

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO**  
**FACULTAD DE FORESTAL Y AGRONOMÍA**  
**DEPARTAMENTO FORESTAL**

**MODELO INTEGRAL DE CRECIMIENTO, PERFIL DEL FUSTE, GROSOR  
DE CORTEZA Y ESTUDIO DE LA MICRODENSIDAD DE LA MADERA  
PARA *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. ESTUDIO DE  
CASO EFI MACURIJE.**

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias  
Forestales**

**Héctor Barrero Medel**

**Pinar del Río**

**2010**

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO**  
**FACULTAD DE FORESTAL Y AGRONOMÍA**  
**DEPARTAMENTO FORESTAL**

**MODELO INTEGRAL DE CRECIMIENTO, PERFIL DEL FUSTE, GROSOR DE  
CORTEZA Y ESTUDIO DE LA MICRODENSIDAD DE LA MADERA PARA  
*Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. ESTUDIO DE CASO  
EFI MACURIJE.**

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias  
Forestales**

**Autor: Prof. Ast. Ing. Héctor Barrero Medel, MSc.**

**Tutor: Prof. Tit., Ing. Daniel Álvarez Lazo, Dr. C.**

**Tutor: Prof. Tit., Ing. Edilio Aldana Pereira, Dr. C.**

**Pinar del Río, 2010**

**“Año 52 de la Revolución”**

*A Fabián Barrero Alonso*

*mi pequeño*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a:

Mi esposa Yatsunaris Alonso Torrens por su comprensión y apoyo en la realización de este trabajo.

Mis padres Héctor Barrero Castro y Leonor Medel Suárez y a toda mi familia por haberme educado y guiado por el camino correcto para convertirme en lo que soy.

Mis tutores y asesores de tesis: Dr.C Daniel Álvarez Lazo, Dr.C Edilio Aldana Pereira, Dr.C Gerard Nepveu y Dr.C Frederic Mothe, por haber depositado su confianza en mí para la realización de este trabajo.

La Empresa Forestal Integral Macurije por permitir tomarla como caso de estudio y por toda la ayuda prestada de sus trabajadores y amigos en especial: Mario Puentes Gómez y José Luis Romero Armas (Lara).

Mi familia de Pinar en especial a Hortensia Torrens Pérez por su ayuda en cada momento de la realización de este trabajo.

Mis profesores de la carrera forestal, actualmente compañeros y amigos.

Todos los estudiantes que participaron en cada etapa de la investigación: Joise Cleto, Nelson Alonso, Reinier Cairo, Osmani Rodríguez y Mariel Guera.

Mi amigo Yudemir Cruz Pérez por su ayuda en cada momento que lo necesité.

El departamento de Matemática por su valiosa ayuda en especial la de la profesora MSc. Madelen Garofalo.

La dirección de la Facultad de Forestal y Agronomía.

La revolución Cubana y a Fidel.

## SÍNTESIS

La tesis que se presenta tuvo como fin diseñar un modelo de simulación integral del crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y de densidad de la madera para el *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. Para lo cual se establecieron parcelas permanentes y temporales, de las que se extrajeron los datos necesarios para el análisis, dendrométrico, dasométrico y de la densidad de la madera, los que se procesaron y sometieron a pruebas estadísticas utilizando el paquete SPSS 15.0 versión 15.02 para Windows, tomándose para ello como caso de estudio la Empresa Forestal Integral Macurije. De todo lo anterior se obtuvo que los múltiples aspectos de la modelación del crecimiento, aplicados a las condiciones de Cuba, han sido poco tratados, observándose una lenta evolución de las herramientas que provee esta ciencia a la práctica productiva. La evaluación del turno de corte para la especie en las condiciones de sitio donde se distribuyen las plantaciones indica que el manejo forestal implementado y el comportamiento medio del volumen favorecen la cortabilidad física de 30 a 35 años de edad.

Por otro lado, el sistema de curvas de índices de sitio permitió diferenciar las plantaciones en seis calidades determinadas por el valor de la altura dominante, variable utilizada para la obtención de los modelos de crecimiento.

## ÍNDICE

CONTENIDO	Pág
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO. I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	
1.1 Modelos de simulación forestal.....	7
1.1.1 Modelos de crecimiento y tablas de rendimiento.....	8
1.1.2 Utilidades de las funciones de crecimiento en el campo forestal.....	10
1.1.3 Características deseables de una función de crecimiento.....	11
1.2 Antecedentes de la modelación del crecimiento en Cuba.....	12
1.3 Sitio y productividad.....	15
1.3.1 Métodos para la obtención del índice de sitio.....	17
1.4 Modelos del perfil del fuste.....	20
1.5 Modelos del grosor de corteza.....	25
1.6 Densidad de la madera.....	26
1.6.1 Variación intra y inter-árbol de la densidad de la madera.....	28
1.6.2 Modelación de la densidad de la madera.....	34
<b>CAPÍTULO. II MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
2.1 Características generales del territorio de la EFI Macurije.....	36
2.1.1 Características de las plantaciones de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>caribaea</i> Barret y Golfari.....	40
2.2 Procedimiento para la modelación del crecimiento de la masa en <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>caribaea</i> Barret y Golfari.....	41
2.3 Procedimiento para la determinación del Turno de corta.....	47

2.4	Metodología para la modelación del perfil del fuste y grosor de corteza.....	49
2.5	Procedimiento para el estudio de la microdensidad de la madera.....	53
	<b>CAPÍTULO. III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	56
3.1	Turno de corta para <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>caribaea</i> Barret y Golfari.....	55
3.2	Modelo de crecimiento de masa.....	64
3.3	Ecuación del perfil del fuste y grosor de corteza.....	81
3.4	Variación intra e inter árbol de la microdensidad de la madera.....	88
3.5	Modelo OPTIPC para <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>caribaea</i> Barret y Golfari.....	92
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	99
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	102
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

# **INTRODUCCIÓN**



## **INTRODUCCIÓN**

La crisis ambiental en la que actualmente se encuentra la humanidad, proviene por un lado, del desconocimiento de una parte de la realidad, y por otro, del manejo que de esta incompleta realidad hace el hombre basándose sólo en intereses puestos a corto plazo. Por lo que se hace evidente la necesidad de introducir nuevos paradigmas a mediano y a largo plazo, fundamentalmente de carácter ambiental.

La humanidad atraviesa un momento decisivo en su desarrollo. Nunca antes los ecosistemas del planeta se han visto tan afectados. Vastas áreas de los bosques del mundo, que han servido de sustento y progreso de la humanidad, han sido objeto de una grave degradación. Al tiempo que siguen existiendo áreas importantes de bosques productivos, también se vislumbra una conciencia general de que los recursos naturales no son infinitos, y de que su utilización juiciosa y sostenible es necesaria para nuestra sobrevivencia (FAO, 2002).

La creciente demanda de recursos forestales, como consecuencia del aumento del nivel de vida, exige día a día un incremento de la producción de madera y derivados del bosque. Esto, unido a su creciente utilización como medio de esparcimiento, al importante papel protector que la cubierta vegetal tiene contra la erosión, y a su función en la conservación de los ecosistemas, exige el desarrollo de normas de actuación y de tecnologías que faciliten la gestión de estos recursos y que, al mismo tiempo, optimicen su uso y aprovechamiento integral.

Sólo es posible un cambio si se modifica la mentalidad de los decisores y gestores a cargo del proceso de producción forestal que permita una nueva visión, y que estos no sigan ceñidos a planes de producción carentes de la evaluación de las potencialidades de los bosques.

La utilización de modelos matemáticos capaces de predecir los efectos de los tratamientos silvícolas, especialmente en los bosques de producción con manejo intensivo, resultan herramientas de gran utilidad para satisfacer las necesidades de evaluación de dichas potencialidades, convirtiéndose en referentes para la toma de decisiones.

El desarrollo de modelos que permitan la estimación de valores de la existencia de una masa forestal, es vital para su manejo. Si a esto se une el creciente interés por la planificación de la gestión de las masas forestales y por su ordenación, aumenta la importancia de los modelos. Su utilidad para la gestión forestal puede justificarse por dos razones fundamentales: permiten predecir el rendimiento y consecuentemente hacer más eficaz la cosecha del bosque, además de evaluar los regímenes y los tratamientos alternativos para controlar los rendimientos.

Si a ello se integran modelos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera, entonces se podrán fijar los objetivos de producción en términos de manejo, esto posibilitaría la eficiencia de ciertas propiedades de acuerdo a las necesidades industriales, y a la disminución dentro de ciertos límites de la heterogeneidad de la materia prima. Sin la ayuda de estos instrumentos es difícil desarrollar planes de manejo forestal, bajo criterios de sustentabilidad (Valdez, 2000).

En este contexto, aun cuando Cuba es uno de los pocos países con una tasa positiva de reforestación y de deforestación, resultado de una acertada política seguida por la dirección del país desde 1959, uno de los grandes problemas del sector forestal radica precisamente en que el proceso de planificación del manejo y la toma de decisiones no consideran modelos o tablas de producción para las principales especies forestales.

A lo largo de los años, la Universidad de Pinar del Río y el Instituto de Investigaciones Forestales de Cuba han contribuido a generalizar todos los resultados al sector productivo; pero el uso de modelos y tablas, en la mayoría de los casos, no se han llevado a la práctica.

En el caso del *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari por su papel en los planes de reforestación del país fundamentalmente de la región occidental y central, para lograr un manejo más efectivo del mismo, se hace necesario la obtención de un modelo, con vista a hacer más eficaz su aprovechamiento.

Sobre la base de los argumentos expuestos se tomó como caso de estudio la Empresa Forestal Integral (EFI) Macurije perteneciente a la provincia de Pinar del Río, Cuba y a partir de los resultados obtenidos, se podrá generalizar el uso de los modelos matemáticos para el crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y densidad de la madera, al sistema empresarial forestal que contengan en su patrimonio la especie estudiada. El diseño metodológico seguido para el desarrollo de este trabajo se presenta a continuación:

### **Problema científico de la investigación**

Las herramientas que simulan el crecimiento de las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, generan bajos niveles de

eficiencia en el proceso de toma de decisiones para la planificación del manejo y aprovechamiento de los bosques plantados en la EFI Macurije.

### **Hipótesis**

Es posible la obtención de un modelo integral de crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y densidad de la madera, que contribuya al mejoramiento de la eficiencia en el proceso de toma de decisiones en la planificación del manejo y aprovechamiento de las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la EFI Macurije.

### **Objeto**

La modelación del crecimiento de la masa, perfil del fuste, grosor de corteza y estudio de la microdensidad de la madera del árbol.

### **Objetivo general**

Diseñar un modelo de simulación integral del crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y de densidad de la madera para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

### **Objetivos específicos**

1. Analizar el desarrollo de la modelación del crecimiento en el ámbito de las ciencias epidométricas en Cuba.
2. Evaluar el turno de corta para las condiciones de sitio de las plantaciones donde se distribuye la especie en la empresa.
3. Modelar el crecimiento de la masa, el perfil del fuste para el diámetro con corteza y el diámetro sin corteza y el grosor de corteza.
4. Analizar la variabilidad intra árbol para la densidad de la madera.

### **Novedad científica**

Se fundamenta teóricamente la existencia de una lenta evolución de las herramientas que provee la rama de la modelación del crecimiento a la disciplina de la Ordenación de Montes en las Ciencias Forestales aplicadas en la práctica productiva cubana; por lo que el estudio a profundidad del crecimiento y rendimiento en plantación de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari generó un sistema integral que incluye el perfil del fuste y el grosor de corteza con un estudio preliminar de la microdensidad como característica física de la madera que contribuye al mejoramiento de la eficiencia en su manejo.

### **Aporte teórico**

Se basa en la concepción de un sistema integral que hacen más eficiente el manejo de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, fundamentada teóricamente por la existencia de una lenta evolución de las herramientas que provee la rama de la modelación del crecimiento a la disciplina de la Ordenación de Montes desarrollada en el marco de la práctica forestal en Cuba.

### **Aporte metodológico**

La integración de modelos de crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y un estudio preliminar de la microdensidad de la madera dentro del procedimiento de evaluación y monitoreo de las características epidométricas de la especie como base para el proceso de toma de decisiones en el manejo y aprovechamiento forestal dentro de las empresas con patrimonio ocupado por *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

### **Aporte práctico**

Está dado por la propuesta de un turno de corta para las plantaciones de la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, tomando como caso de estudio la EFI Macurije. De igual modo se presenta “**OPTIPC**” como herramienta para manejar el modelo integral de crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y densidad de la madera para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari desarrollado en esta investigación.

# **CAPÍTULO I**

## **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Modelos de simulación forestal.

Un modelo es una forma de caracterizar un sistema o parte de un sistema. Es una abstracción y simplificación de un proceso natural que permite su estudio y análisis.

El modelo puede estar constituido por uno o varios gráficos, una o más tablas, una o múltiples ecuaciones, o más subsistemas.

Antes del advenimiento de la computación los investigadores tuvieron serias limitaciones para la formulación de modelos complejos, por lo que tuvieron que simplificarlos al máximo, para producir herramientas de utilidad práctica (Prodan *et al.*, 1997).

Con el progreso de la computación se hace más fácil manejar modelos cada vez más complejos, y de hecho, el uso de modelos a escala en ingeniería ha ido disminuyendo, reemplazados por modelos matemáticos que son más baratos y más flexibles. Los computadores han llegado a ser indispensables como herramientas para el desarrollo y uso de muchos modelos (García, 2010).

Durante casi dos siglos, las curvas de volumen-edad, curvas de altura-edad, y tablas de volumen han sido la base con la cual los gestores han predicho los rendimientos futuros de los bosques. Los modelos de simulación de bosques o crecimiento son muy útiles para los gestores e investigadores forestales en muchos sentidos (Blanco, 2008).

Un modelo de crecimiento forestal pretende describir la dinámica del bosque de una forma suficientemente aproximada y precisa para los intereses del selvicultor o del investigador forestal. La dinámica incluye todos los procesos



de cambio en los que se desarrolla la vida del bosque y sus elementos fundamentales: los árboles. Los cambios más relevantes en el ámbito forestal son los que se refieren a la incorporación, crecimiento y muerte de los árboles. Los modelos suelen utilizarse para conseguir predicciones de la producción de madera, o menos frecuentemente de otros productos forestales no maderables. Contribuyen además a predecir los efectos que va a tener a largo plazo una intervención silvícola, en lo referente a la producción de madera y a las características que tendrá el propio bosque. Para los investigadores forestales, los modelos prestan su máxima utilidad al servir de herramientas para investigar acerca de la dinámica forestal (Abellanas *et al.*, 2009).

#### **1.1.1 Modelos de crecimiento y tablas de rendimiento.**

Los modelos y tablas de rendimiento se derivan de relaciones estocásticas entre las variables dependientes (altura, área basal, número de árboles, volumen) y un conjunto de variables independientes predictoras del estado de un rodal, como por ejemplo la edad y el índice de sitio (Prodan *et al.*, 1997).

La necesidad de contar con modelos de crecimiento radica, desde el punto de vista de la planificación de la producción, en que el manejo y el aprovechamiento eficiente de cualquier bosque requieren de la toma de decisiones racionales. Tales decisiones sólo pueden adoptarse si la respuesta de los bosques a estas operaciones pueden cuantificarse (FAO, 1980).

Curtis (1972) señala que el modelo de crecimiento y rendimiento debe proporcionar estimaciones del desarrollo y su rendimiento potencial para cualquier régimen de intervenciones factibles.

Los modelos de crecimiento y de rendimiento han evolucionado mucho desde que Paulsen en el siglo XVIII elaborara las primeras tablas de rendimiento con

ajuste gráfico. La evolución y secuencia natural que han seguido estos modelos es la siguiente (Prodan *et al.*, 1997):

- Tablas de rendimiento normales
- Tablas de rendimiento empíricas
- Tablas de rendimiento de densidad variable
- Modelos de rodal agregados
- Modelos de rodal con proyección de la tabla de rodal
- Modelos de árbol individual independientes de la distancia
- Modelos de árbol individual dependientes de la distancia

El modelo de crecimiento de masa empleado en esta tesis, como su nombre lo indica se caracteriza por estimar las principales variables dasométricas o del rodal completo. Las tablas de producción se incluyen dentro de este tipo de modelos matemáticos, las que han mejorado su flexibilidad y simulación de los distintos manejos silvícolas con numerosos ejemplos como los modelos desarrollados por: (Ferguson, 1979; Lemoine, 1980; Verburg y Johnson, 2001; Blanco *et al.*, 2007; Abellanas *et al.*, 2009).

Las principales ventajas de estos modelos radican precisamente en la poca información para simular el crecimiento de la masa y dar una aproximación del volumen futuro, por lo que son los modelos más sencillos, y a su vez los más robustos, porque ofrecen generalmente buenas estimaciones dasométricas. (Meredieu, 1998; Andenmatten y Letourneau, 2010).

A manera de resumen, los modelos de masa constituyen una herramienta silvícola, mediante la cual se puede caracterizar el comportamiento de las poblaciones por razón de la simulación, ejemplo de ello son los modelos establecidos en Cuba para *Pinus tropicalis* Morelet por De Nacimiento (1979)

y Padilla (1999), para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari por García (1983) y Gra *et al.*, (1990), para *Casuarina equisetifolia* Forst por Báez (1988), para *Eucalyptus sp* por Peñalver (1991) y en *Hibiscus elatus* Sw por Zaldívar (2000).

Estos trabajos han tenido como característica, que la modelación se basó en el supuesto esencial de que las masas tenían rendimientos normales o empíricos y utilizaron, como el caso de los trabajos de De Nacimiento (1979), Báez (1988) y Gra *et al.*, (1990), el método gráfico para la construcción de las curvas de índice de sitio. Por el contrario García (1983); Peñalver (1991); Padilla (1999) y Zaldívar (2000) obtuvieron las curvas a partir del ajuste por análisis de regresión; con el método de regresión jerárquica. La ecuación de Schumacher fue la que se ajustó al comportamiento de las especies estudiadas en estos casos.

### **1.1.2 Utilidades de las funciones de crecimiento en el campo forestal.**

Alder (1980); Madrigal (1991); Prodan *et al.*, (1997) y Blanco *et al.*, (2005) coinciden en las múltiples aplicaciones de las funciones de crecimiento dentro del ámbito forestal, las cuales se resumen a continuación:

1. En primer lugar y como es lógico, la primera y más simple aplicación es el propio conocimiento de cualquiera de las variables del árbol o la masa habitualmente estudiadas, tales como: diámetros, áreas basimétricas, alturas, volúmenes.
2. El estudio de la evolución con el tiempo de las alturas dominantes de una masa forestal se utiliza para construir las curvas de calidad de la estación, que permiten estimar y clasificar de forma sencilla la productividad de una determinada especie en un área geográfica determinada.

3. Las curvas de calidad son un paso previo e imprescindible para la elaboración de cualquier tipo de tablas de producción, que describen la evolución con la edad de todas las variables de una masa forestal. Además, para la construcción de los modelos más completos (las tablas de producción dinámicas), resulta necesario el ajuste de las ecuaciones de incremento de ciertas variables como el área basimétricas o el volumen.
4. Otra de las aplicaciones de las funciones de crecimiento, es la posibilidad de calcular los valores máximos de los crecimientos medio y corriente de diferentes variables. En el caso del volumen de la masa, dichos valores permiten determinar el turno de máxima renta en especie.
5. Mediante las funciones de crecimiento también es posible determinar las edades a las que se alcanzan los turnos financieros, tecnológicos y físicos de las masas forestales.
6. La posibilidad de la estimación en bosques y su simplificación cuando se conocen las funciones que rigen el crecimiento en volumen de sus masas.
7. Los modelos de crecimiento y sus primeras derivadas se pueden utilizar para caracterizar las funciones de distribución y de densidad de probabilidad de variables dendrométricas como diámetros, alturas, secciones o volúmenes, tanto en masas regulares (cuando la primera derivada describe una curva unimodal), como en irregulares (cuando la primera derivada adopta, en algún intervalo, la forma de una J invertida).

### **1.1.3 Características deseables de una función de crecimiento.**

La evolución de las variables de un árbol o de una masa a lo largo del tiempo sigue un patrón definido y estable conocido como curva sigmoide, cuyas características principales son la presencia de un punto de inflexión, que se

corresponde con el máximo crecimiento corriente de dicha variable, y una asíntota, que representa el tamaño máximo que puede alcanzar la variable (Prodan *et al.*, 1997; Kimmins *et al.*, 1999; Blanco, 2008; García, 2010).

Además de estos dos atributos de las funciones de crecimiento, existen otra serie de características que son deseables en cualquier modelo de este tipo. Así, Goelz y Burk (1992) describen las características que deben cumplir los modelos empleados para construir curvas de calidad de estación, algunas de las cuales pueden generalizarse a todos los modelos de crecimiento; las principales son las siguientes:

1. Existencia de un punto de inflexión.
2. Existencia de una asíntota horizontal.
3. Comportamiento lógico: Los modelos no deben permitir valores anormales desde el punto de vista biológico por ejemplo: la curva de la altura debe pasar por el origen, o el diámetro debe ser igual a cero, a la edad en la que el árbol alcanza la altura de 1,30 metros.
4. Base biológica: la forma de la ecuación debe derivarse del conocimiento teórico que se tenga del crecimiento de la variable dependiente analizada.

## **1.2 Antecedentes de la modelación del crecimiento en Cuba.**

El primer trabajo conocido sobre modelación del crecimiento en Cuba fue realizado por Löschau (1974), citado por Bobkó y Aldana (1981) precisamente para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari con una tabla preliminar sin carácter oficial. La primera tabla de producción con carácter oficial fue publicada por De Nacimiento (1979) en la revista Baracoa para la especie *Pinus tropicalis* Morelet en la revista forestal Baracoa, fecha que se considera como el inicio del desarrollo de la modelación del crecimiento en

Cuba. La capacitación brindada por el campo socialista y el establecimiento de la red de estaciones experimentales donde fueron instaladas las parcelas permanentes, impulsó en esta etapa, esta área de la Epidometría. A continuación De Nacimiento *et al.*, (1983) publicaron las primeras tablas preliminares de rendimiento para *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la provincia de Pinar del Río utilizando el patrimonio de plantaciones de la especie de las localidades de Consolación del Sur, Guane y Pinar del Río.

