrico se ha hecho en base a los datos de tablas de rendimiento para plantaciones de Teca en la India (Forest Research Institute, Dehra Dun). Por lo tanto, la evaluación de los resultados de las simulaciones no puede si no hacerse en base a aquellas tablas. Esta evaluación no es más que una mera comprobación de la adecuación de los modelos matemáticos determinados. Aplicando el régimen de manejo establecido para estas tablas, se han obtenido resultados cercanos a aquellos datos, pero regularmente inferiores. La explicación de este hecho probablemente reside en que las normas de aclareo (aclareo de grado C) en la India, aun basándose en un espaciamiento regular entre los árboles, en la práctica se convierte en una remoción preferencial de los árboles dominados.

En una segunda etapa se probò el modelo de simulaciòn con un régimen de aclareos especificado y se observó el crecimiento del área basal en estas condiciones.

Las hipótesis asumidas para la producción del crecimiento del área basal después del aclareo no pueden ser rechazadas por la comparación con el conjunto de datos disponible. Además, durante los 10-15 primeros años de una plantación de teca el crecimiento es particularmente vigoroso y sostenido, condiciones que concuerdan con las bases teóricas del modelo de Richards-Chapman y que permiten, para este período, obtener resultados aceptables.

Se ha simulado, por lo tanto, el crecimiento de un rodal en condiciones parecidas a aquellas seleccionadas en la elaboración de las tablas de rendimiento de la India. Estas condiciones estipulan que los primeros aclareos deben ser intensos (50% a 5 y 10 años) y después con una intensidad decreciente.

El objetivo perseguido es la obtención de un rendimiento basimétrico creciente del vuelo principal, pero concentrado en un número de árboles cada vez más reducido después de los aclareos.

El modelo de crecimiento de Richards-Chapman parece responder correctamente, en esas condiciones de simulación y los resultados muestran un rendimiento creciente.

## CUADRO 9

DISTRIBUCIONES DIAMETRICAS SIMULADAS  
POR EL MODELO Y DE DOS PARCELAS PR DE TECA

N U M E R O   D E   A R B O L E S   P O R   H E C T A R E A				
Clase diame trica en cm.	Distribucion simulada Edad: 4 diam.prom. 10.2 cm.	Distribucion Parcela 14 Edad: 3.7 diam.prom. 10.8 cm.	Distribucion simulada Edad: 4 diam.prom. 10.4 cm.	Distribucion Parcela 12 Edad: 3.7 diam.prom. 10.6 cm.
5		20		
6	4	10	2	27
7	28	80	15	100
8	101	140	59	94
9	224	220	139	202
10	366	280	236	200
11	480	470	334	364
12	336	340	263	373
13	208	110	161	145
14	118	70	95	36
15	54	30	53	
16	33	20	28	
17	16		14	
18	8		7	
19	4		3	
20	2			
21				
22				
Total	1988	1790	1409	1541

## VI.2. Conclusiones de la evaluación del modelo

El programa original del modelo de simulación ha sido modificado a fin de obtener un gráfico que representa el crecimiento basimétrico a lo largo del periodo de simulación, lo que permite:

- 1) apreciar más fácilmente los efectos de un régimen de aclareos sobre esa variable;
- 2) ayudar a la definición de las próximas simulaciones;
- 3) reforzar su aplicabilidad pedagógica.

La prueba del modelo con datos provenientes de otras fuentes (ej.: de la Reserva Forestal de Ticoporo) o su modificación para permitir la simulación del crecimiento de plantaciones de especies diferentes (ej.: *Pinus caribea* de las plantaciones de Oriente del país) debería permitir una evaluación más precisa de las simulaciones, así como de la eficiencia del modelo.

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

La realización de este trabajo se decidió en pleno conocimiento de la carencia de información suficiente como para pretender a la definición de un modelo de simulación muy preciso.

Los análisis de las diferentes variables seleccionadas, si no pueden asegurar ciertamente los modelos matemáticos referidos, constituyen unos elementos básicos de la metodología de estudio de variables de crecimiento en plantaciones coetáneas. Dentro del contexto, en el medio científico de la Facultad de Ciencias Forestales de Mérida, de recién apertura hacia la simulación de crecimiento en plantaciones, los aspectos metodológicos del pre-

sente trabajo pueden constituir la base de futuras investigaciones.