En esta etapa fueron múltiples los investigadores que incursaron en esta área, dentro de los que se destacan: García, (1983) con la contribución para el establecimiento de tablas de rendimiento preliminares de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la provincia de Pinar del Río, el trabajo realizado por Gra y colaboradores a finales de la década de los 80 quienes establecieron una tabla a nivel nacional teniendo como localidades de estudio a Pinar del Río, Matanzas, Villa Clara y Topes de Collantes; los trabajos de Báez (1988) con la *Casuarina equisetifolia* Forst, en suelos cenagosos de la provincia de La Habana.

En la década de los 90 se encuentran los realizados en *Eucalyptus* sp por Peñalver (1991); y Padilla (1999) para plantaciones de *Pinus tropicalis* Morelet ambos en la provincia de Pinar del Río.

Al inicio de la década del 2000 las tablas dasométricas para plantaciones de *Hibiscus elatus* Sw elaboradas por Zaldívar (2000) también en esta provincia.

Todos estos trabajos fueron efectuados antes del denominado período especial; a partir de esta fecha con el recrudecimiento del mismo, la construcción de modelos de crecimiento no escaparon al torrente de afectaciones, limitando la continuación de los trabajos con otras especies

como: *Pinus maestrensis*, *Pinus cubensis*, *Tectona grandis*, *Gmelina sp.*, y *Cordia gerascanthus*, que la política del país había establecido como prioridad en los planes de reforestación y tan necesarios para su posterior manejo.

Aún así se continuaron haciendo trabajos por parte de la Universidad de Pinar del Río, entre los que se encuentran: las tablas realizadas en la Empresa Forestal Integral Macurijes por García *et al.*, (2004); las tablas para *Tectona grandis* para plantaciones de la Empresa Forestal Integral Bayamo-Manzanillo por Fidalgo y García (2005), entre otros.

El autor considera que dos de las dificultades de índole objetivo que han limitado en Cuba el desarrollo de esta área de la Epidometría Forestal han sido la carencia de recursos y la inexistencia de una red de parcelas permanentes.

En este contexto, la motivación de los investigadores de la rama hacia este tema, se ha restringido a las tablas de producción de especies forestales con mayor participación en los planes nacionales, de forma tal que múltiples aspectos de esta área del conocimiento, aplicados a las condiciones de Cuba, han sido poco tratados como es el caso de la modelación a nivel del árbol individual y de bosques naturales, aún cuando el 63% (Linares *et al.*, 2008) de la superficie cubierta de bosques pertenece a esta clasificación. Todo lo cual denota lenta evolución de las herramientas que provee esta ciencia a la práctica productiva.

A manera de resumen, en Cuba se puede decir que esta área de la ciencia de la dasonomía ha transitado por diferentes etapas en su desarrollo, los cuales han estado acorde a la situación económica existente en el país, aportando desde el punto de vista teórico – metodológico múltiples modelos. La existencia

de una red de parcelas permanentes ayudaría al logro de un estadio superior en el desarrollo de esta ciencia.

### **1.3 Sitio y productividad.**

La primera fase de un estudio de crecimiento y rendimiento es la elaboración de un sistema para la clasificación de la productividad de los sitios forestales los cuales constituyen el conjunto de factores edáficos y bióticos que determinan la permanencia y la productividad de la biomasa de determinada comunidad forestal, sea esta natural o creada por el hombre (Álvarez y Varona, 1988).

Dos elementos básicos determinan el rendimiento y crecimiento de los rodales:

- La capacidad productiva del sitio (productividad).
- El aprovechamiento que hace el rodal de la potencialidad del sitio.

La calidad del sitio se define como la capacidad de un área determinada para el crecimiento de árboles. Es la respuesta, en el desarrollo de una determinada especie, a la totalidad de las condiciones ambientales (edáficas, climáticas y bióticas) existentes en un determinado lugar. Su conocimiento resulta fundamental en la ingeniería forestal para elegir los mejores sitios para plantar la especie apropiada en el lugar adecuado y para cambiar sus características.

La productividad es un concepto biológico y no puede expresarse matemáticamente. Por ello, se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un índice denominado índice de sitio o índice de productividad, ambos muy populares porque son una expresión cuantitativa de la calidad de sitio (Prodan *et al.*, 1997).

La investigación sobre los valores de crecimiento y rendimiento requiere de una adecuada clasificación de los sitios, la evaluación de la calidad de sitio va a



tener como objetivo la estimación de la potencialidad productiva de un medio concreto frente a una especie forestal determinada (Gandow *et al.*, 2001).

Para determinar la calidad de sitio hay que tener en cuenta las edades de los distintos rodales, los cuales están en registros administrativos, y además la altura dominante, la que se puede obtener mediante el empleo de hipsómetros u otros instrumentos (Bobko y Aldana, 1981).

En Cuba las primeras referencias de las curvas de índice de sitio encontradas en la literatura son realizadas por Thomasius (1974) para la clasificación de sitios en los pinares de Cajalbana; los realizados por Aldana (1983) y Báez y Gra (1988) para los bosques de Cuba en base a la humedad y fertilidad de los suelos.

En la actualidad en Cuba solo existe una clasificación del sitio como norma para las cuatro especies de pinos existentes definida por el Instituto Nacional de Desarrollo Forestal desde 1997, en función de la altura media y la edad. Este trabajo presenta el inconveniente de abarcar una gran variedad de sitios muy diferentes a lo largo y ancho del país, además de no haber considerado que estas especies tienen diferentes hábitos de vida, así como, distintos crecimientos y desarrollos a una misma edad. Por lo que esos resultados no se ajustan a la realidad en determinados lugares (García, 2004).

A nivel de región García (1983) clasificó cinco calidades de sitio para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* para la provincia de Pinar del Río, por su parte Gra *et al.*, (1990) definen para las localidades de Pinar del Río, Matanzas, Villa Clara y Topes de Collantes nueve calidades de sitio, siendo el indicador del índice de sitio la altura dominante por los valores 10, 13, 16, 18, 22, 25, 28, 31 y 34 m; Padilla (1999) determinó para las plantaciones de *Pinus tropicalis*

Morelet nueve calidades de sitios, también utilizó como el indicador del índice de sitio la altura dominante por los valores 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 m. Mientras que para otras especies también localmente Báez (1988) definió tres clases de sitio para la *Casuarina equisetifolia* Forst, para las zonas costeras del sur de la provincia La Habana; Peñalver (1991) diferencia las plantaciones de *Eucalyptus sp* en seis calidades de sitios siendo el indicador del índice de sitio la altura dominante por los valores 15, 18, 21, 24, 27 y 30 m; Zaldívar (2000) obtuvo cinco índices de sitio para *Hibiscus elatus* Sw. empleó como indicador del índice de sitio la altura dominante por los valores: 13, 16, 19, 21 y 24 m.

### **1.3.1 Métodos para la obtención del índice de sitio.**

La construcción de modelos de curvas de índices de sitio puede obtenerse de forma gráfica o mediante un análisis de regresión (Alder, 1980).

Según Prodan *et al.*, (1997) dentro de los métodos que emplean la regresión se encuentran:

- Método de la curva guía.
- Método de la regresión anidada.
- Método de la ecuación de diferencia o de diferencia algebraica.
- Métodos de construcción de curvas polimórficas.

Estos métodos se basan para su utilización en dos principios: el anamórfico (de formas iguales o análogas, también isomórficas o proporcionales) y el polimórfico. Las anamórficas se construyen suponiendo que la relación altura-edad para los diferentes sitios tienen una tendencia constante, lo que se expresa también en una proporcionalidad invariable. Vale decir que, la altura de un rodal en una cierta clase de sitio sería una proporción inmutable de la altura

correspondiente a otra clase de sitio o independientemente de la edad. Las polimórficas por su parte consideran de que no existe tal proporcionalidad y que la forma de las curvas depende de las particulares relaciones altura-edad observada en las diferentes clases de sitio (Clutter *et al.*, 1983; Prodan *et al.*, 1997; Torres, 2001).

Desde el inicio del uso de los índices de sitio se generó una polémica entre el uso de curvas anamórficas y polimórficas; hasta la fecha nadie puede argumentar sobre la superioridad real de algunas de ellas, dado que su uso prácticamente depende de la especie en cuestión (Torres, 2001) detectándose que algunas ventajas de un tipo de curva se convierten en desventajas para otro tipo y viceversa. Se ha planteado la hipótesis de que la integración de variaciones tanto de forma como en escala de las curvas, podría dar por resultado un tipo de curva que mezcle las ventajas de ambas. Así, se ha señalado que las curvas anamórficas asemejan el comportamiento teórico esperado de las curvas de índice de sitios; sin embargo, en años recientes se ha descubierto que varias especies presentan el tipo de curvas polimórficas en su relación edad-altura. Considerando esta nueva variante, Torres (2001) propone la construcción de curvas compuestas, es decir, curvas anapolimórficas y polianamórficas. Tiene parámetros de forma y escala variables, que integran propiedades de ambos tipos: anamórficas y polimórficas con la intención de mejorar las predicciones de alturas del rodal en relación a la productividad forestal (Rodríguez y Arteaga, 2005).

La evaluación de la calidad de sitio según Prodan y colaboradores (1997) puede realizarse de dos formas: por métodos directos e indirectos:

**Métodos de evaluación directos**

- Determinación de volumen o altura del rodal. Es difícil de interpretar, salvo que el rodal se encuentre cercano a una edad clave o de rotación utilizada como comparación.
- Registro histórico de desarrollo y rendimiento, cada vez es más frecuente que las empresas conserven toda la información de inventarios sucesivos y también de las cosechas de los rodales, estos datos están desprovistos de todo supuesto y su error es reducido.
- Interpretación, basada en la medición de longitudes internodales de un cierto número de años de crecimiento después de que el árbol haya alcanzado 1,30 m de altura; algunos autores recomiendan 2 y 3 m.
- Análisis fitosociológico y fisionómico de la vegetación presente en el área.

**Métodos de evaluación indirectos**

- Estos métodos conducen a la obtención de índices de sitio o productividad a través de análisis de regresión en tres formas diferentes.
- Medición de uno o más factores del medio que se consideran como íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles.
- Determinación de características propias de los árboles o del rodal considerado sensible a la calidad de sitio.
- Una combinación de los anteriores.

Los indicadores de índices de sitios se clasifican (figura 2) según (Hagglund, 1981 citado por Meredieu, 1998).

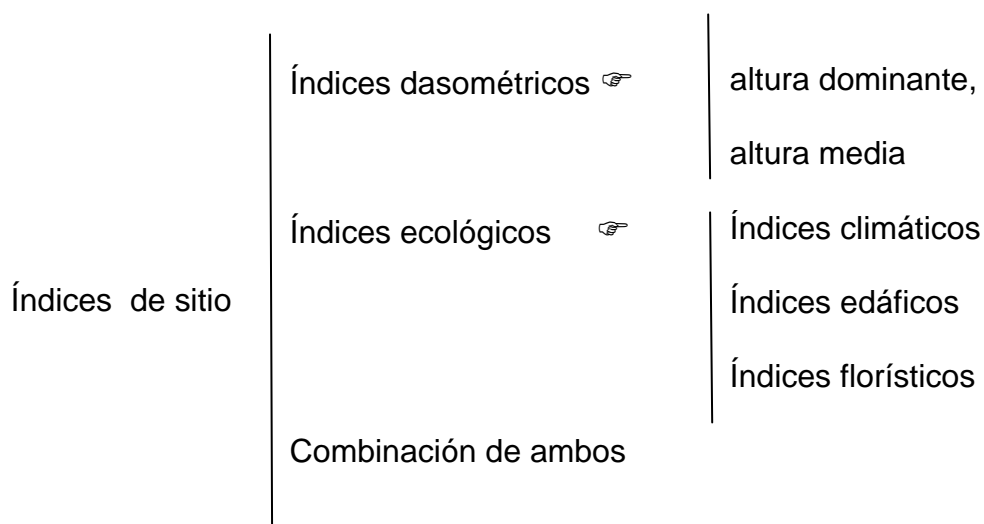


Figura 2. Diferentes formas de estimar la productividad

A consideración del autor el método indirecto ha sido principalmente el empleado en las condiciones de Cuba, teniendo como indicadores de calidad de sitio la altura media y la altura dominante ( $H_o$ ).

Los índices edáficos, florísticos y climáticos se encuentran en función de equipos e instrumentos costosos con los que los investigadores no cuentan actualmente, sería importante una evaluación de los mismos para llegar a conclusiones acerca de cuál es el más efectivo.

#### 1.4 Modelos del perfil del fuste.

En las dos últimas décadas se observa un interés creciente entre los distintos centros de investigación por abordar el análisis daso-dendrométrico de una masa forestal mediante el uso de modelos del perfil del árbol. Este auge de las técnicas de modelización en el ámbito forestal surge de la necesidad de reducir las unidades muestrales (árboles) pero sin que esto traiga consigo una pérdida en la precisión obtenida. Además estas técnicas permiten la reconstrucción por ordenador de los árboles para su posterior análisis

(clasificación de los productos obtenidos tras un despiece, evolución de su crecimiento, simulación de distintos tratamientos silvícolas).

(Calliez, 1980; Prodan *et al.*, 1997; Bi, 2000; Fassola *et al.*, 2006; Fernández y Rodríguez, 2010) coinciden en que los modelos fustales o de perfil son funciones que describen tanto la forma geométrica del árbol (cilindro, cono, parábola, neiloide) como la tasa de decrecimiento o ahusamiento del diámetro a medida que se incrementa la altura, representan la variación diamétrica a lo largo del fuste como función del diámetro, a la altura a 1.30 m ( $d_{1,30}$ ) y la altura total (Ht) permiten estimar tres características básicas de los árboles:

1. Diámetros en cualquier parte del fuste
2. Altura del fuste en la que se encuentra un diámetro límite especificado
3. Volumen entre dos puntos cualesquiera del fuste, o volumen hasta cualquier índice de utilización

Las características mencionadas son parte fundamental de cualquier sistema flexible de procesamiento de datos para determinar existencias que consideren la evaluación de productos; por otra parte, los modelos fustales tienen aplicación en los simuladores de crecimiento y rendimiento y en la simulación de trozado, cuando un usuario tiene interés en conocer el surtido de productos posible de obtener de la simulación de diferentes estrategias de manejo (Prodan *et al.*, 1997).

El fuste de un árbol es un sólido geométrico complejo, difícil de representar perfectamente con una expresión matemática, pero pueden realizarse ciertas simplificaciones y describirlo como una combinación de sólidos geométricos simples, por lo tanto pueden esperarse algunos errores al emplearse fórmulas basadas en estos sencillos modelos. Estos errores pueden mantenerse dentro

de límites aceptables si se realizan mediciones a intervalos cortos, de manera que el diámetro en la punta fina de la sección no sea menor al 80 % del diámetro en la punta gruesa. Para muchos árboles, modelar el fuste como una serie de paraboloides truncados es bastante precisa (Brickell, 1984 citado por Letourneau y Andenmatten, 2000).

Desde el siglo XIX se han estudiado métodos para expresar la forma del fuste de las especies arbóreas como función del diámetro y la altura. Con el desarrollo de las herramientas computacionales, se pasó de métodos gráficos a analíticos; se desarrollaron en los últimos años numerosos modelos dentro de lo que se encuentran:

- Modelos generales del árbol completo
- Modelos generales segmentados
- Modelos compatibles generales y segmentados
- Modelos de forma o exponente variable
- Modelos de árbol individual

Diversos han sido los enfoques empleados para la obtención de estos modelos, pudiendo encontrar en la literatura entre los llamados generales del árbol completo, los elaborados por Friedl *et al.*, (1992) para *Araucaria angustifolia* y el desarrollado por Allen (1992) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; entre los generales segmentados el desarrollado para *Pinus taeda* por Costas *et al.*, (2003); del tipo compatibles generales se encuentran el de Amateis-Burkhart (1987) en *Pinus taeda*; en *Pinus elliottii* por Crechi *et al.*, (1997, 1998); en *Pinus caribaea* var. *caribaea* por Ferrere *et al.*, (2001); en *Grevillea robusta* Crechi *et al.*, (2004) y en híbridos obtenidos de *Pinus elliottii* y *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Costas *et al.*, (2006).

Existen funciones de perfil ajustadas a varias especies de coníferas a nivel internacional entre los cuales se encuentran los elaborados por Laasasenaho (1982) en *Pinus sylvestris*, *Picea abies* y *Betula pendula* en Finlandia; los modelos obtenidos por Torres *et al.*, (1993) para ocho especies de pinus en el estado de México; Zepeda (1993) para *Pinus patula* en Perote, Veracruz, México; Rentería *et al.*, (1995) en *Pinus cooperi* para el estado de Durango, México; Návar *et al.*, (1997) para *Pinus hartwegii* en el Noreste de México; Zepeda y Domínguez (1997), para las especies de *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis* y *Pinus engelmannii* en la Sierra Madre Occidental del estado de Chihuahua; el trabajo de Meredieu (1998) en *Pinus nigra*; Corral, Návar y Fernández (1999) con *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis*, *Pinus engelmannii*, *Pinus leiophylla* y *Pinus herrerae*.

A nivel nacional se han obtenido modelos de perfil del fuste del tipo general del árbol completo en especies monopódicas como son *Pinus cubensis* Morelet y *Pinus tropicalis* Morelet por García y Vidal (1988), donde obtuvieron como el modelo de mejor ajuste un polinomio de cuarto grado, a partir del cual se obtienen las fórmulas de volumen.

También para esta última especie, en plantaciones de la provincia de Pinar del Río, Padilla (1999) encontró el mejor ajuste con un polinomio de tercer grado tanto para el diámetro con corteza (dcc) como sin esta (dsc), se tuvo como variable dependiente: el diámetro del árbol en las respectivas trozas de a metro (dcc y dsc) sobre el diámetro a 1,30 metro ( $d_{cc}/d_{1.30}$  y  $d_{sc}/d_{1.30}$ ) y como variable independiente la altura correspondiente a cada diámetro mínimo prefijado según el surtido ( $h_i$ ) sobre la altura total ( $h_t$ ), ( $h_i/h_t$ ) con su respectiva ecuación de volumen.



Ares (1999) para bosques naturales de *Pinus tropicalis* Morelet de la EFI La Palma, obtuvo un polinomio de segundo grado y tuvo como variable dependiente el diámetro medido a una altura ( $d_i h$ ) sobre la altura total ( $H_t$ ), como independiente la altura, medida a cada metro desde 0,5 m del suelo hasta la altura en que se encuentra la mitad de la última troza ( $h$ ) sobre la altura total ( $H_t$ ), también con su respectiva ecuación de volumen. Este autor obtuvo en el mismo trabajo un modelo para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, determinó como la ecuación de mejor ajuste un polinomio de primer grado y utilizó como variable dependiente e independiente las mismas que para el *Pinus tropicalis* Morelet con su respectiva ecuación de volumen.

También para esta especie García *et al.*, (2006) determinaron dos modelos para el diámetro con corteza y el diámetro sin corteza; obtuvieron como la ecuación de mejor ajuste un polinomio de tercer grado y utilizaron como variable dependiente el diámetro relativo en cualquier punto de la troza con respecto a su menor diámetro ( $d_i/D$ ), y como variable independiente el largo relativo en cualquier punto de la troza con respecto al largo total de la troza ( $l_i/L$ ).

Para especies simpódicas se encuentran los modelos elaborados por Peñalver (1991) para *Eucalyptus sp*, quien estableció como mejor modelo un polinomio de tercer grado, asumiendo como variable dependiente el diámetro con corteza medido a la altura  $h$  desde el nivel del suelo sobre la altura total ( $d/H$ ) y como variable independiente la altura medida cada un metro desde el suelo sobre la altura total ( $h/H$ ) con su respectiva ecuación de volumen; el modelo obtenido para *Hibiscus elatus* por Zaldívar (2000), teniendo como la ecuación de mejor

ajuste un polinomio de primer grado, y como variable dependiente el diámetro a una altura  $h$  sobre el diámetro normal ( $d_i/d_{1.30}$ ) e independiente la altura correspondiente a las diferentes mediciones del diámetro ( $d_i$ ) sobre la altura total ( $h_i/h_t$ ).

Respecto a esto, la modelación del perfil del fuste para las especies de crecimiento simpódico en las condiciones de Cuba, debieron tener en cuenta modelos del tipo general segmentados o del árbol individual, y no analizar solamente, los modelos generales del árbol completo para una mayor confianza estadística.

Por otra parte la modelación ha sido a partir de polinomios simples; según García (1995) tener en cuenta solamente este tipo de ecuaciones, tiene el inconveniente de implicar una “forma” que no varía con el tamaño del árbol.

### **1.5 Modelos de grosor de corteza.**

Los modelos de grosor de corteza son funciones matemáticas normalmente del tipo alométrico que relacionan el diámetro con corteza y diámetro sin corteza (Rodríguez y Broto, 2003).

Las mayores aplicaciones de estas relaciones se encuentran sin duda en la conversión del volumen con corteza a volumen sin corteza (García, 1995). El volumen de corteza representa en promedio entre un 10 y un 20 % del volumen del árbol.

La corteza tiene una importante participación en el volumen fustal. Corvalán y Hernández (2010) plantearon que para el pino insigne a distintas edades la corteza aportaba, en promedio, un 10,2 % del volumen total del fuste.

Gran proporción del volumen de corteza se concentra bajo el 15 % de la altura total del árbol, debido al engrosamiento cerca del tocón (Gordon y Gragam,

1986). Sobre el 50 % de la altura la relación diámetro sin corteza-grosor de corteza decrece, debido a que el espesor de corteza se mantiene relativamente constante y los diámetros fustales van disminuyendo.

Algunas veces el factor de corteza; cociente entre el diámetro con corteza y el diámetro sin corteza, permanece constante desde la base al ápice del árbol; el espesor de corteza es entonces proporcional al dcc y por consiguiente al dsc pero puede suceder que desde el pie al tope este factor disminuya al principio, después permanezca constante y al final aumente (Calliez, 1980).

El espesor de corteza varía notablemente entre especies y muestra una relación cambiante con la edad y con la altura en el fuste. La experiencia ha demostrado, sin embargo, que esta relación no es suficiente en muchas especies (Prodan *et al.*, 1997).

Existen una variedad de modelos que predicen el espesor de corteza en función de alguna de las siguientes variables: diámetro a 1,30 m ( $d_{1,30}$ ), altura en el fuste ( $h_i$ ) y diámetro con corteza a esa altura (dcc). Entre los cuales se encuentran los propuestos por: (Fonton y Tourret, 1986; Rondeux, 1993; Meredieu, 1998).

### **1.6 Densidad de la Madera.**

Es aceptado que entre las propiedades físicas, la densidad de la madera sea el atributo universalmente utilizado como índice de calidad de madera en relación a sus usos. Resulta de las dimensiones celulares, de la composición química y de las proporciones relativas de los tejidos constitutivos (Panshin y De Zeeuw, 1980; Barnett y Jeronimidis, 2003; Igartúa y Monteoliva, 2009).

La densidad o relación de masa a volumen se suele expresar, en la madera, en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ), cuyo valor coincide con la densidad

relativa respecto a la del agua y que, lógicamente, carece de unidades. También se puede expresar la densidad en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), cuyo valor es 1000 veces el anterior.

Como todo cuerpo poroso, en la madera es importante distinguir entre densidad real y densidad aparente. En la primera, solo se considera como volumen el ocupado por las paredes de las células. Se trata, por tanto, de la densidad de la pared celular. Su valor es del orden de 1,5 prácticamente igual para todas las especies.

La densidad normalmente utilizada para la comparación entre especies es la determinada con el peso y el volumen al 12 % de humedad, llamada densidad normal, que es a la que generalmente se hace referencia cuando no se especifica el grado de humedad al que se ha efectuado la determinación.

Por otra parte, se utiliza con mucha frecuencia la llamada densidad básica, que tiene una marcada utilidad práctica, cuando se conoce esta densidad en una especie determinada, se puede determinar la cantidad de materia prima anhidra de madera multiplicando dicho valor por el volumen de madera verde sin corteza, definición de gran significado en las industrias de pasta y tableros (Álvarez *et al.*, 2006).

La relación entre la densidad básica y las diversas propiedades de resistencia de la madera verde y seca demuestran que tales propiedades tienen el valor de resistencia mayor con un aumento de la densidad básica, se observa que esa relación es mayor para maderas secas que para maderas verdes. La densidad básica es un excelente indicativo de las propiedades mecánicas en maderas de grano recto y libres de defectos, o sea sin influencia de otros factores, que alteran negativamente tal relación (Kollmann y Cote, 1968).

Knigge y Schulz (1966) concuerdan en que, maderas de coníferas con anillos de crecimiento más estrechos son más pesadas y resistentes, y ocurre lo contrario con las latifoliadas. Otros investigadores por su parte indican que el porcentaje de leño tardío influye de manera más directa en la densidad básica y consecuentemente en la resistencia cuando se lo compara con el ancho de los anillos de crecimiento.

La densidad es una propiedad de gran trascendencia en los estudios relacionados con la tecnología de la madera, al guardar una relación muy directa (coeficientes de determinación superiores en muchos casos al 80 %) con muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera tales como: resistencia mecánica, rigidez, conductividad térmica y el calor específico (Panshin y De Zeeuw, 1980; Barnett y Jeronimidis, 2003).

Ibáñez (1975) encontró que la densidad media de la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la albura a 14 % de humedad, seca al aire es de, 0,83 g/cm<sup>3</sup> y de 0,80 g/cm<sup>3</sup> seca al horno, lo que corresponde a una clasificación, mediana. La densidad del duramen es de 0,65 g/cm<sup>3</sup> al 12% de humedad y de 0,62 g/cm<sup>3</sup> seca al horno, lo que se califica de mediana a moderadamente baja.

#### **1.6.1 Variación intra e inter-árbol de la densidad de la madera.**

El conocimiento de la variabilidad en las propiedades físicas y mecánicas es de fundamental importancia para los usuarios de la madera al momento de evaluar sus múltiples aplicaciones, para los silvicultores, al momento de fijar los objetivos de producción en términos de manejo. Esto permite optimizar ciertas propiedades de acuerdo a las necesidades industriales y disminuir, dentro de ciertos límites, la heterogeneidad de la materia prima.

Existen dos fuentes de variación respecto a las propiedades y características de la madera en el árbol, las variaciones entre árboles y las variaciones dentro del árbol (Igartúa *et al.*, 2003). Las primeras vienen explicadas por causas genéticas, factores ecológicos y gestión de la masa, mientras que las segundas están condicionadas por su situación dentro del árbol, específicamente relacionadas con variabilidad dentro del incremento de crecimiento, variabilidad producida de médula a corteza (variabilidad radial) y variabilidad ocasionada por diferentes niveles de altura (variabilidad longitudinal) (Savva *et al.*, 2002; Espinoza, 2004).

Dado que la mayoría de las veces la variación dentro del árbol es superior a la variación entre árboles, es imprescindible cuantificarla y definirla de la forma más precisa posible puesto que va a condicionar los productos que se pueden obtener al utilizar este recurso (Zobel y Van Buijtenen, 1989; García *et al.*, 2003).

Daniel *et al.*, (1982) encontraron que la madera más cercana a la copa, tiende a poseer menor densidad. Estudios realizados por Wilkes (1988) en diferentes géneros como *Eucalyptus*, *Populus* y *Salix*, indican que la variación axial de la densidad es de menor magnitud que la variación radial. Para poder comprender mejor los cambios de densidad de la madera con la altura dentro del árbol, se hace necesario estudiar las tendencias de la madera juvenil y la madera adulta separadamente. Megraw (1986) realizó un estudio y encontró una fuerte disminución de la densidad de la madera juvenil desde la base del árbol hasta los 3 m, por encima de los 5 m la densidad se mantuvo constante, independientemente de la altura.

Los árboles más viejos poseen mayor densidad debido al mayor porcentaje de madera adulta y a la deposición de material resinoso en el anillo de crecimiento. Por otra parte aparece un fenómeno no muy común relatado por Talbert y Jett (1981), donde la madera juvenil de los árboles más viejos de *Pinus taeda* poseen considerablemente mayor densidad que la madera juvenil de árboles más jóvenes. Las razones son desconocidas, pero se cree que resultan de las tensiones del individuo, referido a una teoría de compactación.

El *Pinus taeda*, como la mayoría de las coníferas, posee un patrón uniforme de baja densidad básica en la médula, un rápido aumento de la densidad en el período juvenil, seguido por series de anillos que poseen densidades esencialmente constantes, pero que fluctúan de año a año. Este patrón de variación para *Pinus taeda* fue mostrado por diversos investigadores como Megraw (1986) quien determinó que la densidad del *Pinus taeda* aumenta del centro hacia la parte externa en el sentido radial en toda la altura del árbol, pero que es mayor en la base que en la parte superior del árbol. Normalmente el cambio de densidad de la médula hacia la corteza, es mayor en el leño de otoño y menor en el leño de primavera.

Por su parte Taras (1965) al estudiar algunas propiedades de la madera de *Pinus elliottii* y su relación con la edad para cada tipo de leño producido por la especie, observó una disminución de la densidad básica del leño inicial con el aumento de la edad, equilibrándose de los 8 a 12 años. Por otra parte, la densidad básica del leño tardío aumentó rápidamente en este período de crecimiento, equilibrándose en determinado momento y decreciendo en la dirección de la corteza. Sobre el total de los anillos de crecimiento (leño

temprano y tardío), se pudo evidenciar un aumento de la densidad básica entre 8 a 12 años, luego se produce rápidamente un equilibrio.

La mayor variación de la densidad ocurre dentro de un anillo de crecimiento anual, debido a que el género *Pinus* presenta diferencias muy acentuadas entre el leño de primavera y el leño de otoño. Por ejemplo Ifju (1969) citado por Zobel y Van Buijtenen (1989), demostró que la densidad del leño de primavera de los Pinos del Sur de Estados Unidos varía entre 0,30 a 0,46 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la densidad del leño de otoño varía entre 0,65 a 0,92 g/cm<sup>3</sup>.

Según Kollmann (1951) en el caso específico de los pinos, las variaciones de la densidad básica pueden ser tan acentuadas en el sentido longitudinal del árbol al punto de sugerir diferentes clases de calidad sólo en función de la posición del origen de las piezas.

Específicamente en la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari (Burley *et al.*, 1973; González *et al.*, 2007; González, 2008) demostraron que la densidad de la madera disminuye en su sección transversal del centro hacia la periferia, y explicaron que estos altos valores en el centro del árbol se deben a elevados contenidos de resina y a la presencia de células cortas comprimidas.

Por su parte Cown (1981) para la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret y Golfari encontró que la densidad de la madera se incrementa generalmente del centro a la periferia del árbol a medida que aumenta la edad. A su vez presenta un patrón de variación continua en relación con el diámetro en la sección transversal, y descendente en la sección longitudinal del árbol; esto indica que en el centro del árbol hay más madera juvenil que la que se encuentra en la periferia de los árboles. Menciona que



también se debe a que las traqueidas tienden a crecer y engrosar más sus paredes a medida que la edad aumenta y el ritmo de crecimiento se reduce.

Otro factor muy importante que determina la variación de la densidad de la madera en una misma pieza, es la humedad. La madera tiene, en su interior, una cierta cantidad de agua que depende de las condiciones en que se encuentre. La variación de esta cantidad de agua lleva consigo la variación de su peso y para valores inferiores al Punto de Saturación de la Fibra, también el volumen. La densidad de una madera aumenta con la humedad (salvo algunas de densidades muy altas, por debajo del Punto de Saturación de la Fibra).

Conocer estas variaciones permite realizar muestreos de madera que sean representativos del valor del árbol completo y reconocer diferencias de calidad en relación a los usos (Álvarez, 2005).

Las variaciones de la densidad entre árboles también han sido estudiadas y con resultados contradictorios, un ejemplo de ello son los estudios realizados en *Eucalyptus globulus* Labill en Argentina por (Miranda *et al.*, 2001; Quilho y Pereira, 2001; Raymond y Muneri, 2001) quienes encontraron diferencias significativas entre árboles explicadas, por la procedencia y la altitud. Por su parte Igartúa *et al.*, (2002) para la misma especie, al sudeste de la Provincia de Buenos Aires, hallaron variaciones de escasa relevancia entre árboles de plantaciones maduras. Aunque en plantaciones comerciales de 7 años, reportaron que los árboles influyeron significativamente sobre la densidad básica de la madera.

Es conocida la influencia del sitio en los parámetros de crecimiento, pero es menos conocida su influencia en la calidad de la madera (Barnet y Jeronimidis, 2003).

Carlson y Nimlos (1966) informan diferencias en la densidad para distintos tipos de suelo; por su parte Cown (1992) reporta que existe una relación inversa entre la calidad de sitio y la densidad de la madera.

Para los géneros *Salix*, *Populus* y *Eucalyptus*, existen numerosos trabajos que estudiaron la densidad de la madera en diferentes sitios con resultados contradictorios (Bhat y Priya, 2004; Peszlen, 1998; Koubaa *et al.*, 1998; Miranda *et al.*, 2001; Monteoliva *et al.*, 2005; Pliura *et al.*, 2005, 2007; Igartúa y Monteoliva, 2006; Monteoliva, 2007).

Otros efectos relevantes y contradictorios, son los que tienen las prácticas silviculturales sobre la densidad de la medera, existiendo distintas opiniones acerca de su efecto Zahner y Whitmore (1960), Jackson (1968), Lindström y Bates (1990) así se reportan los trabajos en Pino Oregón realizados por Parker *et al.*, (1976) los cuales sostienen que la densidad de la madera no es afectada significativamente por los raleos, a pesar de que producen un aumento de la tasa de crecimiento en diámetro; por su parte Erickson y Harrison (1974) reportaron para esta especie que los raleos producen madera de menor densidad, fundamentalmente en los 3 a 4 años después de aplicado; asícomo Hapla (1997) y Lausberg *et al.*, (1995) lo que hallaron que elevadas tasas de crecimiento provocadas por mayores espaciamientos resultantes de raleos producen una disminución significativa en la densidad de la madera.

Hernández *et al.*, (1996) analizaron la influencia de los raleos sobre la relación entre madera temprana / madera tardía y la densidad de la madera de *Pinus patula*, concluyendo que a pesar del efecto de los aclareos sobre las características de los anillos de crecimiento, la asociación entre la densidad de la madera y estas características no se modificaron substancialmente después

de realizados los mismos. Markstrom *et al.*, (1983) y Moschler *et al.*, (1989) por su parte han reportado que para *Pinus taeda* y *P. ponderosa*, los aclareos no modifican la densidad básica de la madera, el porcentaje de madera tardía, la longitud de traqueidas y el ángulo microfibrilar. Sin embargo, en estudios de espaciamiento Simpson y Denne (1997) obtuvieron que la madera de árboles de *Picea sitchensis* con mayor espaciamiento presentó valores de densidad básica más altos.

La tasa de crecimiento es otro factor que tiene influencia en las propiedades de la madera. Según Erikson y Harrinson (1974), un aumento rápido de la tasa de crecimiento da como resultado variaciones en las propiedades, entre ellas un aumento en el porcentaje de leño inicial, reducción de la densidad básica y del largo de las traqueidas.

Otro factor importante de variación es el genético, Zobel y Van Buijtenen (1989) mencionan que la variación de la densidad de la madera entre árboles de *Pino oregon* se debe a causas genéticas, las cuales son tan grandes, que no permiten apreciar la variabilidad por causa de otros factores externos como la calidad de sitio, clase de copa y ubicación geográfica.

#### **1.6.2 Modelación de la densidad de la madera.**

La determinación de la variación de la madera tanto inter como intra árboles ha favorecido la existencia de múltiples modelos para varias especies (Igartúa y Monteoliva, 2009).

Así se reportan los modelos contruidos por Mazet *et al.*, (1990) en Francia para *Pinus sylvestris*, *Abies alba* y *Picea abies*, los cuales tuvieron como variables predictoras la altitud y la región; los modelos establecidos para *Picea abies* por Chantre y Gouma (1993) para 8 clones en función del sitio; el modelo

de Hervé (1999) en función de la parcela y el de Pape (1999) en función del estatus social; el modelo construido para *Quercus petraea* por Bergés *et al.*, (2000) quienes refieren que la densidad se encuentra determinada por el sitio de (1-3%) y el estatus social (18-23%).

Diversos estudios realizados en relación con la densidad del rodal y calidad de estación, han permitido generar modelos de densidad de la madera a partir de las tasas de crecimiento, evaluadas por el ancho de los anillos con gran precisión, sin la necesidad de realizar pruebas de laboratorio (Lindström, 1996; Dutilleul *et al.*, 1998).

Owoundi (1992) estableció un modelo de densidad para *Quercus petraea* y *Quercus robur* en función de la edad, y la longitud del anillo de crecimiento sobre la distancia media de la probeta. Para estas mismas especies Zhang *et al.*, (1993) determinaron un modelo teniendo como variables predictoras: la edad, el inverso de la longitud del anillo de crecimiento y la edad sobre la distancia media de la probeta; los modelos encontrados para diferentes especies de *Quercus* por (Degron y Nepveu, 1996; Lei *et al.*, 1996; Bergés, 1998; Guilley *et al.*, 1999; Guilley y Nepveu, 1999; Le Moguédec, 2000 y Guilley, 2000) quienes utilizan las variables anteriores con transformaciones.

Los modelos de variación radial y axial de la densidad establecidos para (*Eucalyptus*, *Populus* y *Salix*) por (Wilkes, 1988; Downes *et al.*, 1997; Igartúa *et al.*, 2002, 2003).

Pereyra y Gelid (2002) obtuvieron para *Pinus taeda* en la provincia de Misiones, al norte de Corrientes en Argentina tres modelos en función de la altura y los anillos de crecimientos.

# **CAPÍTULO II**

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Características generales del territorio de la EFI Macurije.

Aldana *et al.*, (2006) ubica la Empresa Forestal Integral (EFI) Macurije en la región más occidental de la provincia de Pinar del Río, esta abarca partes de los territorios de los municipios Guane y Mantua. Sus límites geográficos (figura 2.1) son los siguientes: al Norte (N) con el litoral costero desde la ensenada de Baja hasta la ensenada de Garnacha, al Noreste (NE) con el Municipio Minas de Matahambres específicamente con el Consejo Popular Santa Lucía (EFI Minas de Matahambres); al Este (E) con el municipio San Juan y Martínez (EFI Pinar del Río); al Sur (S) con el municipio Sandino (EFI Guanahacabibes) y al Sureste (SE) con el litoral del Golfo de México.

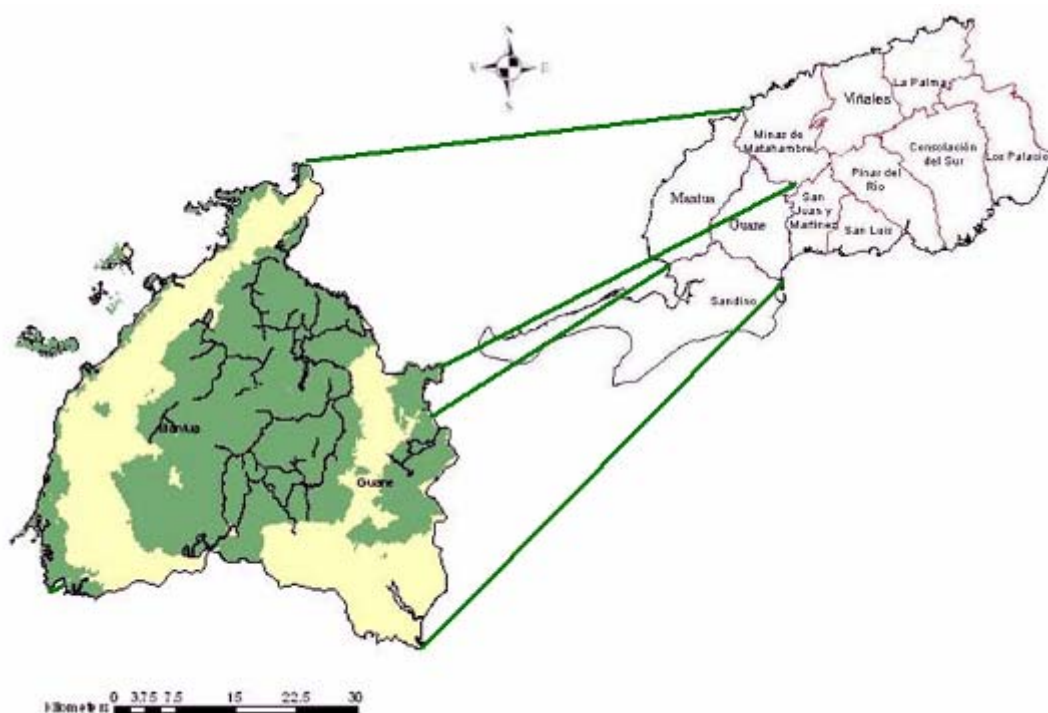


Figura 1- Ubicación geográfica de la EFI Macurije. Fuente: Barrero, 2010.

La cantidad de lluvia reportada en el territorio de la EFI Macurije es de unos 1300 mm como promedio anual, el mes más seco es diciembre con 28 mm y el

más lluvioso septiembre con 225 mm; en relación a las temperaturas, la media en el territorio es de 25,7 °C; el mes más frío es enero con 23,1°C y el más caliente es agosto con 28 °C .

Debido a la extensión del territorio de la EFI Macurije, se presenta una gran variabilidad en cuanto a tipos de relieve; un análisis de estos indican una secuencia escalonada de elevaciones que concluyen en una llanura costera influenciada por ciénagas y arenales.

Esta área puede dividirse en tres zonas bien diferenciadas:

1. Zona de elevaciones cercana a los 200 m y menos, formada por lomas altas, abruptas y que se extienden como espinazo en dirección NE y SW.
2. Zona de colinas onduladas, constituida por las llanuras de pie de monte muy desertadas, pequeños abanicos y coluvios, originados de la baja cordillera central, antes descrita. Esta zona fluctúa entre los 5 y 50 m de altitud y se extiende en forma de abanico en todas las direcciones a partir del núcleo central de dicha cordillera.
3. Zona costera donde coinciden llanuras deposicionales arenosas y ciénagas. Esta zona constituye el límite de la región en los lugares en que la misma llega al mar.

La existencia de estas zonas no puede considerarse como un hecho fortuito, ya que se debe a la acción continuada de los procesos erosivos. Una formación geológica considerada como de las más antiguas de Cuba, es la conocida como “Formación San Cayetano” y está constituida por rocas metamórficas fundamentalmente rocas esquistosas y pizarrosas.

Un caso aparte lo constituyen las formaciones mogóticas del área, las cuales, consideradas como relieve, constituyen una mancha abrupta de elevaciones de

borde cortados a pico, yaciendo sobre rocas arenosas y arcillosas fuertemente dislocadas de los abanicos y coluvios de la cordillera.

Todo este complejo geomorfológico se explica a partir de la teoría sustentada por un grupo de geólogos que consideran que en Cuba se han producido numerosos mantos sobre escurrimientos gigantescos acompañados de numerosas fallas y que una zona típica de los mismos es Pinar del Río (Aldana *et al.*, 2006).

Los suelos existentes en esta área son:

Suelos Alomados: Son suelos derivados de rocas metamórficas e ígneas, encontrándose entre estos esquistos y pizarras y rocas cuarcíticas respectivamente, en ocasiones pueden encontrarse estos materiales combinados con depósitos aluviales, sustentando suelos de este tipo. Ocupan posiciones que fluctúan desde 5 m hasta los 200 m y más de altitud, variando sus pendientes promedios desde menos del 5% hasta más del 20%, predominando las posiciones ocupadas por encima del 10% de pendiente. Han sido agrupados taxonómicamente atendiendo a la coloración de sus horizontes de acumulación arcillosa, las cuales fluctúan desde los tonos rojos hasta los amarillentos. Estos suelos en su estado normal deben presentar el primer horizonte de textura gruesa, loam arenoso y de color oscuro; no obstante, la impermeabilidad de los horizontes inferiores, la deforestación a que han sido sometidos y las pendientes donde comúnmente se encuentran, hacen que estén en su mayoría muy erosionados y presentando los horizontes arcillosos y de coloración rojiza aflorando a la superficie. El hecho de que estén erosionados y cuenten con horizontes de acumulación arcillosas de profundidades entre 10 y 60 cm hace recomendable, según investigaciones realizadas, el laboreo (sub-solación), siempre que la pendiente lo permita, con vistas al establecimiento de plantaciones vigorosas. En estos suelos la especie de más perspectiva, por su gran adaptación y aprovechamiento de las condiciones edáficas es *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari y en



segundo lugar *Pinus tropicalis* Morelet; por lo que estas son las especies que más se recomiendan, independientemente de los objetivos de las plantaciones.