Otro tipo de interés debe sugerir este estudio en cuanto a la subexplotación de la información potencial que representan las parcelas permanentes de rendimiento de Teca en Caparo. Se ha de tomar en cuenta que la ausencia de datos en cualquier año es una pérdida irrecuperable de información y que si ciertos datos no parecen tener una utilidad inmediata, sin embargo, pueden ser requeridos posteriormente. Además, se requiere información de alta confiabilidad para los estudios de simulación de crecimiento. Así lo atestiguan los numerosos trabajos publicados. Cuando el volumen potencial de información es reducido, como en el caso presente, la buena calidad de las informaciones es primordial, por lo que es necesario, por otra parte, enfatizar sobre la cantidad de datos requeridos en la elaboración de un modelo de crecimiento en plantaciones destinadas al estudio de numerosas variables. La reciente introducción de la Teca en Venezuela limita "per se" todos los estudios de crecimiento por el momento. Esta situación, sin lugar a dudas, ha de mejorar en los años venideros.

Formularemos algunas recomendaciones específicas de estudios en base a la experiencia derivada de este trabajo.

- i) La escogencia de la altura mayor como variable de crecimiento en las parcelas de Teca no facilita la comparación con los datos procedentes de otras zonas del mundo.

La altura máxima (altura media de los 100 árboles de

mayor diámetro por ha) es generalmente adoptada para la Teca.

Keogh (1979) formuló esta recomendación para la zona Caribe-América Central. La fiabilidad de este concepto y la mayor facilidad de medición en relación a la altura mayor son partes relevantes para apoyar esta recomendación. Al escoger este concepto las discrepancias entre el índice de sitio para la altura y el área basal máxima del sitio deben disminuirse.

ii) Un estudio sobre la determinación de la posible relación entre la altura mayor (o máxima) y la densidad del vuelo es de interés en cuanto pueda mejorar la clasificación de sitio existente.

iii) El estudio de crecimiento de los árboles por categoría diamétrica después del aclareo puede ser una vía interesante para definir mejor la simulación del crecimiento del rodal. Lowe (1976) y Sarlin (1966) han constatado que la minoría de los árboles dominantes del vuelo contribuyen a un porcentaje importante del crecimiento del área basal y, por ende, del volumen.

iv) Los estudios de rendimiento volumétrico son de alta prioridad para evaluar la rentabilidad económica de las plantaciones de Teca en las condiciones locales. El recurrir a otras fuentes de información no es más un paliativo a esta situación de carencia de información.

v) El modelo de crecimiento de Richards-Chapman merece ser apli

cado a otros estudios. Su gran flexibilidad para el análisis de crecimiento del área basal, como de la altura o del volumen son argumentos en favor de su difusión a nivel local.

La finalidad más destacada de estas recomendaciones es señalar la necesidad de armonizar los diferentes estudios de crecimiento que se están llevando a cabo, a fin de obtener un conjunto de informaciones que permitan la elaboración de modelos de simulación de crecimiento cada vez más eficientes.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## REFERENCIAS

- Alder, D. 1977. A distance Independent Tree Model for Exotic Conifera Plantations in East Africa. *Forest Sc.* 25 (1): 59-71
- Ayangma, S. 1982. Ensayo de simulación del crecimiento del área basal y predicción del rendimiento en parcelas de plantaciones coetáneas de Teca de la Reserva de Caparo. (Informe final de la Materia de Plantación) (sin publicar). Mérida. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado; 16 p. + anexos
- Ayangma, S. 1983. Un modelo de simulación de manejo de plantaciones aplicado a las plantaciones de Teca (*Tectona grandis*) de la Reserva Forestal de Caparo. Ante proyecto de Tesis (sin publicar). Mérida. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Post-grado; 12 p. + anexos
- Ayangma, S. 1983. El uso del modelo de crecimiento de Chapman-Richards en la investigación forestal. Seminario, no tesis (sin publicar). Mérida. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado; 12 p. + anexos
- Ayangma, S. 1983. Modelo de crecimiento de Pimstein para plantaciones, modificado. Trabajo especial (sin publicar). Mérida. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado; 17 p. + anexos