Suelos Latosólicos: Estos suelos pueden encontrarse sobre materiales muy variados aunque predominan los esquistos arcillosos y los materiales aluviales respectivamente. Ocupan posiciones llanas a ligeramente onduladas que fluctúan entre menos de 5 m hasta los 20 m aproximadamente y puede decirse que por sus características físicas y químicas, así como por las posiciones que ocupan, son suelos dedicados a las actividades agropecuarias, que sufren una erosión relativamente más débil que los alomados y de perspectivas forestales mucho más inciertas, si se consideran desde el punto de vista económico integral.

Suelos Arenosos: Estos suelos merecen un análisis más detallado, no tanto por su extensión, sino también por la factibilidad de usarlos en la silvicultura. Los mismos presentan dos variantes fundamentales en sus propiedades físicas y profundidad; unos son suelos donde se presenta un horizonte arenoso, poco estructurado y sin grandes variaciones hasta 1 m y más de profundidad, siendo muy pobres en nutrientes y presentando condiciones de drenaje excesivas; los otros son suelos donde a partir de los 50 cm aproximadamente se presentan marcadas condiciones de hidromorfismo y de drenaje deficiente que los hacen padecer de encharcamiento o excesos de humedad en algunos períodos del año, estos también por su textura y sus materiales de origen son muy pobres en nutrientes minerales. En la zona ocupada por ambos suelos silíceos pueden encontrarse yacimientos de arena sílice, empleadas en la industria del vidrio. El resto de los suelos existentes en la región, en su mayoría son ocupados por otras actividades agropecuarias, por lo que carecen de importancia para la actividad forestal (Aldana *et al.*, 2006).

El territorio que comprende la EFI Macurije es rico en corrientes fluviales. Como río principal está el Cuyaguatzeje, que es el más importante de la provincia de Pinar del

Río, el cual tiene su nacimiento en las estribaciones del Cerro de Cabras; tiene un cauce subterráneo de unos 10 Km., internándose en el lugar conocido por Hoyo Potrerillo, abierto entre las sierras de El Sumidero y El Resolladero y volviendo a surgir en el sitio denominado “El Nacimiento”, entrando en el territorio de la empresa por la parte Sureste de la Sierra del Pesquero, con una extensión de 72,5 Km. dentro del área de dicha empresa. Este río está represado cerca de la laguna del Pesquero, almacenando unos 46 millones de m<sup>3</sup> de agua y desemboca en la costa Sur en la Ensenada de Cortés y tiene como afluentes dos importantes ríos: Río Frío y Guasimal; a su vez alimentan al Guasimal los arroyos San Francisco, Los Jíbaros y Palmar.

Otros ríos importantes en la zona son: Mantua con 64 Km. de extensión que corre de Este a Oeste en casi toda su trayectoria, desembocando en la costa norte, sus afluentes más importantes son los arroyos del Medio y Mobraja; el Río Macurije con 36 Km. de extensión, que desemboca en la costa Sur y el Río Sábalo con 32 Km. de longitud dentro de la empresa, siendo sus afluentes más importantes los arroyos Pañuelo, Ají y Cañas.

También existen otras corrientes fluviales de menos envergadura como son: Brazo de Canoa, San Juan, Tenería, Buena Vista, Los Muertos, Manacal, Naranjo, Guayacanes y Puercos (Aldana *et al.*, 2006).

### **2.1.1 Características de las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.**

Al concluir la ordenación en el año 2006 según Aldana *et al.*, (2006) el patrimonio forestal total de la EFI Macurije representaba el 17,8% de patrimonio forestal de la provincia que en ese momento fue de 495 348,9 ha, predominando la formación de Pinar con un 47,6% del área total, siendo el

*Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari la especie maderable de mayor importancia en la empresa.

Las plantaciones *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari presentaron las siguientes características:

- Área -----25 417,3 ha
- Volumen Total -----3 007,1 miles de m<sup>3</sup>
- Volumen por ha -----118,3 m<sup>3</sup>/ha
- Edad media ----- 18 años
- Incremento total anual ----- 164,4 miles de m<sup>3</sup>
- Incremento medio anual ----- 6,5 m<sup>3</sup>/ha/año

La distribución de las áreas y volúmenes por clase de edades se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1-Distribución de las áreas y volúmenes por clase de edades.**

Totales	Unidad	Clases de edad				
		I	II	III	IV	V
25 417,3	ha	2 742,0	1 089,4	2 433,7	2 280,4	16 871,8
300 710,1	miles m <sup>3</sup>	10 584,8	5 114,0	21 598,0	24 973,7	238 439,6

Fuente: Proyecto de Ordenación EFI Macurije.

Se observa que las áreas están concentradas en la clase de edad V con el 66,4%, seguida de las clases I (10 %), III (9,6 %) y IV (9 %). Lo anterior se corresponde con las existencias que también se concentran en la clase de edad V con 79,3%. Considerando las clases de edades IV y V, entonces las mismas abarcan el 75,4% del área y el 87,6% del volumen total de las plantaciones.

## 2.2 Procedimiento para la modelación del crecimiento de las masas de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

El estudio se realizó en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari para lo cual se tomó el registro de unidades muestrales

probabilísticas de área fija circulares de 500 m<sup>2</sup> (r=12,62 m) tamaño recomendado por De Nacimiento (1979) para los estudios de la existencia forestal en Cuba, de 14 parcelas permanentes establecidas en el año 2006 y distribuidas en todas las Unidades Básicas de Producción Forestal (UBPF) como indica la (tabla 2.1).

Tabla 2.1- Distribución de las parcelas permanentes

US	UBPF	Cantidad U/M
<b>Guane</b>	Los Ocujes	3
<b>Guane</b>	Las Cañas	3
<b>Guane</b>	Sábalo	3
<b>Mantua</b>	Río Mantua	2
<b>Mantua</b>	Macurije	3
		14

U/M: unidad muestral

Hasta el momento de realizado el análisis en estas unidades permanentes se contaba con 4 mediciones consecutivas.

En la investigación se emplean además 256 parcelas temporales de muestreo y el registro del inventario de la ordenación de la empresa realizado en los años 2002-2003 mediante el método de Bitterlich, con el fin de obtener la mayor cantidad de registros de mediciones posibles en aras de una mayor representatividad del comportamiento de las plantaciones, y contribuir a la disminución del error de muestreo. De estas unidades se utilizan los datos de las variables dasométricas: diámetro del árbol medio ( ), altura del árbol medio ( ) y número de árboles (n) este último llevado a hectáreas; a partir de estos se calculó el área basal (G) y el volumen (V) por hectárea. El diámetro a 1,30 (d<sub>1,30</sub>) fue medido con una forcípula simple, mientras que la altura fue medida con un Hipsómetro de Bitterlich.

Para acarrear el déficit del comportamiento de las variables, para la construcción de las curvas de índice de sitio y modelos de crecimiento, se derribaron 56 árboles tipo de una selección de sitios representativos. Se empleó para ello las facilidades del sistema de información geográfico para la ordenación del patrimonio forestal de Cuba, Ordena v. 2.0.

El primer punto en el establecimiento de un modelo de crecimiento es la construcción de las curvas de índice de sitio (Peñalver, 1991; Padilla, 1999; Zaldívar, 2000); tomándose como indicador de la productividad del sitio la altura dominante ( $H_o$ ) la cual es igual al valor de la altura promedio de los 100 árboles más gruesos en una hectárea; esta variable es en alto grado independiente de la densidad y del manejo, esto último siempre que los raleos y/o podas no sean muy intensos (Prodan *et al.*, 1997).

El método de construcción de índice de sitio utilizado fue el de regresión anidada desarrollado por Bailey y Clutter (1974) y descrito por Alder (1980) como método de regresión jerárquica; dentro del mismo se decide el uso de estimador de pendiente común por ser el más efectivo y el más empleado para las especies en plantaciones en Cuba (Padilla, 1999; Zaldívar, 2000; García, 2004, García *et al.*, 2004).

Se utilizó para ello modelos con restricciones en los que se fuerza a que la altura dominante ( $H_o$ ) coincida con el índice de sitio a la edad de referencia. Estas funciones pueden ser utilizadas en su forma integrada (función de productividad o rendimiento) y/o en su forma diferencial (función de crecimiento) a estas pertenecen la ecuación de Schumacher y Chapman-Richards, esta última conocida también como logística generalizada que aparecen a continuación:

$$y = \beta_0 e^{\frac{\beta_1}{t^{\beta_2}}} \quad (\text{Schumacher}) \quad [1]$$

$$y = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_2 t)}]^{\beta_1} \quad (\text{Chapman-Richards}) \quad [2]$$

Donde (y) es el tamaño del organismo en el tiempo (t);  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_0$  parámetros de la función o constantes desconocidas que deben ser estimadas;  $\beta_0$  específicamente es el tamaño máximo asintótico (valor de F (t) cuando  $t \rightarrow \infty$ ), el parámetro  $\beta_2$  es la tasa relacionada con la velocidad de crecimiento.

Estas dos ecuaciones describen una sismoide, y han sido empleadas con buenos resultados para la construcción de curvas de índices de sitios y modelos de crecimiento en la especie objeto de estudio por García, (2004) para la provincia de Pinar del Río, así como por Ferrere *et al.*, (2001), en el Departamento Iguazú en Misiones, Argentina. También han sido utilizadas para *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* por Salazar, (1985) en Turrialba, Costa Rica; por Groothausen y Ferreira, (1989) en Honduras y por Montero *et al.*, (2002) en sitios de Oaxaca, México.

Para emplear la regresión lineal fue necesario linealizar estas ecuaciones utilizando en ambos lados de la ecuación logaritmos de base e (ln); luego por propiedades de logaritmos se consigue:

$$\ln H_0 = \ln \beta_0 + \frac{\beta_1}{t^{\beta_2}} \quad \text{Schumacher} \quad [3]$$

$$\ln H_0 = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln [1 - e^{(-\beta_2 t)}] \quad \text{Chapman-Richards} \quad [4]$$

Si se concibe que en ambas ecuaciones la constante sea la altura máxima  $\beta_0 = \ln H_{\text{máx}}$ , entonces  $\beta_0$  y  $\beta_1$  pueden ajustarse por regresión lineal siempre que  $\beta_2$  sea conocido. Este parámetro fue determinado asumiendo una serie de valores

tentativos: así el modelo al cual le correspondió el mejor ajuste, fue el que presentó el menor valor de la suma de cuadrados de los residuales o desviaciones (SCR), según lo que establece la metodología propuesta por Alder (1980); además el mismo plantea que para el modelo de Schumacher específicamente la mayor parte de las especies los valores apropiados de  $\beta_2$  varían entre 0,2 y 2.

Una vez que la curva de crecimiento de la altura dominante promedio es obtenida, se mantiene la pendiente  $\beta_1$  para cada IS y se calcula la constante del mismo. Se asume que el IS sea la altura dominante del rodal a una edad  $t_i$ , por lo que la constante  $\beta_{0i}$  para cada IS vendrá dada por la siguiente ecuación para cada modelo:

$$\beta_{0i} = \ln IS - \frac{\beta_1}{t_i \beta_2} \quad \text{Schumacher} \quad [5]$$

$$\beta_{0i} = \ln IS - \beta_1 \ln[1 - e^{(-\beta_2 * t_i)}] \quad \text{Chapman-Richards} \quad [6]$$

Una vez definida la ecuación para la determinación del IS y obtenidas las curvas, se analiza la correlación paramétrica existente entre las variables dasométricas restantes y la edad mediante una matriz de correlación (Pearson) unido a la representación gráfica de la dispersión; y se descarta la presencia de valores atípicos que alteren los coeficientes de correlación. Este procedimiento condicionó fijar las entradas o factores para cada función de la forma más fácil y práctica de cada una de las variables de la masa. A continuación se procedió al ajuste de las funciones teniendo en cuenta el cumplimiento de las siguientes leyes silvícolas:

- La producción por unidad de superficie de la masa está en estrecha correlación con su altura dominante, y la producción total en volumen alcanzado para una altura dominante dada, no está influenciada por el número de años requeridos para alcanzar esta altura Ley de Eichhorn (Pardé y Bouchon, 1994).
- El crecimiento en altura no está influenciado por la silvicultura; resulta que el crecimiento en área basal y en volumen de una masa regular permanece idéntico en un amplio abanico de clases de claras diferentes.

Además deben cumplirse los siguientes supuestos:

- La altura dominante será el indicador que defina la productividad del sitio.
- La densidad inicial de la plantación es considerada con marcos de plantación de 2 x 2 m, 2 x 2.5 m y 2 x 3 m.
- Los rodales seleccionados cumplan la distribución normal de frecuencias diamétricas definidas por García (1989,2004) y Montalvo *et al.*, (1992) para la especie.
- En un rodal no raleado, la reducción del número de árboles con el tiempo será consecuencia de la mortalidad natural, equivalente a un aclareo ligero y por tanto sin alterar en mayor medida la distribución de frecuencias de los diámetros.

Para la obtención de los modelos de crecimiento se empleó la regresión lineal y la regresión no lineal, en correspondencia con la tendencia que siguieron las variables dasométricas.

Para el caso de la regresión lineal se analizó como primer aspecto el cumplimiento de los supuestos teóricos: normalidad, homocedasticidad, e



independencia serial de los residuos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov, prueba de Levene, y el test de Durbin y Watson respectivamente.

En relación a la bondad de ajuste se analizaron los coeficientes de correlación ( $R$ ), de determinación ( $R^2$ ), de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ), el error estándar de la estimación ( $S_x$ ), además de la significancia estadística de los coeficientes de regresión ajustados mediante la prueba t-student.

Para el empleo de la regresión no lineal se utilizó el algoritmo implementado por el software estadístico SPSS v. 15.0 para Windows, el cual consta de dos etapas: primero la búsqueda de una solución aproximada mediante el método downhill simplex el cual no requiere la evaluación de derivadas parciales, y segunda la interacción numérica de la solución mediante el procedimiento de Levenberg-Marquardt.

Los estadísticos analizados para cada iteración son: estimaciones de los parámetros y suma de cuadrados residual. Para cada modelo: suma de cuadrados para la regresión, residual, total corregido y no corregido, estimaciones de los parámetros, errores típicos asintóticos y matriz de correlaciones asintóticas de estimaciones de los parámetros.

Las capacidades predictivas se evaluaron al analizar el comportamiento de la tendencia gráfica de los residuos y la raíz del error cuadrático medio.

### **2.3 Procedimiento para la determinación del turno de corta.**

La determinación del turno es una tarea de optimización mediante la cual se busca que, además del cumplimiento de las exigencias técnicas (máxima producción de los surtidos maderables), represente el óptimo entre los turnos de máxima producción en volumen y el mayor ingreso financiero (Bobkó y Aldana, 1981).

Para ello se realiza primeramente una evaluación a partir de los estadísticos de tendencia central y de dispersión de las variables dasométricas diámetro del árbol medio de la masa ( $\bar{d}_{1,30}$ ) y altura del árbol medio de la masa ( $\bar{h}$ ), resultantes del inventario realizado en la empresa en los años 2002-2003 con el empleo del método de Bitterlich.

Lo anterior fue validado mediante un criterio de cortabilidad físico - biológico resultante del punto de cruce entre las curvas de Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) obtenidas a partir de un modelo de crecimiento en volumen, analizando para ello los dos modelos de crecimiento 1 y 2.

La curva del Incremento Corriente Anual (ICA) se obtuvo de la primera derivada de la función original con respecto a la edad, resultante del empleo del software Derive v. 5.02, a continuación para generar la curva de Incremento Medio Anual (IMA), se dividió la ecuación integral de crecimiento entre la edad.

El punto de culminación del ICA, se obtuvo de la segunda derivada de la función original con respecto a la edad, mientras que el punto de culminación del IMA, fue de la primera derivada de la función del IMA con respecto a la edad, igualando a cero y despejando la edad.

Este método ha sido utilizado y recomendado por su eficacia en la representación de las curvas de crecimiento por Ayerde (1996) y por Monárrez y Maldonado (2003) para la predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* MTZ. en el estado de Durango, México.

## 2.4 Metodología para la modelación del perfil del fuste y grosor de corteza.

Para los modelos de perfil del fuste, de diámetro con corteza (dcc), diámetro sin corteza (dsc) y grosor de corteza (e), se empleó una muestra de 225 árboles donde se incluyeron los 56 árboles derribados para el modelo de crecimiento y los 42 árboles del modelo de densidad de la madera, en función de disminuir el impacto ambiental por la tala de esta gran cantidad de árboles. Los árboles fueron seleccionados de manera que abarcasen todos los diámetros a 1,30 m existentes en las plantaciones, fundamentalmente alejados del borde y con una relación altura-diámetro a 1,30 m que se corresponda lo más posible con la relación promedio obtenida para la especie por Ares (1999); Ferrere *et al.*, (2001).

Se confeccionó un registro, donde se detalló el lugar exacto de ubicación dentro de la plantación, datos sobre las operaciones de vivero, métodos de preparación del sitio, fecha de plantación, datos sobre las operaciones en la plantación, post-plantación y otras actividades silvícolas.

Los árboles seleccionados se marcaron con una franja estrecha de pintura a 0,30 m y 1,30 m de diámetro, ubicando el Norte con una franja de pintura perpendicular al DAP, estos árboles fueron derribados con una motosierra e inmediatamente de ser apeados les fue medido la altura total.

Las mediciones partieron de 0,30 m hasta un diámetro inferior a 10 cm en el extremo superior de la altura total, los árboles fueron marcados y medidos cada 1 m, intervalo empleado por Ares (1999) para la especie; finalizado esta operación se extrajo una rodaja de 5 cm de cada una de las secciones marcadas (figura 2.2).



Figura 2.2-Marcaje y troceado del fuste para la obtención de las muestras. Fuente: elaboración propia.

Cada sección se enumeró y se manipuló de tal forma que se evitara el desprendimiento de la corteza durante la transportación.

Obtenidas las muestras, se midió el diámetro con corteza (dcc) con una cinta diamétrica y se procedió al desprendimiento de la corteza para medir el diámetro sin corteza (dsc), datos con los que se calculó el grosor de corteza (e) mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{dcc - dsc}{2} \quad [7]$$

Los datos obtenidos fueron procesados con el tabulador electrónico Excel, y su análisis estadístico con el procesador estadístico SPSS ver 15 para Windows.

El modelo seleccionado para representar el perfil de fuste y grosor de corteza de la especie en este trabajo, fue del tipo general del árbol completo (Prodan *et al.*, 1997). Se evaluaron a partir de la bibliografía un total de 16 modelos, cuyas expresiones matemáticas se muestran en el (anexo 1).

Se emplearon como variables dependientes el diámetro con corteza (dcc), el diámetro sin corteza (dsc) y el grosor de corteza (e), así como

transformaciones del tipo ponderada con variables tales como: diámetro a 1,30 ( $d_{1,30}$ ) y altura total ( $h_t$ ).

Como variables independientes se utilizaron: la altura relativa a la que se encuentra un cierto diámetro en el fuste ( $h$ ), la división de la altura relativa sobre la altura total  $\left(\frac{h_i}{h_t}\right)$  con el objetivo de obtener una unidad de altura comparable en árboles de dimensiones distintas, esta división menos 1 con el propósito de estimar un diámetro 0 cuando  $h_i=h_t$ , la razón entre la diferencia de altura total y altura relativa a la que se encuentra un cierto diámetro en el fuste sobre la diferencia de altura total y la altura a 1,30 m  $\left(\frac{h_t-h_i}{h_t-1.30}\right)$  con el fin de obtener un modelo que estime el diámetro de referencia cuando la altura en el fuste es la altura de medición del diámetro a (1,30 m).

Todas estas variables han sido empleadas por Max y Burkhardt (1976); Kosak (1988); Padilla (1999); Ares (1999) para diferentes tipos de coníferas con buenos resultados.

Los modelos se obtuvieron mediante el ajuste por regresión lineal y estimación curvilínea con el empleo del procesador estadístico SPSS v. 15.0 para Windows, para la comparación de los modelos se utilizaron los estadísticos de bondad de ajuste siguientes: coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj), error estándar de la estimación ( $S_x$ ) además de la significancia estadística de los coeficientes de regresión ajustados mediante la prueba t-student. Aquellos modelos que presentaron al menos un parámetro no significativamente distinto de cero fueron eliminados. Para comparar el error estándar de la estimación (comúnmente calculado en el análisis de regresión) de ecuaciones con distintas variables dependientes, se calculó el Índice de Furnival "IF" (Furnival, 1961). La interpretación del IF es de carácter inverso a los de la máxima verosimilitud, por

lo tanto un valor grande indica ajuste pobre y viceversa (Furnival, 1961). El IF es determinado mediante la ecuación siguiente:

$$IF = s * \text{antilog} \frac{(\sum \log f'(y) - 1)}{n} \quad [8]$$

Donde:

s: desviación estándar del residual de la regresión ajustada

$f'(y)^{-1}$ : recíproco de la derivada de la transformación de la variable y, con respecto a la misma y.

n: número de datos

Las capacidades predictivas se evaluaron en la totalidad de la muestra empleada para la validación de los modelos (validación independiente) mediante los estadísticos de exactitud y sesgo: raíz del error medio cuadrático (REMC) y la diferencia agregada (media de los residuales) DIFA respectivamente. Ambos estadísticos están expresados como una proporción de la media del grupo y son recomendados por su efectividad por Cao *et al.*, (1989); Max y Burkart (1985); Real (1993); Rodríguez y Molina (2003); Novo *et al.*, (2003); Barrio *et al.*, (2007); Gezan *et al.*, (2009). Para estos estadísticos, el mejor modelo corresponderá al que presente los valores más cercanos a cero, ante dos valores iguales de error, el modelo que estime con un menor (REMC) puede considerarse superior.