- Bailey, R.L.; Dell, T.A. 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. *Forest Sc.* 19 (2): 97-102
- Bliss, C.I.; Reinker, K.A. 1964. A lognormal approach to diameter distribution in even-aged stands. *Forest Sc.* 10 (3): 350-360
- Begeve, D.J. 1972. Girth and basal area growth of Slash Pine and their significance to plantation management in Queensland. *Research per No.2. Queensland Department of Forestry*
- Buongiorno, J.; Teegarden, D.E. 1973. An economic model for selecting Douglas Fir reforestation projects. *Hilgardia* 42 (3): 35-120
- Clutter, J.L. 1963. Compatible growth and yield for Loblolly Pine. *Forest Sc.* 9 (3): 354-371
- Corpoandes-Universidad de los Andes. 1972. Informe No.2 de actividades del Programa de Investigación con fines de manejo de la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Mérida. Centro de Estudios Forestales de Postgrado
- Curtis, R.O. 1967. A method of estimation of gross yield of Douglas Fir. *Forest Sc. monog.* 13. 24 p.
- Chapman, D.G. 1961. Statistical problems in population dynamic. *Proc. Fourth Berkeley Symp. Math. Stat. and Prob.* Univ. Cal. Press. Berkeley and Los Angeles. 153-158
- Chapman, H.H. and Meyer, W.H. 1949. *Forest mesuration.* McGraw Hill Co. Inc. New York. 522 p.
- Dagnelie, P. and Rondeux, J. 1971. La repartition des arbres en catégories de grosseur: Déciles de Jed Linski et distributions Log-normales. *Ann.Sc. Forest.* 28 (3): 289-296
- Draper, N. R. and Smith, H. 1981. *Applied regression analysis.* II edition. John Wiley and sons. New York. 709 p.

Fisher, R. and Yates, F. 1957. Statistical tables for biological, agricultural and medical research. 5th Ed. Oliver and Boyd. Edimburgh.

Forest Research Institute. 1964. Yield and stand tables for plantation Teak. India Forest Records 9 (4): 151-216 + fig.

Hush, Miller and Biers 1972. Forest mensuration. The Ronald Press. New York. 410 p.

Kadambi, K. 1972. Silviculture and management of Teak. Stephen F. Austin State Univ. Nacogdoches. Texas. 137 p.

Keogh, R.M. 1977. Elaboración de una table de volumen y un estudio de incremento para Teca (*Tectona grandis*) en El Salvador. Proyecto Forestal FAO/ELS/72/004. Documento de trabajo No. 14 FAO, Roma. 50 p. + apéndices

Keogh, R.M. 1979. El futuro de la Teca en la América tropical. *Una Sylva* 31 (126): 13-19

Kimmins, J.P.; Scoullar, K.A. y Feller, M.C. 1981. Forcyte. An ecologically-based computer simulation model to evaluate the effect of intensive forest management on the productivity, economics and energy balance of forest Biomass production. British Columbia Univ. Vancouver. B.C. Canada. (Borrador multigráfico)

Lamb, A.F.A. 1957. Teak (Trinidad) in Trop. Silvicult. Vol II. FAO. Roma. 183-184

Lowe, R.G. 1976. Teak (*Tectona grandis*) Thinning experiment in Nigeria. *Commonw For. Rev.* 55 (3): 189-201

Luque, R. 1981. Clasificación preliminar de calidad de sitio para plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*) en la Unidad

- I de la Reserva Forestal de Caparo, Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado e Instituto de Silvicultura. 24 p.
- Miller, A.D. 1969. Provisional yield tables for Teak in Trinidad. Imprenta del Gobierno, Trinidad y Tobago. 21 p.
- Mitchell, K.J. 1969. Simulation of the growth of even-aged stand of white spruce. Yale Univ. 48 p.
- Möller, C.M.; Abell, J.; Jagd, T. and Juncker, F. 1954. Thinning problems and practices in Denmark. Compilation and Introduction by S.O. Heiberg. St.Coll. For Tech. Publ. 76. New York. 92 p.
- Nelson, T.C. 1964. Diameter distribution and growth of Loblolly Pine. Forest Sc. 10(1): 105-114
- Organick E.T. 1972. Fortran IV. Fondo Educativo Interamericano S.A. Versión española de la obra "A Fortran IV primer". Adison Wesley Publishing Co. USA. 278 p.
- Pienaar, L.V.; Turnbull, K.J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's Growth Model for basal area growth and yield in even-aged stands. Forest Sc. 19 (1): 2-22
- Pienaar, L.V. 1977. An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. Forest Sc. 23 (2): 223-232
- Pimstein, R.C. 1978. Un modelo de crecimiento en plantaciones. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida. 93 p. + anexos
- Prodan, M. 1965. Holzmesslehr. Saverländer. Francfort. 644 p.
- Rawat, A.S. and Franz, F. 1973. Detailed non linear asymptotic