Para el caso de la DIFA (%) si un modelo es insesgado, se espera que esta suma sea cercana a cero; sin embargo, si el modelo resulta sesgado, la suma de los residuales será diferente de cero. En este estadístico los signos negativos están asociados con sobrestimaciones, en tanto que los valores positivos indican subestimaciones.

Estos estadísticos son determinados mediante las siguientes expresiones:

$$RECM\% = \frac{100}{\bar{y}} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2} \quad [9]$$

$$DIFA\% = \frac{100}{\bar{y}} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \right] \quad [10]$$

Donde:  $y_i$  y  $\hat{y}_i$  corresponden al valor observado y estimado de la medición  $i$ -ésima;  $\bar{y}$  es el promedio y  $n$  el total de observaciones.

La medida del error y sesgo para el caso específico de los modelos de perfil y grosor de corteza se deben aplicar a todos los árboles muestras, tanto para el total del fuste como para porciones de él, se divide el fuste en secciones de igual longitud, para comprobar las características y performance del modelo en las diversas porciones del fuste de donde provendrán los surtidos de productos posibles a obtener.

Para el análisis de las capacidades predictivas se establecieron clases de validación de la altura en por ciento hi (%) de una muestra independiente de 50 árboles tomados al azar.

## 2.5 Procedimiento para el estudio de la microdensidad de la madera.

Para la modelación de la densidad de la madera se empleó un total de 656 probetas de 15 árboles, pertenecientes a las 5 unidades muestrales permanentes levantadas en la empresa en el año 1986.

De cada unidad fueron seleccionados tres árboles por el estatus sociológico: un dominante, un codominante y un oprimido, estos fueron derribados con una motosierra, marcados cada un metro, siempre y cuando no estuviesen con nudos, ramas y hendiduras, y posteriormente troceados tomando un disco de 2 cm de espesor.

Obtenidas las muestras se procedió a su secado, primeramente al sol y después en un lugar aireado bajo techo, lo que permitió un secado uniforme y evitó el ataque de hongos.

Logrado este secado, se procedió a analizar la densidad de la madera, con el empleo de un escáner Multi-slice CT siguiendo la metodología descrita por Guilley (2000).

Las probetas obtenidas para la densidad con el escáner fueron construidas según la norma francesa establecida por el INRA para el empleo de este equipo (figura 2.3) con 2 mm de espesor ( $\pm 1$  centésima de mm) en su plano ortotrópico en vista de su posición radial, previendo la posición de los anillos de crecimiento. Una probeta mal orientada ocasiona una imagen borrosa, sensible particularmente sobre los límites de los anillos, por lo que esta imagen radiográfica inducirá una sobrestimación de la densidad máxima y mínima.

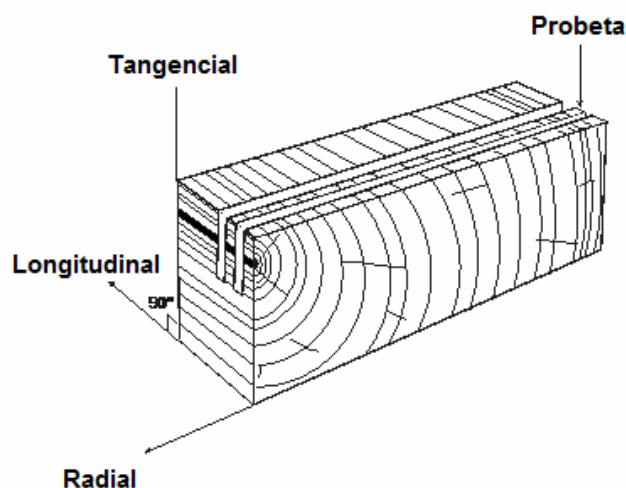


Figura 2.3- Corte de 2 mm de una probeta en dirección radial

El análisis de la microdensidad fue realizado en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Agronómicas de Francia, con sede en Nancy, se empleó para ello un escáner modelo "Multi-slice CT (GE BrightSpeed Excel)" (figura 2.4).



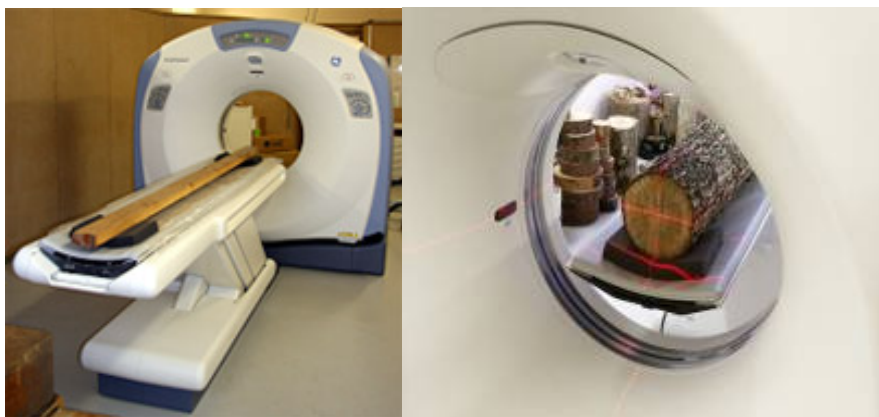


Figura 2.4- Escáner Multi-slice CT.

Para su utilización las muestras fueron estabilizadas a priori al 12 % de contenido de humedad.

Las probetas fueron irradiadas según el procedimiento descrito por Polge y Nicholls (1972) durante dos horas por rayos X de gran longitud de ondas, de una fuente puesta a 2.5 m de un filme radiográfico de radio medio. Los rayos X fueron condicionados por las características eléctricas siguientes: intensidad de 10 mA y una tensión de 10 kV. Tres perfiles de densidad fueron registrados, correspondientes a tres pasajes coyunturales sobre la imagen radiográfica con una ventana de medición de alta tensión de 500  $\mu\text{m}$  en la dirección tangencial y 24  $\mu\text{m}$  en la dirección radial.

Una vez obtenidas las imágenes radiográficas de las probetas se procedió a la delimitación de los anillos de crecimiento con el empleo del software CERD (Mothe *et al.*, 1998) siendo además verificados manualmente por un técnico del propio laboratorio.

# **CAPÍTULO III**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

## CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 3.1 Turno de corta para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

En tabla de tasación de los bosques de Cuba se encuentra un turno de corta para la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari de 21 años, edad donde según dicha tabla, la especie alcanzó la máxima madurez, con un diámetro a 1,30 m de altura de 32 cm. Este turno se infirió a partir del análisis del comportamiento de la especie en la región centro-occidental, y no tuvo en cuenta las diferentes calidades de sitio existentes en estas regiones, lo cual dificulta para un sitio en específico confiar el máximo rendimiento de la especie a una edad determinada.

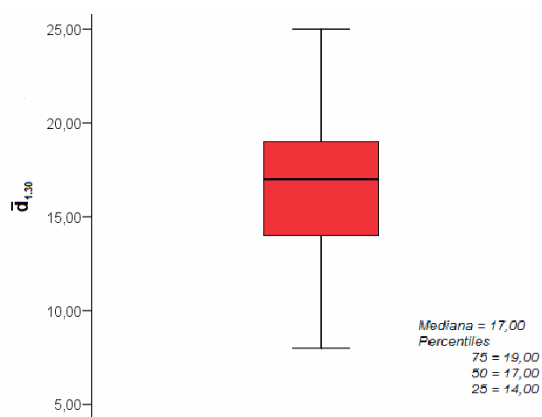
Como resultado del análisis del comportamiento de los 85 rodales de la especie existentes con 21 años en la EFI Macurije, se obtuvo la tabla 3.1.

**Tabla 3.1- Estadísticos descriptivos para el  $\bar{d}_{1,30}$  y  $\bar{h}$  a la edad 21 años.**

Variables	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Típ
$\bar{h}$	85	11	7	18	12	2,44
$\bar{d}_{1,30}$	85	17	8	25	16	3,95

Esta tabla muestra mediante los estadísticos de tendencia central y de dispersión el comportamiento de las masas con esta edad, donde se obtiene una media de 16 cm para el diámetro, con un valor máximo de 25 cm muy en correspondencia con los reportados para la especie en la provincia por Gra et al., (1990); García (2004) y García et al., (2004) pero alejado de las características de las plantaciones que prevé el turno.

Profundizando en este análisis se obtiene un diagrama de cajas para el  $d_{1.30}$  (figura 3.1).



**Figura 3.1-Comportamiento del  $d_{1.30}$  a una edad de 21 años.**

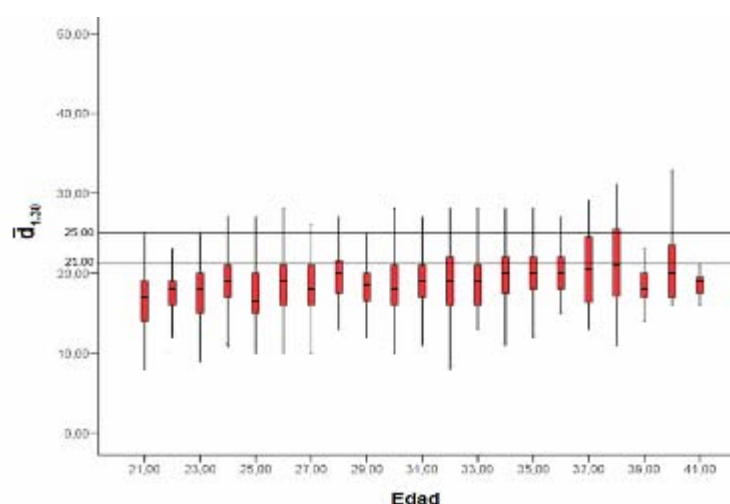
En esta figura se representó el grado de dispersión de los datos del diámetro del árbol medio, observándose que el 50 % de los mismos se encuentran en la caja entre los percentiles 25 y 75, donde más del 50 % se hallan por debajo de la mediana que en este caso es de 17 cm.

Lo expuesto anteriormente evidencia que el turno de tala principal de 21 años para las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari no se fundamenta sobre la base del comportamiento real de las plantaciones en la EFI Macurije, lo que trae como consecuencia, que en general se talen grandes superficies y rodales que aún están en pleno crecimiento. Por lo que es necesario determinar un turno eficiente, con el cual se puedan alcanzar mayores volúmenes de productos maderables con mejor calidad en cuanto a sus dimensiones en sus surtidos comerciales.

A lo anterior hay que añadir también que según el manual para la ejecución de la Ordenación Forestal en Cuba, realizado por Suárez *et al.*, (2002), el raleo II para esta especie se realiza entre los 16 y los 25 años y el raleo III a las plantaciones

con más de 26 años. Por tanto si se ejecuta la tala a los 21 años, nunca se llegaría a realizar el raleo III, el cual tiene como objetivo fundamental lograr un crecimiento acelerado de los árboles superiores para reducir el plazo de obtención de la madera de grandes dimensiones y técnicamente maduras; por otra parte, la resinación de las áreas a talar estaría muy limitada ya que habría que comenzar a resinar, como mínimo a los 18 años, cuyo diámetro en el sitio de mejor calidad estaría muy por debajo de 20 cm que es la dimensión mínima para resinar.

El análisis del comportamiento diamétrico de las plantaciones existentes en la empresa para edades superiores a los 21 años de edad, se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2- Comportamiento del  $d_{1.30}$  para plantaciones superiores a 21 años de edad.**

Como se puede apreciar el diámetro medio en esta empresa no alcanza los 32 cm para edades superiores al turno que se implementa, solo a edades superiores a los 39 años se avizora un acercamiento de algunas plantaciones con valores altos, superiores a los 25 cm que no llegan a ser atípicos, esto

condiciona el desplazamiento del aprovechamiento final para edades superiores a los 30 años.

La (figura 3.2) muestra además problemas en el manejo silvícola de las plantaciones por el comportamiento casi homogéneo del diámetro para las diferentes edades, esto puede estar dado además coincidiendo con Aldana *et al.*, (2006) a que muchos de los sitios donde actualmente se encuentran estas plantaciones eran los biotopos naturales de *Pinus tropicalis* Morelet, los que fueron eliminados por los planes de talas de la ordenación del año 1986.

Basándose en el comportamiento del crecimiento de la especie en volumen, se corrobora lo analizado hasta el momento mediante el estudio del Incremento Corriente Anual (ICA) y del Incremento Medio Anual (IMA).

Para ello se obtuvo como el modelo de crecimiento en volumen de mejor ajuste el de Chapman-Richads, con los valores de los coeficientes de correlación de Pearson  $R=0,88$ ; de determinación  $R^2=0,77$  más altos y el error de estimación  $S_x=0,504$  más bajo.

Además de comprobada la relación significativa entre las variables mediante el ANOVA  $\alpha<0,05$  (anexo 2) y contrastada la hipótesis nula de que los coeficientes de regresión valen cero en la población como se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Coeficientes de regresión parcial.**

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.
	B	Sx	Beta			
$\ln\beta_0$	6,405	,066			97,770	,000
$\beta_1$	2,522	,086	,878		29,354	,000

Sustituyendo los coeficientes no estandarizados la ecuación queda definida por:

$$V=604,7252*(1-e^{-0,05*A})^{2,52} \quad [15]$$

Obtenido el modelo se procedió por el proceso de derivación a la determinación de las ecuaciones de Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) como muestra la tabla 3.3.

**Tabla. 3.3-Ecuaciones de Incremento Corriente Anual e Incremento Medio Anual.**

Modelo	Incremento corriente anual (ICA)	Incremento medio anual (IMA)
Chapman-Richards	$ICA = \frac{\beta_1 \beta_2 e^{-\beta_1 t}}{(1 - e^{-\beta_1 t})} * y \quad [18]$	$IMA = \frac{y}{t} \quad [19]$

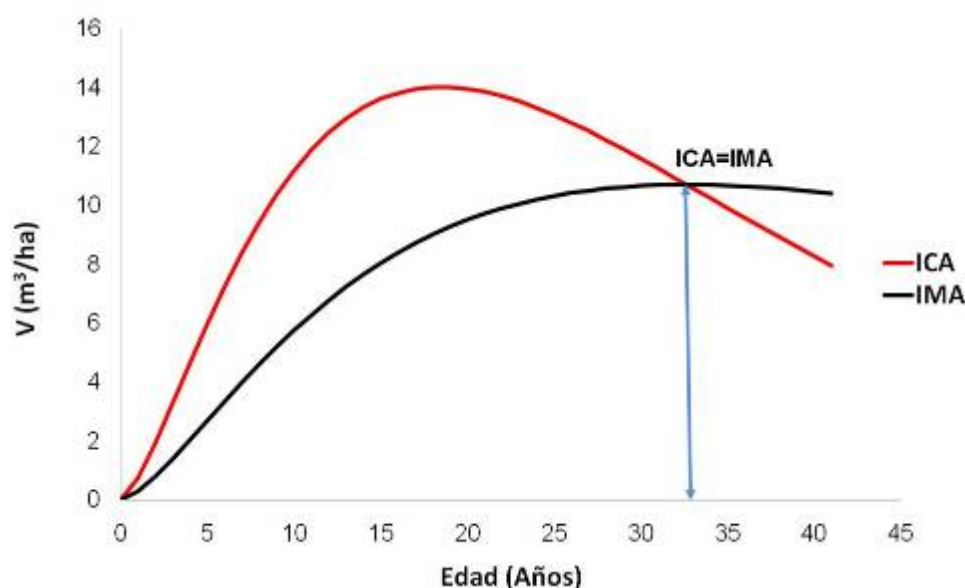
Donde: y: Función integral; ICA: Incremento corriente anual; IMA: Incremento medio anual; t: Edad (años);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  parámetros de regresión.

Así como los puntos de culminación para cada incremento (PCICA y PCIMA) (tabla 3.4).

**Tabla 3.4-Ecuaciones para obtener el punto de culminación del Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA).**

Modelo	Punto de Culminación ICA	Punto de Culminación IMA
Chapman-Richards	$PCICA = \frac{\ln(\beta_2)}{\beta_1} \quad [20]$	$\frac{\beta_1 PCIMA}{\beta_1 PCIMA} = \beta_2 \quad [21]$ donde: PCIMA > PCICA

Una representación de las curvas se muestra a continuación en la figura 3.3.



**Figura 3.3- Patrones de crecimiento e incremento en volumen de la especie.**

En esta figura se puede observar que el máximo crecimiento corriente anual es elevado y se alcanzó más rápidamente que el crecimiento medio anual. El máximo de la curva del crecimiento medio anual se sitúa en el momento donde corta a la del crecimiento corriente anual, hay pues igualdad entre estos dos crecimientos a esta edad, lo cual corresponde también al instante donde se puede trazar la tangente a la curva de la producción total ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) que pasa por el origen de coordenadas, lo que concuerda con Pardé y Bouchon (1994) en que el máximo ICA sucede a la edad de 20 años, mientras que el máximo IMA se encuentra a la edad de 33 años coincidiendo con el punto de intersección donde  $\text{ICA} = \text{IMA}$ .

Cuando el IMA alcanza su máximo valor, se define en los sistemas de manejo forestal como el mejor momento, desde el punto de vista silvicultural, indicando así la edad óptima de rotación técnica del rodal, también conocido como rotación comercial, momento en que debe ser procesada la explotación forestal. Cuando



en esa edad los árboles del rodal no han alcanzado aún el diámetro mínimo deseado o establecido, en función del destino al que se desea la producción forestal, se debe proceder a la aplicación de alguna acción silvicultural (raleo, poda, fertilización del terreno u otro), para que el rodal retome el crecimiento y los individuos arbóreos puedan ingresar en la correspondiente explotación forestal.

Estos resultados del crecimiento medio anual se encuentran en correspondencia con lo reportado por Herrero *et al.*, (1985) para diferentes sitios de Alturas de Pizarra en plantaciones de 12 años de edad con mantenimiento y tratamientos silviculturales de baja intensidad, donde en el sitio de mejor calidad obtuvo un IMA de 13,76 m<sup>3</sup>/ha/año, en los sitios intermedios entre 6,32 m<sup>3</sup>/ha/año y 8,34 m<sup>3</sup>/ha/año; así como los encontrados por Matos, (1972) en la unidad de manejo los “Ocujes” perteneciente a dicha empresa donde con 8 años de edad una plantación de la especie obtuvo un incremento a razón de 9 m<sup>3</sup>/ha/año; pero a su vez difieren con el propio autor donde una plantación con un manejo adecuado experimentó incrementos de 18,71 m<sup>3</sup>/ha/año a los 11 años de edad, lo cual está por encima del comportamiento obtenido en este trabajo.

El turno de corta en este trabajo se ubica entonces entre los 30 y los 35 años para la especie, este resultado se corresponde con el obtenido por Aldana *et al.*, (2009) para las condiciones de sitio de la EFI Viñales mediante un análisis económico sobre un criterio de cortabilidad financiero; así como por Herrero *et al.*, (1985) quienes sugieren un turno de corta para *Pinus caribaea* var. *caribaea* en Alturas de Pizarra entre los 25 y los 30 años, de acuerdo con las condiciones de sitio y su silvicultura, sugiriendo además considerar la realización de un

raleo adicional a los 25 años de edad con el objetivo de aumentar la productividad de las masas.

La variedad *hondurensis* ha experimentado resultados similares (Fierros, 1989; Montero, 1992; Montero y Fierros, 2002) en sitios de Oaxaca, México, donde la culminación de los IMA para el volumen comercial se ubica entre las edades de 30-35 años y de 25-30 años con valores de 14, 17 y 21 m<sup>3</sup>/ha/año para los índices de sitio 12, 15 y 18 respectivamente, fijando un turno alrededor de los 31 años de edad.

Para el logro de un enfoque en el manejo forestal hacia la rentabilidad y sostenibilidad, Jiménez *et al.*, (1998) expresan que deberá tomarse como punto de referencia las normas que el manejo forestal impone al bosque, respetándose las condiciones mínimas de persistencia, rentabilidad y máximo rendimiento, y donde los turnos financieros y tecnológicos se favorezcan del turno físico.

En correspondencia con estos autores, a partir del turno propuesto es posible inferir que el mismo traería consigo diferentes beneficios económicos. Pudiera decirse que con éste, la amortización de la inversión se realizaría de forma mejor organizada y con márgenes de utilidades más positivos, por ejemplo, solo por concepto de producción mercantil las acumulaciones silvícolas procedentes del raleo y la resinación, generarían mayores oportunidades al productor para incorporar ingresos antes del aprovechamiento de la producción preferente.

Al realizar el raleo III el cual deberá efectuarse, según Suárez *et al.*, (2002) con más de 26 años, es posible considerar un aumento en diámetros superiores, lo que favorecería la campaña de resinación con una mayor cantidad de individuos en la clase diamétrica 20 cm donde se localiza el diámetro mínimo para este proceso.

También, otro de los beneficios que pudiera especularse, basados en elementos de la valoración de montes, es el despiece comercial de la masa. Si se analiza una plantación a los 21 años y luego a los 30 bajo el mismo régimen de manejo y cuyo objetivo productivo sea obtener madera aserrable, se derivará un porcentaje de esta producción preferente mayor a los 30 años que a los 21, en correspondencia con el predominio de clases diamétricas superiores que reúnen las exigencias para el aserrado.

De todo lo anterior se infiere que a los 30 años se puede lograr un uso más racional de la masa, un aprovechamiento integral de los fustes y una disminución considerable de los residuos que se generan durante su producción; por tanto, las utilidades se incrementarían en comparación con el turno 21.

Según la FAO (2010), en los últimos 10 años ha existido un movimiento por parte de la mayoría de los países en cuanto a la promoción y utilización de los productos forestales no maderables, así como, del incremento de los servicios ambientales que generan los bosques de acuerdo con las iniciativas por parte de cada grupo interesado.

Sobre la base de este planteamiento entonces, pudiera concluirse que al desplazarse el turno de corta de una plantación, los servicios ambientales crecerían, contribuyendo a la protección y conservación de los múltiples componentes del ecosistema forestal (suelo, fauna, clima entre otros) durante un periodo de tiempo más largo, de igual forma, pudiera verse favorecida, la generación de una mayor cantidad de productos forestales no maderables.

### **3.2 Modelo de crecimiento de masa.**

En Cuba la construcción de las curvas de índices de sitio en su totalidad han sido realizados sobre principios anamórficos, basados sobre la hipótesis de la

relación altura-edad para los diferentes sitios con una tendencia constante independientemente de la edad. La construcción de las curvas de índices polimórficas no ha sido posible debido a la inexistencia de largas series cronológicas que permitan explicar la evolución dasométrica en plantación o bosque natural mediante parcelas permanentes o análisis fustal.

Zaldívar (2000) hace referencia a este aspecto al citar: “Con grandes sacrificios desde el triunfo revolucionario, se acometieron ambiciosos planes de reforestación, pero no se les pudo brindar a las plantaciones establecidas las atenciones necesarias y menos aún algo tan elemental e importante como el registro histórico del desarrollo de las mismas (por ejemplo una adecuada red de parcelas permanentes, lo cual hubiese constituido una fuente de inestimable valor para realizar los estudios necesarios para poder planificar sobre bases sólidas el manejo sostenible”. Por ello en este trabajo se cuenta con datos provenientes de tres fuentes: parcelas temporales, permanentes y análisis de fuste con el objetivo de acercar más a la realidad el comportamiento de la relación altura-edad-índice de sitio.

La dificultad de la utilización de series de crecimiento provenientes de árboles tipo radica en la existencia de diferencias significativas de la estimativa de la edad obtenidas por el conteo de los anillos de crecimiento con las edades reales provenientes de registro de ordenación de la empresas forestales integrales, en correspondencia con lo encontrado por De Nacimiento (1983) en el análisis de los fustes de los 4 pinos cubanos, ello corroborado por un análisis realizado en unidad mixta de investigación INRA-AgroParisTech laboratorio de Nancy Francia, con muestras proveniente de la empresa forestal Macurije Nepveu (2008); esto unido a las pocas mediciones de las parcelas de crecimiento

dificulta la construcción de curvas de crecimiento polimórficas o la incursión en curvas ana-polimórficas y poli-anamórficas propuestas por Torres (2001). Por otro lado de acuerdo con Pardé y Bouchon (1994) en la utilización del análisis de fuste en el establecimiento de tablas de producción o modelos de crecimiento de masas, el árbol seleccionado como tipo de la masa puede no serlo verdaderamente; por otro lado, los raleos extraen como regla general, árboles cuyo volumen medio sea inferior al de los árboles que quedan en pie, en cada aclareo la altura media aumenta bruscamente, por el hecho de que la población base cambia.

Por lo que solo es posible en este trabajo la construcción de curvas anamórficas para tener una mayor confiabilidad estadística incluyendo para el análisis las tres fuentes: análisis fustal, unidades muestrales permanentes y unidades muestrales temporales, las cuales completan series cronológicas de crecimiento con un mayor rango de datos para los diferentes escenarios silvícolas de la especie en plantación.

Si se utilizan solamente unidades temporales, se corre el riesgo por lo general que las masas de mayor calidad sean explotadas mucho antes que el resto; una vez representado en el gráfico de dispersión  $\bar{h} = f(\text{edad})$  se observará un déficit importante de esas masas para edades superiores, por lo que utilizando solamente estas unidades se presenta una disminución del crecimiento de la altura dominante.

Como resultado del análisis para verificar la homogeneidad de los datos de las tres fuentes se obtiene la tabla 3.5.

**Tabla 3.5-Prueba de homogeneidad de varianzas.**

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
$d_{1,30}$	,404	2	760	,668

El valor del estadístico de Levene con su significación en la (tabla 3.5) permite aceptar la hipótesis de igualdad de varianza ( $\alpha > 0,05$ ) de las tres poblaciones definidas para las tres fuentes: parcelas permanentes, parcelas temporales y análisis fustal.

Como resultado del ajuste de los modelos seleccionados (Shumacher y Chapman-Richards) con diferentes valores tentativos de  $\beta_2$ , la tasa de velocidad del crecimiento para el modelo de Shumacher  $\beta_2 = 0,2$  se considera fuera del comportamiento del crecimiento de la especie, por presentar un valor asintótico elevado  $\ln\beta_0 = 6,31$  con  $\beta_0 = 552,26$ , en este caso el valor no se corresponde con la máxima altura reportada para la especie en el país ni en la región, por lo que se consideró excluido.

Según Alder (1980) para este modelo, los valores  $\ln\beta_0$  pueden encontrarse entre 2 a 7, donde a partir de 4 el máximo crecimiento de las especies deja de ser lógico pues la altura dominante alcanza valores muy elevados, por lo que se acudió a fijar valores teniendo el conocimiento de la máxima altura que alcanza la especie para esta área, en correspondencia con lo reportado por Montero y Fierros (2002). Aún así se encuentran trabajos que no tienen en cuenta este aspecto como los realizados por García *et al.*, (2004) para la especie en la tabla de producción para la empresa objeto de estudio con valores de  $\ln\beta_0 = 4,859$  con  $\beta_0 = 129$ ; o para el *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret y Golfari por Groothausen y Ferreira (1989) en Olancho, Honduras, con valores de  $\ln\beta_0 = 6,11$  con  $\beta_0 = 448,27$ , alcanzando su máximo valor correspondiente por el método a

una altura máxima en un número de años lo suficientemente extenso, no propio de especies de crecimiento rápido como es la especie objeto de estudio.

Al profundizar en el análisis y otorgándole otros valores a  $\beta_2$  se obtuvo como los modelos de menor valor de la suma de cuadrados de los residuos o desviaciones (SCE), Shumacher con  $\beta_2=0,25$  y Chapman-Richards con  $\beta_2=0,101$ .

Ambos modelos cumplen los supuestos teóricos: normalidad, homocedasticidad e independencia serial de los residuos, representados en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6- Estadísticos empleados para la verificación de supuestos.**

Modelo		Normalidad	Homocedasticidad	Autocorrelación
Chapman-Richards	valor	0,186	,921	1,592
$\beta_2=0,101$	v-p	0,077	,579	
Shumacher $\beta_2=0,25$	valor	0,186	,921	1,544
	v-p	0,166	,579	

El no cumplimiento de los supuestos de normalidad, homocedasticidad, e independencia serial de los residuos, tiene diversos efectos en el método de mínimos cuadrados ordinarios, básicamente tienen relación en que: las pruebas de significancia (hipótesis) no son validadas, los estimadores son ineficientes (aunque siguen siendo insesgados), y los estimadores de las varianzas son sesgados. Además, dado que el objetivo final del estudio es desarrollar modelos que sean aplicados a los rodales de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la EFI Macurije, es importante contar con las mayores confianzas probabilísticas y de inferencia posibles de los parámetros ajustados en los

modelos, por lo que el cumplimiento de los supuestos que sustentan el análisis de regresión son vitales.

La bondad de ajuste de cada una de las ecuaciones analizadas se puede apreciar en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7- Bondad de ajuste de los modelos analizados.**

Modelo	R	$R^2$	$R^2$ corregida	Sx
Shumacher $\beta_2=0,25$	,862	,743	,742	,225
Chapman-Richards $\beta_2=0,101$	,869	,756	,755	,224

Como se observa en la (tabla 3.7) el modelo de Chapman-Richards posee un mejor comportamiento de los coeficientes de correlación (R), coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y error de estimación (Sx).

Este modelo tiene un mejor comportamiento en su bondad de ajuste que el encontrado por García *et al.*, (2004) en este mismo sitio con el modelo Shumacher  $\beta_2=0,2$ , con un  $R=0,86$  y un  $R^2=0,74$ .

Al analizar las capacidades predictivas de los modelos, se obtuvo una exactitud global satisfactoria con valores de RECM de 4,61 % para Shumacher  $\beta_2=0,25$  y 3,61 % Chapman-Richards  $\beta_2=0,101$ , muy por debajo del 10 %, lo cual indica un buen comportamiento predictivo, así el modelo idóneo resulta el de Chapman-Richards con  $\beta_2=0,101$  por poseer el menor valor de este estadístico. Este análisis es corroborado por el (anexo 3) donde se muestra la distribución de los residuos la cual indica una varianza constante de los mismos, y aumenta la confianza estadística en el empleo de este modelo.



En la (tabla 3.8) de resumen de ANOVA se puede observar que existe una relación significativa entre las variables  $\alpha < 0,05$ , el estadístico F contrasta la hipótesis nula de que el valor poblacional de R es cero.

**Tabla 3.8- Relación significativa entre las variables.**

	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Regresión	39,824	1	39,824	791,196	,000
Residual	12,885	256	,050		
Total	52,709	257			

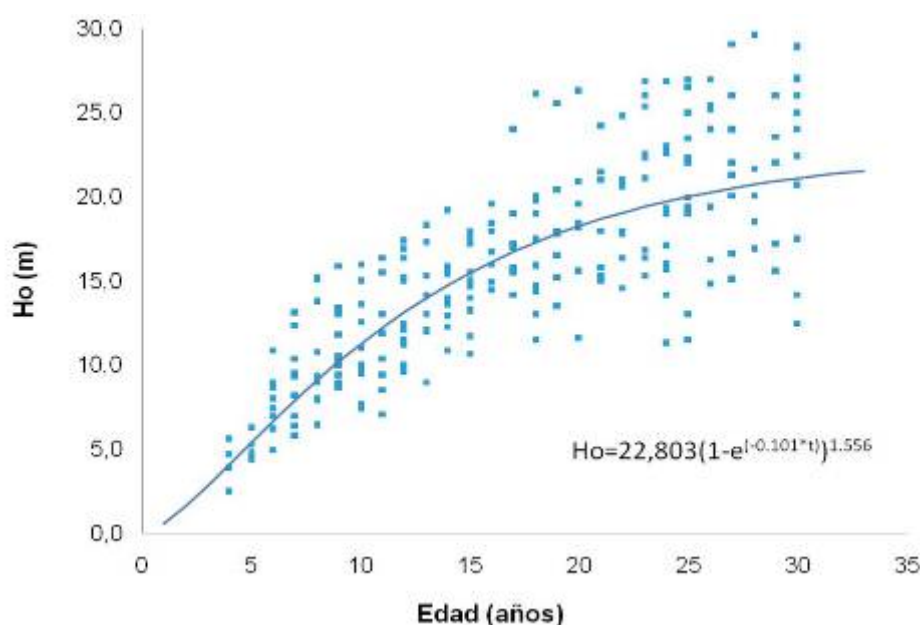
Por su parte en la (tabla 3.9) el valor t y sus niveles críticos (sig) contrastan la hipótesis nula de que los coeficientes valen cero en la población  $\alpha < 0,05$ , la pendiente poblacional de la recta de regresión es significativamente distinta de cero, lo que nos permite concluir que entre la altura dominante y la edad existe una relación lineal significativa; según este comportamiento la ecuación vendría dada por:

$$\ln H_o = \ln 3,127 + 1,556 \cdot \ln(1 - e^{(-0,101 \cdot t)}) \quad \text{o} \quad H_o = 22,803 \cdot [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556} \quad [16]$$

**Tabla 3.9- Coeficientes de la recta de regresión.**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.
	B	Sx	Beta	B	Sx	
$\ln \beta_0$	3,127	,022			145,315	,000
$\beta_1$	1,556	,055	,869		28,128	,000

En la (figura 3.4) se muestra el ajuste de la ecuación media de  $H_o$  para la especie en la EFI Macurije.



**Figura 3.4- Curva del comportamiento medio de la altura dominante.**

Después del ajuste de la ecuación media se determinan las curvas para cada índice de sitio, al tener como pendiente común  $\beta_2=1,556$  se define el índice de sitio como la altura dominante de la masa a una edad índice de 30 años, esto se encuentra en correspondencia con lo encontrado en la literatura sobre los turnos para la especie. Se propone además diferenciar las calidades de sitio con intervalos de 3 metros, lo que coincide con los empleados para la especie por Gra *et al.*, (1990) en cuatro localidades del país donde se encuentra la provincia de Pinar del Río; por García (2004); García *et al.*, (2004) también en esta provincia, para otras especies de pinos, como en *Pinus tropicalis* Morelet por Padilla (1999); en *Eucalyptus sp* por Peñalver (1991) y en latifolias como *Hibiscus elatus* por Zaldívar (2000). Los índices de sitio propuestos en las condiciones de estudio son los siguientes: 13, 16, 19, 22, 25, 28; para los que se obtienen los siguientes valores de  $\beta_0$  en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10- Valores de la constante u origen para cada IS.**

IS	$\beta_0$
13	13,613
16	16,754
19	19,895
22	23,037
25	26,178
28	29,319

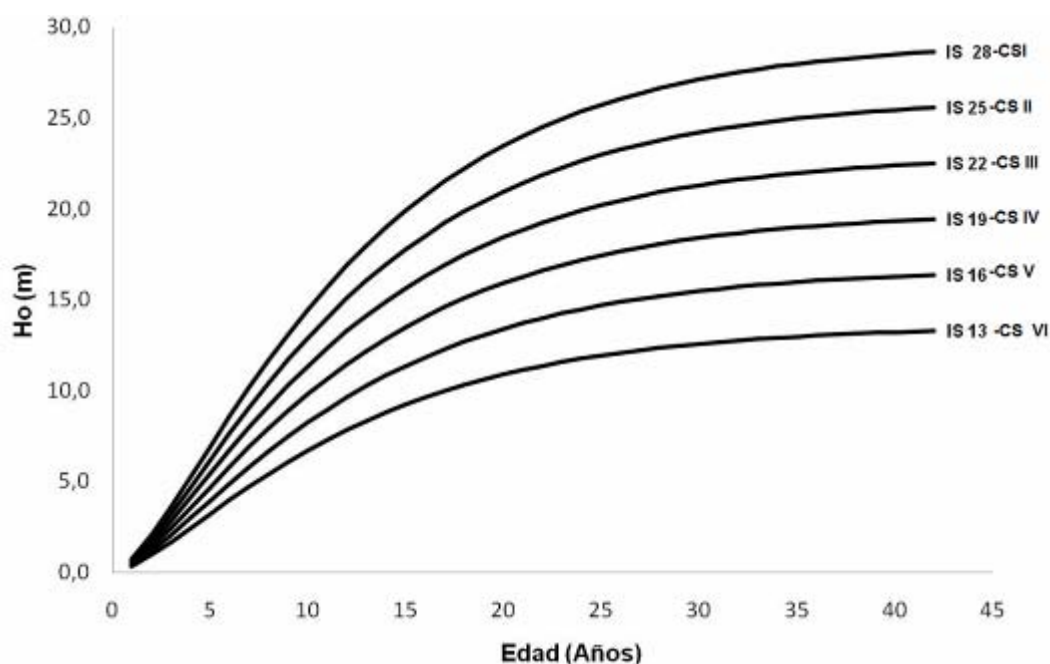
Al sustituir los valores de  $\beta_0$  en la ecuación para cada curva de índice de sitio, puede calcularse los valores de  $H_0$  para valores seleccionados de edad, como resultado se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones para la calidad de sitio:

Calidad de sitio    IS

Ecuación

VI	13 m	$H_0 = 13,613 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[17]
V	16 m	$H_0 = 16,754 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[18]
IV	19 m	$H_0 = 19,895 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[19]
III	22 m	$H_0 = 23,037 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[20]
II	25 m	$H_0 = 26,178 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[21]
I	28 m	$H_0 = 29,319 [1 - e^{(-0,101 \cdot t)}]^{1,556}$	[22]

Estas ecuaciones quedan representadas en el haz de curvas de índices de sitios de la figura 3.5.



**Figura 3.5- Haz de curvas de índices de sitios para la altura dominante.**

Una vez elaborado este sistema de ecuaciones, el índice de sitio para una observación seleccionada de altura-edad viene dado por:

$$IS = Ho * \left[ \frac{1 - e^{(-0.101 * t_i)}}{1 - e^{(-0.101 * \tau)}} \right]^{1.556} \quad [23]$$

Esta ecuación permite conocer para una observación dada de altura dominante-edad con un  $t_i$  fijado, el índice de sitio al cual pertenece el área; esto facilita el trabajo de ordenación para la clasificación de los sitios.

La tendencia del crecimiento mostrada en estas curvas es similar a los reportados para la especie en el país (García, 1983, 2004; Gra *et al.*, 1990; García y Aldana, 2000; García *et al.*, 2004); e internacionalmente para la variedad *hondurensis* por (Groothausen y Ferreira, 1989; Fierros, 1989; Montero, 1992; Baldwin, 1997; Montero y Fierros, 2002); lo cual también justifica el modelo escogido y garantiza el resultado obtenido.

Este sistema permite la comparación con otras especies y dentro de la misma especie para otras regiones.

Las curvas de crecimiento obtenidas permiten clasificar las plantaciones en su productividad potencial y diferenciar claramente 6 calidades por lo que se considera que este estudio es de utilidad en la aplicación de los manejos silvícolas así como en el establecimiento del turno para el aprovechamiento final. Este modelo ha sido ampliamente utilizado y efectivo, estos resultados coinciden para otras especies de *Pinus* como *Pinus tropicalis* Morelet desarrollado por Padilla (1999); para *Pinus durangensis* por Monárrez y Maldonado (2003) y en especies de latifolias como *Hibiscus elatus* por Zaldívar (2000).

Elaborado el modelo de crecimiento de  $H_o$  con sus respectivas curvas por índices de sitio, se procedió a determinar los modelos de crecimiento para el resto de las variables dasométricas.

El (anexo 4) muestra la correlación existente entre las diferentes variables a través de la matriz de correlación de Pearson, donde se observa una fuerte correlación entre las variables altura dominante ( $H_o$ ), con el resto de las variables dasométricas, lo que deja demostrado el supuesto de que  $H_o$  para *Pinus caribaea* var. *caribaea* en plantación es el indicador más efectivo de la calidad de sitio, este resultado concuerda con el obtenido por Montalvo *et al.*, (2007) para sitios de San Pedro de Mayabón, en la provincia de Matanzas quienes demostraron mediante un análisis de varianza que para esta variable no hay diferencias significativas entre los diferentes espaciamientos, dentro de los cuales se encuentran los existentes para esta investigación. Se observa una correlación con la edad, con el  $\bar{d}_{1.30}$ ,  $N/ha$  y  $H$  favorecida por las características de la muestra, de poseer series de crecimiento provenientes de parcelas

permanentes y el análisis fustal, además de seleccionar rodales que cumplen con una densidad normal donde el área basal de la masa fue igual o aproximada a la tabulada en la tabla de tasación de los bosques de Cuba.

Estos resultados coinciden con los principios de establecimiento de los modelos de crecimiento o tablas de producción obtenidos para las diferentes especies en el país, e incorpora como una de las novedades, fuentes de datos con mediciones continuas y no como hasta el momento se han hecho con parcelas temporales en su totalidad.

Este comportamiento de las variables facilitó el ajuste de varios modelos matemáticos a partir de los conocimientos a priori, de las experiencias en esta área del conocimiento por investigadores nacionales tales como: García (1983, 2004); Gra *et al.*, (1990); Peñalver (1991); Báez *et al.*, (1991); Padilla (1999); Zaldívar (2000) y en el plano internacional Decourt (1972); Alder (1980); Ottorini (1981); Halminton *et al.*, (1981); Husch *et al.*, (1982); Fierros (1989), Montero (1992); Baldwin (1997); Martínez y Ferreira (2002), Gadow *et al.*, (2010).

Así resultó que para la variable  $\bar{h}$  el modelo con mejor ajuste fue el lineal, en función de la altura dominante, esta relación coincide con lo encontrado por Báez (1988) para *Casuarina equisetifolia* y para la especie objeto de estudio por García *et al.*, (2004) para estos mismos sitios.

Al analizar el supuesto de independencia serial se obtuvo un valor del estadístico de Durbin-Watson de 1,697, lo cual significa que los residuos son independientes entre sí para una mayor confiabilidad de los datos y del modelo; en relación a la bondad de ajuste se acepta la significancia estadística de los coeficientes no estandarizados (anexo 5), además de poseer los mayores valores de los coeficientes de correlación  $R=0,98$ , de determinación  $R^2=0,94$  y el

menor error típico de la estimación  $S_x = 1,1549$  representado por la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = -0,976 + 0,879H_0 \quad [24]$$

En el (anexo 6) se representa además la distribución de los residuos, no manifestándose una tendencia específica, lo cual indica homogeneidad de la varianza de los mismos, en relación a las capacidades predictivas posee el menor valor de RECM= 8,9 %, por lo que la exactitud global se considera satisfactoria, validando su empleo. Este modelo como se aprecia es sencillo, permite determinar el valor de la altura del árbol medio en función de variables como son la edad y el IS, fácil de obtener, todo esto incide en una disminución del tiempo y los costos por inventarios forestales para la toma de decisiones sobre la misma.