- regression studies on tree and stand growth with particular reference to Forest Yield Research in Bavaria (Fed. Rep. of Germany) and India. Proc. IUFRO Conference (54-01) Nancy, France: 180-221
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. Jour. Exp. Bot. 10(29): 290-300
- Rose, D.W.; Leary, R.A. and Chen, C.M. 1981. Maximum cubic volume production through easily derived optimum thinning schedules. Jour. of For. 45 (2): 32-35
- Sagreiya, K.P. 1955. Single stem silviculture. Indian Forester. Dehra Dun: 753-771
- Sagreiya, K.P. 1962. A statistical approach to models for yield tables in even-aged Teak forest and some applications. Indian Forester, Dehra Dun: 896-905
- Saldarriaga, J.G. 1979. Estudio del sistema radicular de cuatro especies plantadas en la selva decidua de banco en la Reserva Forestal de Caparo. Venezuela. Tesis M.Sc. Mérida. Universidad de los Andes. Fac. de Ciencias For. Centro de Est. For. de Postgrado. 119 p.
- Sarlin, P. 1966. La première éclaircie dans des plantations de Teck. Bois et Forest des Trop. 108: 5-20
- Shönau, A.P.G. 1975. Effect of site quality and initial stocking density on average diameter in Black Wattle Plantations in Kenya. Forest Sc. 21(1): 2-9
- Shreuder, H.T.; Hafley, W.L. and Bennett, F.A. 1979. Yield prediction for unthinned natural Slash Pine stands. Forest Sc. 25 (1): 25-30

- Silva, R. 1971. Metodología para la investigación en parcelas permanentes de aclareo y rendimiento en plantaciones forestales. Boletín de Instituto Forestal Latinoamericano No. 38: 59-89
- Snedecor, G.W. and Cochran, W.G. 1978. Statistical Methods. 6th. edit. Iowa State Univ. Ames. Iowa. 593 p.
- Staebler, G.R. 1960. Theoretical derivation of numerical thinning schedules for Douglas-Fir. Forest. Sc. 6 (2): 99-105
- Stevens, W.L. 1951. Asimptotic regression. Biometric: 247-267
- Tobar, A. 1975. Estudio preliminar de calidad de sitio para las plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.f.) en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Programa de Investigaciones Forestales con fines de manejo en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Informe No. 5, Tomo II. Mérida, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales: 230-256
- Torres, L.A.; Ogaya, N. y Quintero, A. 1976. Metodología de establecimiento y evaluación de parcelas permanentes de rendimiento en plantaciones forestales. In. II Seminario Nacional de Plantaciones Forestales. Informe final. Tomo I: 1-37.
- Torres, L.A. 1982. Influencia del sitio y la espesura en el crecimiento de plantaciones experimentales de Teca (*Tectona grandis*) en Caparo. Venezuela. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Inst. de Silv. 65 p.
- Van Laar, A. 1978. The growth of unthinned *Pinus patula* in relation to spacing. South Afric.For.Jour. 107: 3-11
- Vincent, L.W. 1980. El enfoque de simulación en la formación y pruebas alternativas de reglmenes de aclareo en el manejo de

plantaciones con fines de producción. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida. 18 p.

Vincent, L.W.; Luque, R. 1980. Informe técnico sobre el proyecto de aclareo a realizar en las plantaciones experimentales de Teca, en la Unidad I de Caparo. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida. 15 p.

Vincent, L.W. 1983. Anteproyecto para la creación de un grupo de trabajo sobre la elaboración, calibrado y prueba de modelos de simulación de rendimiento en Plantaciones Forestales con fines de producción. Mérida. Univ. de los Andes. Fac. de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. (sin publicar) 6 p.

Von Bertalanffy, L. 1951. Theoretische Biologie. Franke, Bern. 403 p.

Von Wülfing. 1933. General volume tables for Teak and some applications to grown Teak plantations. Buitenzorg. 329 p.

Yang, R.C.; Kozak, A. and Smith, H.G. 1978. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves. Can Jour. For. Res. 80. 424-431

Burroughs Corp. 1980. Basis System. User's manual. Detroit, Michigan. USA

Burroughs Corp. 1981. Fortran 77. Compiler reference document. Detroit, Michigan. USA

Burroughs Corp. 1981. Work flow language. Reference manual. Detroit, Michigan. USA