Luego se sustituyó el modelo de crecimiento de la altura dominante en este modelo siguiendo la metodología propuesta por García (2004); García *et al.*, (2004) y Maldonado (2010), las ecuaciones resultantes para cada índice de sitio quedan de la siguiente manera:

IS	Ecuación	
13 m	$\bar{h} = -0,976 + 0,879 * (13,613 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556})$	[25]
16 m	$\bar{h} = -0,976 + 0,879 * (16,754 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556})$	[26]
19 m	$\bar{h} = -0,976 + 0,879 * (19,895 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556})$	[27]
22 m	$\bar{h} = -0,976 + 0,879 * (23,037 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556})$	[28]
25 m	$\bar{h} = -0,976 + 0,879 * (26,178 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556})$	[29]

$$28 \text{ m} \quad \bar{h} = -0,976 + 0,879 * (29,319 [1 - e^{(-0,101 * A)}]^{1,556}) \quad [30]$$

Para el caso específico del diámetro del árbol medio de la masa fue conveniente la utilización de regresión no lineal, debido a que los modelos analizados por regresión lineal no mostraron un comportamiento lógico, valores asintóticos muy bajos y en algunos casos negativos, no siendo así con el modelo propuesto en función de la altura dominante, variable indicadora de la edad y dependiente del sitio, lo cual se encuentra en correspondencia con lo encontrado por García *et al.*, (2004) y Rodríguez *et al.*, (2009) para la especie y por Peñalver (1991) para *Eucalytus sp.* El modelo tuvo como bondad de ajuste un coeficiente de determinación  $R^2=0,94$  y los menores valores de errores típicos de los coeficientes estimados (anexo 7), se sustituyeron los coeficientes estimados y la ecuación queda representada de la manera siguiente:

$$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 H_o^{0,7} \quad [31]$$

En relación a las capacidades predictivas del modelo, presentó el menor valor de RECM= 9,3 % por lo que la exactitud global es factible, analizando además el comportamiento de los residuos (anexo 8) donde se obtuvo al igual que en el caso del modelo para la altura del árbol medio, no se percibe tendencia alguna en el sesgo del modelo lo que hace efectiva su utilización; el modelo obtenido emplea solamente una variable predictora  $H_o$  con la cual se encuentra fuertemente correlacionada, la misma es fácil de obtener al contar ya con un modelo en función de la edad dependiente del sitio. Al sustituir la ecuación de la altura dominante para un índice de sitio el sistema de ecuaciones queda representado de la forma siguiente:



IS	Ecuación
13 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (13,613 [1 - e(-0,101 * t)]^{1,556})^{0,7}$ [32]
16 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (16,754 [1 - e(-0,101 * t)]^{1,556})^{0,7}$ [33]
19 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (19,895 [1 - e(-0,101 * t)]^{1,556})^{0,7}$ [34]
22 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (23,037 [1 - e(-0,101 * t)]^{1,556})^{0,7}$ [35]
25 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (26,178 [1 - e(-0,101 * t)]^{1,556})^{0,7}$ [36]
28 m	$\bar{d}_{1,30} = 0,12 + 2,458 (29,319 [1 - e(-0,101 * A)]^{1,556})^{0,7}$ [37]

Este sistema permite evaluar el diámetro del árbol medio para tomar decisiones sobre tres aspectos de vital importancia en la producción forestal: fijación de turnos tecnológicos (edad donde el rodal alcanza el diámetro mínimo para aserrar), permanencia de la especie en los sitios más pobres o su sustitución por especies más tolerantes a condiciones extremas como el caso del *Pinus tropicalis* Morelet, o un cambio en los esquemas de regímenes de manejos implementados hasta el momento.

Para el caso del área basal por hectáreas (G/ha), se obtuvo un modelo por regresión lineal en función de la altura dominante el cual cumplió con el supuesto de independencia de los residuos con un valor del estadístico de Durbin-Watson de 1,61, la mejor bondad de ajuste, con la significancia estadística de los coeficientes no estandarizados  $\alpha < 0,05$  (anexo 9), con los valores más altos de los coeficientes de correlación  $R=0,95$ , de determinación de  $R^2=0,90$ , de determinación corregido  $R^2_{\text{corregido}}=0,90$ , y el menor valor del error típico de la estimación  $S_x=0,172$ , la ecuación queda representada de la siguiente manera:

$$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{H_0}} \quad [38]$$

Este modelo fue utilizado por García *et al.*, (2004) para la especie en diferentes empresas de la provincia de Pinar del Río con muy buenos resultados, es por ello que ofreció el mejor comportamiento estadístico, y coincide además con Benett *et al.*, (2010) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Nueva Zelanda. Al analizar los residuos (anexo 10), no se aprecia heterogeneidad de varianza lo cual indica que sea constante; en relación a las capacidades predictivas del modelo se obtuvo un valor de RECM de 8,6 % todo ello demuestra la eficacia para la utilización del mismo.

Al sustituir la altura dominante en la ecuación anterior se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

IS	Ecuación
13 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(13,613 [1 - e(-0,101 \cdot t)]^{2,446})}} \quad [39]$
16 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(16,754 [1 - e(-0,101 \cdot t)]^{2,446})}} \quad [40]$
19 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(19,895 [1 - e(-0,101 \cdot t)]^{2,446})}} \quad [41]$
22 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(23,037 [1 - e(-0,101 \cdot t)]^{2,446})}} \quad [42]$
25 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(26,178 [1 - e(-0,101 \cdot t)]^{2,446})}} \quad [43]$
28 m	$G = e^{\frac{3,900 - 13,073}{(29,319 [1 - e(-0,101 \cdot A)]^{2,446})}} \quad [44]$

Este sistema de modelos permite conocer y tomar decisiones sobre esta variable, debido a que la misma es la medida más simple y más usada como

índice de densidad de las masas forestales y por ser la variable con más peso en la determinación del volumen, su obtención en función de la altura dominante como indicador de la edad dependiente de la calidad de sitio, es de gran importancia para la silvicultura de la empresa, ya que posibilita una planificación más eficiente del raleo sin la necesidad de esperar a un inventario para su ejecución.

La etapa final de un sistema de predicción del rendimiento para un rodal individual, en coincidencia con lo expresado por Alder (1980), es usar la predicción de las variables altura dominante, área basal y diámetro del árbol medio en la predicción del volumen total. Para el caso de esta variable se ponderó con el área basal debido a que el error de estimación de los residuales tiende a ser aproximadamente proporcionales a los volúmenes, el grado de ajuste de los modelos de volumen en función de estas variables es usualmente alto, con coeficientes de correlación que exceden a 0,99.

El modelo se obtuvo al igual que en el  $d_{1,30}$  por regresión no lineal, justificada por un comportamiento atípico de los modelos ajustados por regresión lineal para esta variable. El modelo presentó una bondad de ajuste con un coeficiente de determinación de  $R^2=0,96$ , y con los menores errores típicos de los coeficientes estimados (anexo 11), a continuación se sustituyeron los coeficientes estimados y la ecuación quedó representada de la siguiente forma:

$$V = 0,211G + 0,343G^2 + 0,003GHo \quad [45]$$

La nube de puntos de los residuos en función del valor predicho en el (anexo 12) es independiente, además de que no muestra una tendencia ni lineal ni de otra índole en la distribución, lo cual demuestra la existencia de una varianza

constante, y hace confiable el modelo obtenido a la hora de inferir el proceder de esta variable. Este modelo ha sido empleado por Rodríguez *et al.*, (2009) y Benett *et al.*, (2010) para la variedad *hondurensis* con el empleo de regresión no lineal, los que han obtenido coeficientes de determinación de 0,98 y 0,99 respectivamente, en correspondencia con la productividad real de los sitios en esta empresa.

El empleo de la altura dominante como el indicador de la edad dependiente del sitio y el área basal como indicador de la densidad de la masa en este modelo, permite al gestor del manejo un conocimiento bastante aproximado de la cantidad de metros cúbicos con que cuenta en un rodal a cualquier edad por índice de sitio, lo que facilita una mejor planificación y control del manejo y aprovechamiento de las masas, además de permitir fijar turnos financieros para cada calidad de sitio, obteniéndose una mayor ganancia económica que la que actualmente se obtiene en esta empresa.

### **3.3 Ecuación del perfil del fuste y grosor de corteza.**

La existencia de un modelo de perfil del fuste para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en Cuba puede juzgar de innecesario la realización de este trabajo, la cuestión es que el modelo con que hasta el momento se cuenta para la especie, para las condiciones de los bosques cubanos, fue realizado como un estudio de caso por Ares (1999) en bosques naturales de la EFI La Palma.

Como bien quedó explicado en el marco teórico de esta tesis, cada situación (bosque natural o plantación) en función de la densidad existente además de otros factores que para cada caso son diferentes condicionan la forma fustal en particular, el modelo establecido para los bosques naturales de la especie no

garantiza un ajuste adecuado a la forma del fuste del árbol en plantación, ya que el mismo debido a las características propias de este tipo de formación, tiene un comportamiento lineal y no estima  $d=0$  cuando la altura relativa se iguala a la altura total, propiedad deseable de cualquier función de perfil; así se trabajó en función de obtener un modelo con esta característica.

Se analizó la correlación entre las variables a modelar con las previstas como variables independientes, en este caso la altura total (ht), el diámetro a 1,30 ( $dcc_{1,30}$ ) y el grosor de corteza 1,30 ( $e_{1,30}$ ) obteniéndose la tabla 3.11.

**Tabla 3.11- Matriz de correlación de las variables del perfil del fuste y grosor de corteza.**

		h	dcc	dsc	e	ht	dcc1.30	e1.30
dcc	Correlación de Pearson	-,760**	1	,996**	,767**	,358**	,508**	,502**
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,000	,000	,000
	N	4824	4824	4824	4824	4824	4824	4812
dsc	Correlación de Pearson	-,729**	,996**	1	,705**	,387**	,538**	,465**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000	,000	,000	,000
	N	4824	4824	4824	4824	4824	4824	4812
e	Correlación de Pearson	-,781**	,767**	,705**	1	,053**	,167**	,627**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,000	,000
	N	4824	4824	4824	4824	4824	4824	4812

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

En esta tabla se evidencia las correlaciones altamente significativas  $\alpha < 0,01$  de las variables analizadas, aceptándose la hipótesis nula de independencia lineal, incluso para valores de  $R=0,053$ , influido por el tamaño de muestra ( $N=4824$ ) y la gran similitud entre individuos, se observa la fuerte correlación entre el diámetro con corteza y el diámetro sin corteza con un valor de  $R= 0,996$  y de ambas con el grosor de corteza, y la altura desde la base del árbol hasta el punto donde alcanza el diámetro d, no siendo así con la altura total. Esto último

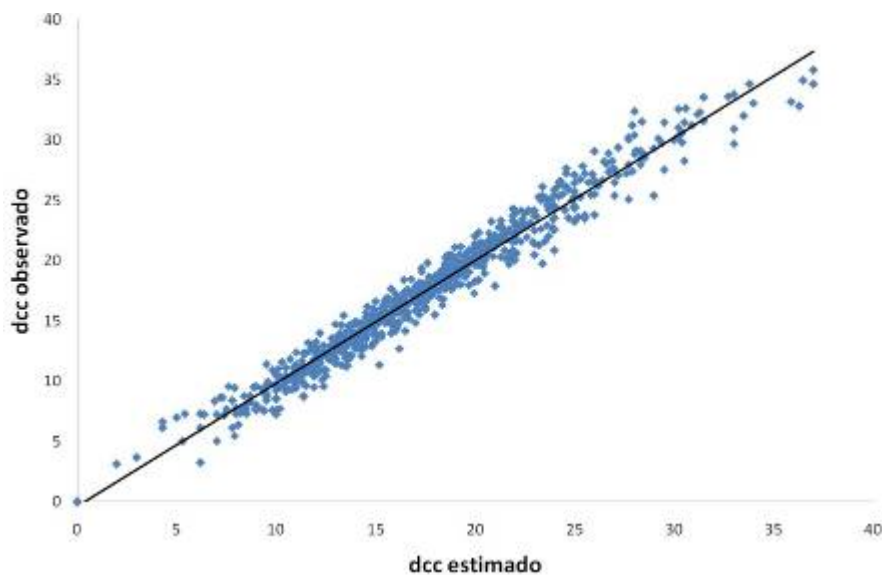
se justifica por heterogeneidad de las alturas totales de los individuos en la población, de ahí la necesidad de tomar como variables dependientes las ponderaciones con el diámetro a 1,30 m y no con la altura total como se ha empleado para la especie; como variable independiente una ponderación de la altura desde la base del árbol hasta el punto donde alcanza el diámetro  $d$  con la altura total, para poder comparar árboles con diferentes alturas, restándole 1 a esta ponderación para lograr obtener un diámetro cero cuando la altura total se iguala a la  $h$ , este procedimiento ha sido empleado por Kosak (1969); Kosak *et al.*, (1969); Max y Burkhardt (1976) con efectividad.

De los 16 modelos analizados solo 5 mostraron un buen comportamiento en lo referente a los supuestos teóricos de la regresión lineal, los mismos presentaron una bondad de ajuste aceptable (anexo 13) con coeficientes de determinación y de determinación corregido superiores 0,92, además de errores típicos de estimación por debajo de 0,078 muy en correspondencia con lo reportado por Ares (1999) para la especie, no siendo necesario además acudir al cálculo del Índice de Furnival porque los modelos obtenidos se encontraban en un mismo plano muestral.

La presencia de un modelo sin intercepto como el de Kosak (1969) requirió no establecer un juicio inmediato por el autor del mejor comportamiento de ajuste debido a que estos estadísticos de bondad de ajuste le brindan a un modelo sin intercepto otra interpretación, por lo que no es hasta la siguiente etapa donde se ubicaron la totalidad de los modelos en un mismo plano de comparación que se determinó el modelo idóneo.

Del análisis de las capacidades predictivas resultó precisamente el modelo 4 de Kosak sin intercepto el de mejor predicción con un valor de RECM=0,182 y de exactitud y de DIFA=-0,138 más bajos.

Se obtuvo una exactitud global satisfactoria (no segregando por clases de validación) al igual que el análisis del sesgo, para la totalidad de los modelos. El resultado presentado garantiza una confiabilidad de la utilización del modelo que hasta el momento cumple con la mayor confianza estadística, en la siguiente etapa esto se confirma totalmente.

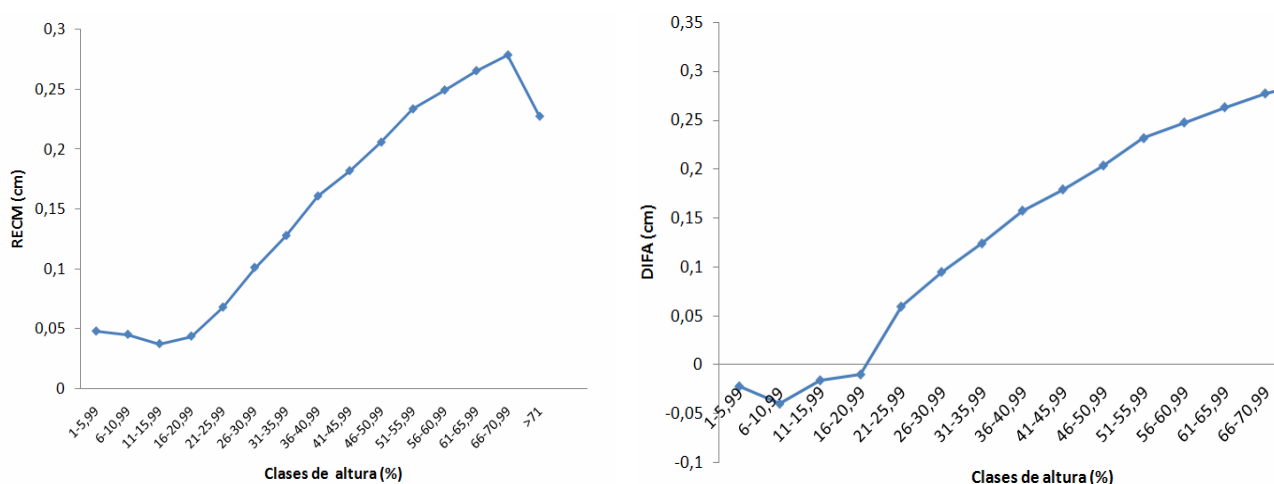


**Figura 3.6- Grado de exactitud del modelo propuesto para la totalidad de la muestra analizada.**

La (figura 3.6) demuestra el grado de adecuación del modelo propuesto, donde se obtuvo una fuerte correlación entre el diámetro estimado y el diámetro observado, ello unido al gráfico del (anexo 14) donde se percibe la inexistencia de independencia de los residuos debido al componente no lineal ( $dcc=0$  cuando  $hi=ht$ ), el cual favorece que a medida que los diámetros aumentan decrecen los residuos.

Por otra parte se observa que los residuos se encuentran prácticamente entre paralelas lo que indica homogeneidad de varianza, este resultado se encuentra en correspondencia con lo reportado por García (1995) en relación a que los supuestos necesarios para la optimalidad de los mínimos cuadrados en la modelación del perfil del fuste están lejos de cumplirse, el supuesto de independencia se hace insostenible, ya que en un árbol determinado, diámetros cercanos tienden a desviarse del promedio en la misma dirección. El supuesto de homocedasticidad es poco realista, al considerar que hay puntos perfectamente conocidos (el ápice y posiblemente el  $d_{1,30}$ ) cerca de los cuáles los errores deberían ser más pequeños, por lo general esto no es así.

El análisis de las capacidades predictivas dentro de las clases de validación muestra el comportamiento (figura 3.7) para todo el perfil del fuste.



**Figura 3.7-Tendencias del RECM y DIFA por clase de h en %.**

En esta figura se puede constatar que la exactitud de los modelos disminuye a medida que la altura aumenta para las clases de alturas superiores, por otra parte el sesgo aumenta levemente con una tendencia a la subestimación como promedio, esto se debe básicamente a que los árboles presentan una mayor



dispersión en el diámetro a medida que su tamaño aumenta, forzando a este modelo a estimar valores cercanos a esas observaciones, muy por encima de la moda de los árboles que forman parte de esa clases.

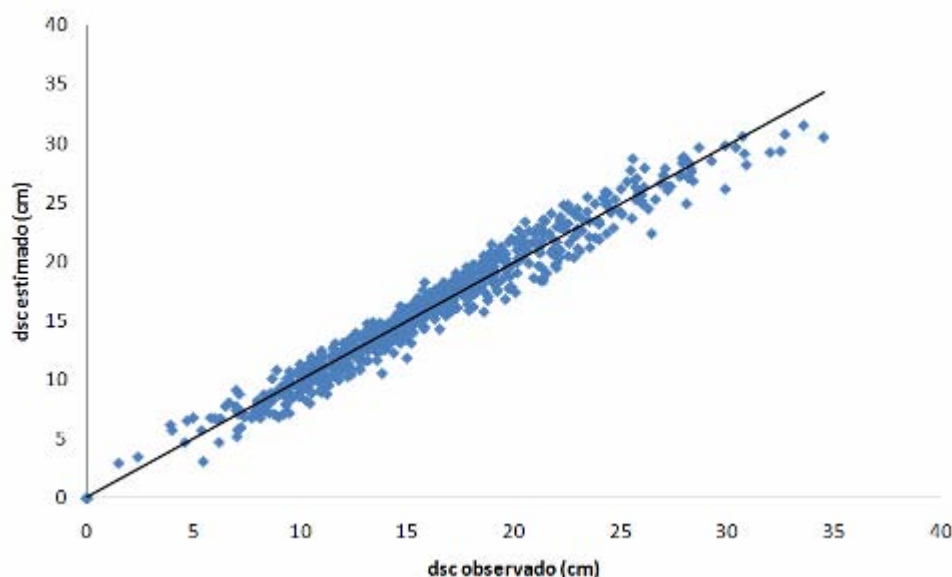
Al sustituir los coeficientes no estandarizados en el modelo, la ecuación queda de la manera siguiente:

$$\frac{dcc^2}{dcc_{1,30}^2} = -1,648 \left[ \frac{h}{ht} - 1 \right] + 0,505 \left[ \frac{h^2}{ht^2} - 1 \right] \quad [46]$$

Por la fuerte correlación existente entre el diámetro con y sin corteza se coincidió con el mismo modelo para el diámetro sin corteza.

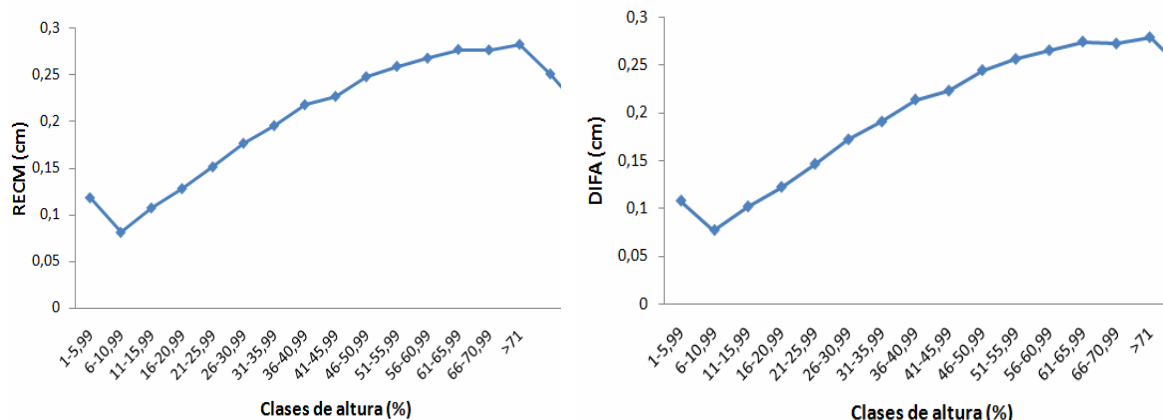
En relación a la exactitud global (anexo 15) el modelo resultante garantiza el menor valor de RECM de 1, 07 cm para un 7,1% global, el cual indicó la mayor confianza en la inferencia estadística para su empleo en la producción. En relación al sesgo se obtuvo un similar comportamiento que el modelo obtenido para el diámetro con corteza, siendo el modelo propuesto el de menor valor de DIFA con 0,046 cm para un 0,31 % global, lo que se traduce en una mayor capacidad de simular el perfil que el resto de los modelos analizados.

Si se observa el comportamiento entre el diámetro estimado y el observado (figura 3.8), no se aprecia un comportamiento conveniente, esto, unido al gráfico de los residuos (anexo 16). Se percibe al igual que en el modelo anterior independencia entre los residuos y los pronósticos, pues la nube de puntos no sigue una tendencia específica de asociación, lo que expresa una homogeneidad de la varianza residual.



**Figura 3.8- Comportamiento entre el diámetro estimado y el observado.**

Con el análisis de las capacidades predictivas dentro de las clases de validación del modelo de mejor ajuste se obtiene un comportamiento similar al del modelo del perfil de dcc.



**Figura 3.9-Tendencias del RECM y DIFA en el perfil del fuste por clases de altura en %.**

En la (figura 3.9) se evidencia una tendencia a disminuir la exactitud y aumentar el sesgo en las clases superiores, lo que fue explicado anteriormente para el caso del modelo del diámetro con corteza, por la variabilidad de árboles con diferentes alturas. El modelo quedó representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{dsc^2}{dct^2} = -1,193 \left[ \frac{h}{ht} - 1 \right] + 0,306 \left[ \frac{h^2}{ht^2} - 1 \right] \quad [47]$$

Como el modelo obtenido coincide tanto para el diámetro con corteza como para el diámetro sin corteza, y las correlaciones estimadas de estas dos variables (anexo 17) con un valor de  $R^2=0,99$ ; demostrada la correlación existente entre estas variables con el grosor de corteza para todo el perfil del fuste, es factible a partir de la relación existente ecuación [7] obtener para el grosor de corteza el siguiente modelo:

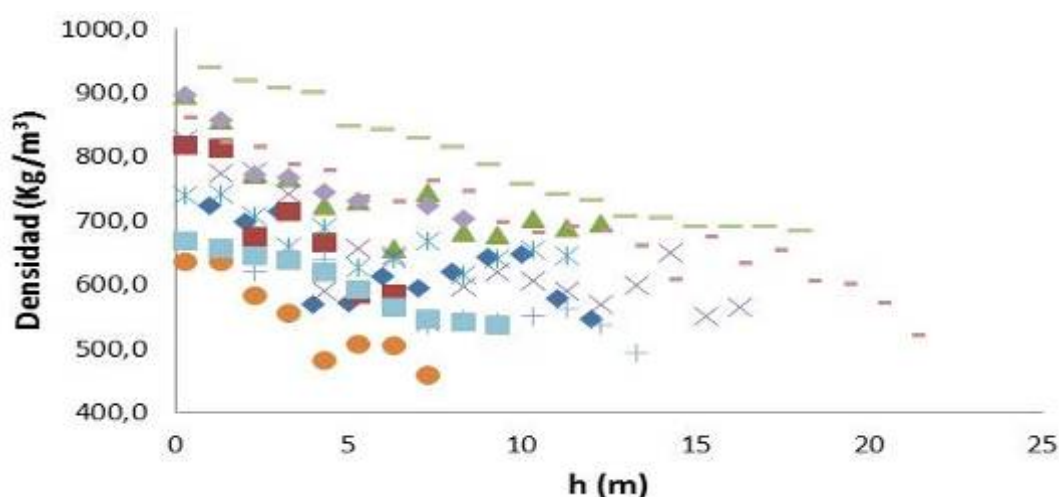
$$\varphi = \frac{dccc_{L30}^2 \left[ \sqrt{-1,648 \left[ \frac{h}{ht} - 1 \right] + 0,505 \left[ \frac{h^2}{ht^2} - 1 \right]} - \sqrt{-1,193 \left[ \frac{h}{ht} - 1 \right] + 0,306 \left[ \frac{h^2}{ht^2} - 1 \right]} \right]}{2} \quad [48]$$

La adecuación de los modelos a la EFI Macurije permite contar con una herramienta más efectiva para clasificar la madera por sus dimensiones, por lo que se infiere una mayor efectividad de los esquemas de corte, y por consiguiente un mayor aprovechamiento de la madera.

Coincidiendo con Prodan *et al.*, (1997) la ecuación del perfil es una oportunidad para homogeneizar las cubicaciones de árboles en esta empresa forestal, permitiendo unificar criterios y el empleo de una sola ecuación estable y precisa.

### 3.4 Variación intra e inter árbol de la microdensidad de la madera.

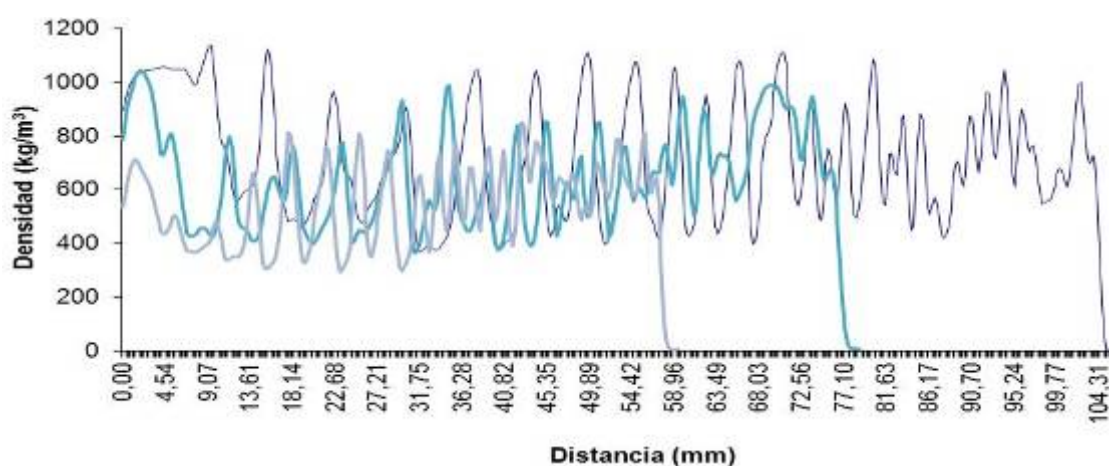
En las figura 3.10 se obtiene el comportamiento de la variación longitudinal y en de los árboles analizados en la investigación con el empleo del escáner.



**Figura 3.10-Variación en sentido longitudinal de la densidad en un árbol.**

Este comportamiento se encuentra en correspondencia con lo reportado en la literatura por Burley *et al.*, (1973); Monteoliva *et al.*, (2002); Igartúa *et al.*, (2004); González *et al.*, (2007); González (2008) y Barrero, (2010). Esta variación se explica morfológicamente por el aumento en la longitud de las traqueidas con la edad, las cuales se agrandan con la altura del árbol de la base a la copa.

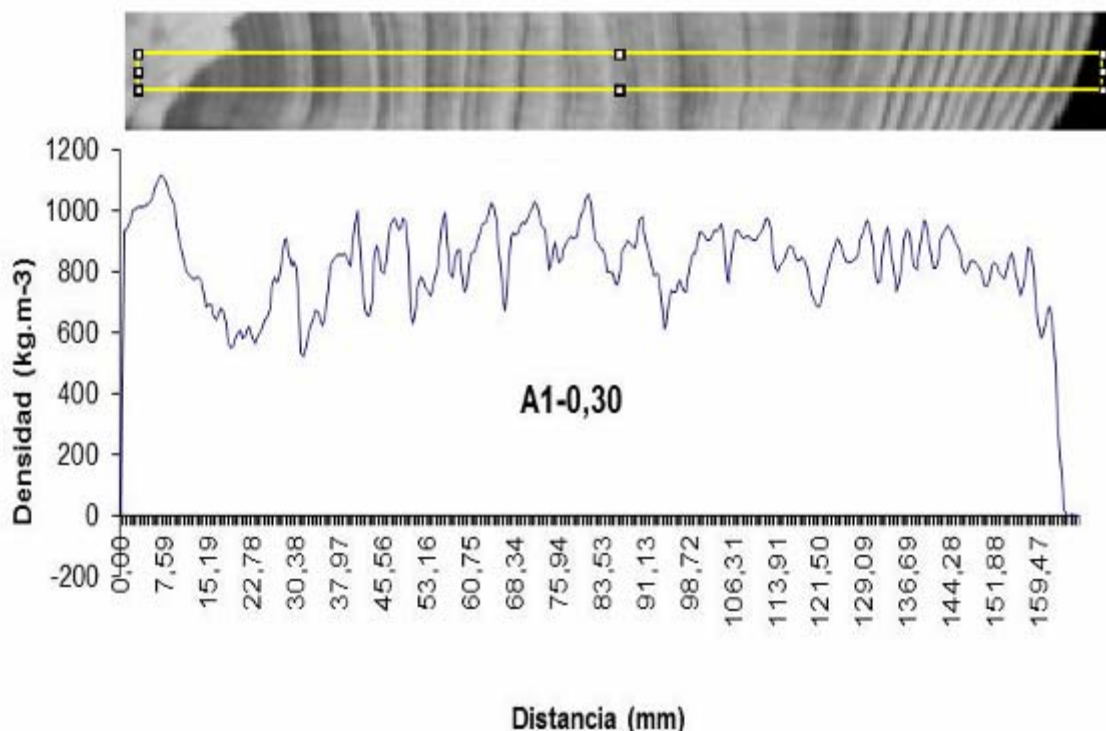
Por su parte la figura 3.11 se muestra el comportamiento de la densidad en dirección médula corteza.



**Figura 3.11-Variación en dirección médula-corteza de la densidad de una probeta a 1,30 m de altura.**

El cual como se percibe existe aumento del centro a la corteza muy en correspondencia con lo reportado también en la literatura por González *et al.*, (2007), González (2008) lo cual se justifica por la presencia de células cortas comprimidas y elevados contenidos de resina muy característico en esta especie.

Un análisis de las imágenes obtenidas en el escáner tomando como ejemplo la sección 0,3 del árbol 1 dominante figura 3.12 se constata entre los anillos de crecimiento una marcada diferencia de la densidad entre la madera de la estación lluviosa (temprana) y la estación menos lluviosa (tardía), donde se dan valores aproximados de 2,5 veces mayor la densidad de la madera de otoño que la madera de primavera al depender mucho de las proporciones entre una y otra.



**Figura. 3.12 Diferenciación densidad de la madera en función de la madera temprana y tardía.**

Por otro lado la duraminización se pone de manifiesto, el cual unido a la resina altera los valores de la densidad lo cual indica para esta sección un aumento de la corteza a la médula, cuando es por lo general todo lo contrario.

Diversos factores tales como las características hereditarias, ambientales y estructura del bosque afectan los patrones de crecimiento de los árboles, a su vez determinan la morfología y la composición química de las células, condicionando la densidad de la madera.

De forma general para muchas especies del género *Pinus* de amplia distribución se reconoce la existencia de procedencias y su influencia en variables relativas al crecimiento como es el caso de *Pinus pinaster* reportado por González *et al.* (2001), González *et al.* (2003) y González *et al.* (2005) o el caso de *Pinus sylvestris* reportado por Gomory *et al.* (2001), Prus-Glowacki y Stephan (1994); Comellius (1994); sin embargo para la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari estudios recientes de ensayos progenie-procedencia (García, 2002) para estas variables no mostraron diferencias significativas. También por medio de estudios moleculares Geada (2004), Jardón *et al.* (2010) con ADN cloroplasto y microsatélites del ADN nuclear no se detectaron diferencias entre las procedencias contempladas en estos, al parecer las llamadas procedencias para esta especie son ecotipos y no reflejo de variación en el genofondo de las mismas. Por lo que se puede asumir que el modelo a establecer, en general, es válido para esta variedad de la especie en Cuba.

En correspondencia con lo reportado por Pearson y Williams, (1958) los cuales plantean que la variación dentro de los árboles es mucho más significativa que las variaciones dentro de los árboles se realiza un ANOVA de un factor tomando las probetas de las secciones a 1.30 de altura.

Al analizarse la variación de la densidad en función del estatus sociológico de la masa para los 15 árboles analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, y tener como hipótesis  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_G$  que los tres árboles: dominante, codominante y oprimido alcancen la misma densidad promedio y como hipótesis  $H_1$ : no todas  $\mu_G$  sean iguales, se obtuvo la tabla 3.12.

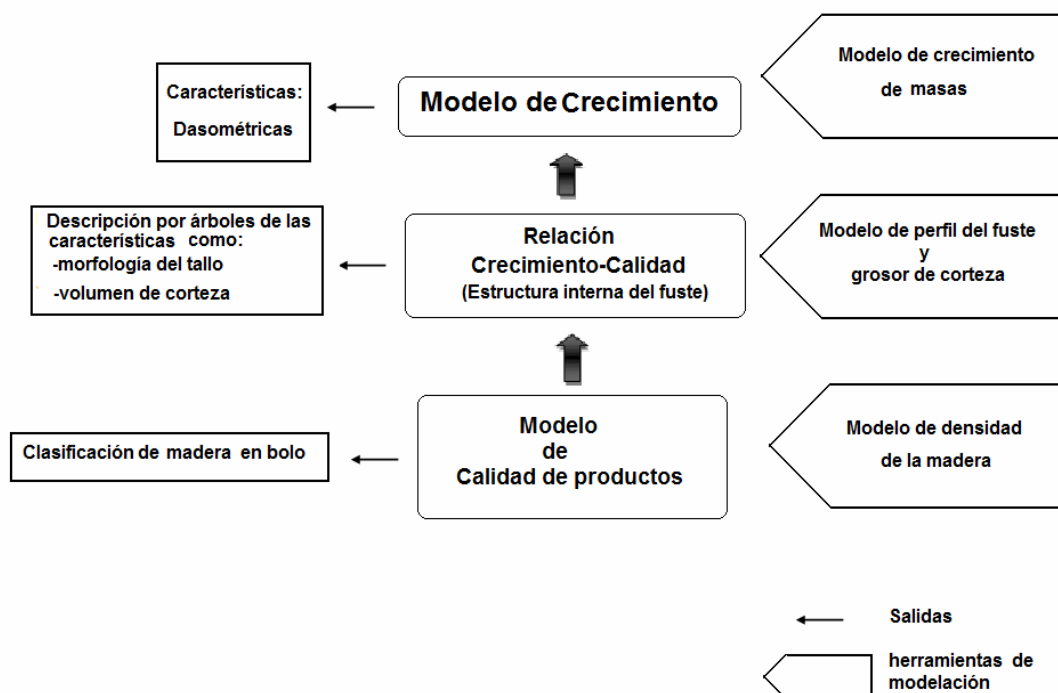
**Tabla 3.12-Análisis de varianza para el estatus sociológico.**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2966,002	2	1483,001	,249	,783
Intra-grupos	71439,420	12	5953,285		
Total	74405,421	14			

Como se puede apreciar no existe diferencia significativa en función del status sociológico  $\alpha > 0,05$  lo cual indica que se acepta  $H_0$ , por lo que se favorece la obtención de un modelo de densidad único ya sea en dirección radial o tangencial para la microdensidad.

### **3.5 Modelo OPTIPC para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.**

Una vez obtenidos los modelos en este caso el de crecimiento de la masa para las variables altura dominante, altura y diámetro del árbol medio, área basal por hectáreas y volumen por hectáreas partiendo de la utilización de un marco de plantación uniforme y sin un tratamiento silvicultura que influya sobre el comportamiento de la masa, se integra el modelo del perfil del fuste de diámetro con corteza, diámetro sin corteza y grosor de corteza con el modelo a obtener de la densidad de la madera como muestra la figura 4.12.



**Figura 4.12 Estructura del modelo integral para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.**

Como muestra la figura 4.12 el modelo obtenido (OPTIPC) o sea Optimización del rendimiento del *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari se encuentra constituido por tres herramientas con tres salidas en un orden jerárquico.

Su entorno se constituye por variables de estado exógenas como son la calidad de sitio y la edad, por una variable control estado inicial de la masa, ya que no fue posible por las características del contexto de la investigación tener como variables de control: el tipo, intensidad y frecuencia de las diferentes atenciones silviculturales; pero se trabaja en función de su inclusión por su importancia.

Se trataron como variables de estado endógenas (predictoras y derivadas) las relaciones funcionales dadas entre el crecimiento, el perfil del fuste, el grosor de la corteza y la densidad de la madera.



Por último como variables de respuesta se trabajó con las características de la masa tales como: diámetro y altura del árbol medio de la masa, número de árboles, área basal y volumen por hectáreas, lo que condicionó como otras salidas, el volumen de madera con corteza, volumen de madera sin corteza, el volumen de corteza, así como la densidad que tendrían los mismos en cualquiera de sus secciones con una clasificación de la madera en bolo y de madera aserrada.

Este modelo infiere una mejora en el proceso de toma de decisiones en comparación con los existentes, a partir de su adecuación en el ajuste dasométrico ( $R^2 \geq 0,8$ ) de los modelos obtenidos además de su automatización.


En relación al software en la figura 3.4 se presenta la estructura del mismo.



**Figura 4.13** Presentación de software OPTIPC

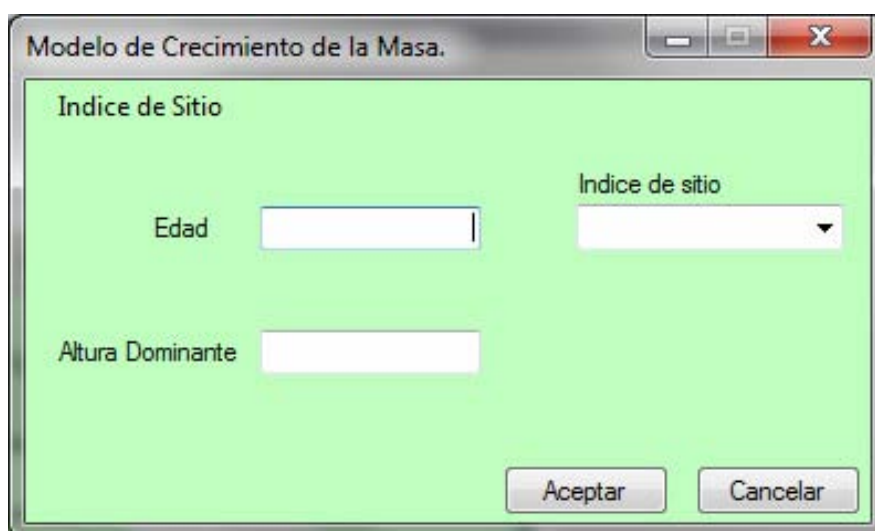
Como primera herramienta tiene una primera entrada correspondiente a la determinación del índice de sitio teniendo como entradas la edad de la

plantación actual, la edad referente sobre la cual se obtiene la altura dominante máxima y la altura dominante como resultado de inventario forestal figura 4.14.

A screenshot of a software window titled 'Indice de Sitio'. The window has a light green background and a standard Windows-style title bar with minimize, maximize, and close buttons. It contains three input fields: 'Edad' (Age), 'Edad Referente' (Reference Age), and 'Altura Dominante' (Dominant Height). At the bottom right, there are two buttons labeled 'Aceptar' (Accept) and 'Cancelar' (Cancel).

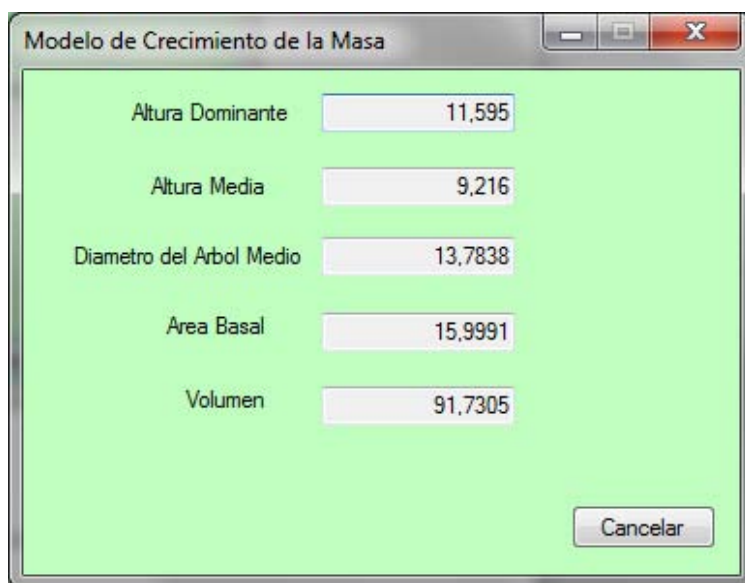
**Figura 4.14** Ventana para la determinación del Índice de sitio

Una vez introducidos los datos en esta misma se acepta y aparecerá en esta misma ventana el valor del IS a la cual pertenece esta plantación, conociendo este valor se introduce nuevamente en la ventana inicial la edad y la altura dominante actual y se selecciona el IS ya calculado figura 4.15

A screenshot of a software window titled 'Modelo de Crecimiento de la Masa.'. The window has a light green background and a standard Windows-style title bar. It contains three input fields: 'Edad' (Age), 'Altura Dominante' (Dominant Height), and 'Indice de sitio' (Site Index), which is a dropdown menu. At the bottom right, there are two buttons labeled 'Aceptar' (Accept) and 'Cancelar' (Cancel).

**Figura 4.15** Ventana para la determinación de las variables dasométricas.

Como resultado se obtiene una tabla resumen donde se muestra el comportamiento dasométrico del rodal analizado Figura 4.16




The screenshot shows a software window titled "Modelo de Crecimiento de la Masa". It contains five rows of data, each with a label and a numerical value in a text box. The values are: Altura Dominante (11,595), Altura Media (9,216), Diametro del Arbol Medio (13,7838), Area Basal (15,9991), and Volumen (91,7305). A "Cancelar" button is located at the bottom right.

Variable	Valor
Altura Dominante	11,595
Altura Media	9,216
Diametro del Arbol Medio	13,7838
Area Basal	15,9991
Volumen	91,7305

Figura 4.16 Ventana resumen de las variables dasometricas.

La integración parte de conocimiento con el perfil del fuste parte de conocer precisamente la altura y el diámetro a la altura de pecho del árbol medio las cuales serían las variables entradas unido a la altura de cualquier parte de la sección del fuste figura 4.17.



The screenshot shows a software window titled "Modelo del Perfil del Fuste y Gro...". It contains three input fields for "Altura Referente", "Altura Total", and "Dap". At the bottom, there are two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura 4.16 Ventana resumen de las variables dasometricas.

Como resultado se obtiene una estimativa del diámetro con corteza, el diámetro sin corteza y el grosor de la corteza de esta sección además del volumen con corteza, volumen sin corteza y el volumen de corteza.

Por su parte el modelo de la densidad de la madera aunque no se obtiene en este trabajo parte de la relación ya conocida por González *et al.*, (2007), González (2008) de la edad con la densidad de la madera lo cual favorecerá la clasificación de las trozas por su calidad obteniéndose una materia prima más homogénea.

Como se puede constatar el software resulta simple e interactivo, práctico y aplicable tanto la actividad productiva como en la docencia y las investigaciones. Su implantación infiere que permitirá un mayor rendimiento de madera en bolo de la especie por concepto de su establecimiento en los sitios más idóneos; una disminución de los costos de las actividades silviculturas como limpiezas, raleos a partir de la sustitución de la especie en las calidades de sitios menos idóneos y por el establecimiento en otros más adecuados; una disminución de 85 % (\$ 25 000) del costo del inventario forestal para la ordenación de montes ya que es una de las fuentes para la toma de datos de la ordenación de montes; una disponibilidad en mayor cuantía de madera de calidad favorecida por la relación que se establece entre las propiedades físico mecánicas de la madera y el sitio forestal a partir de un predominio de plantaciones en sitios de buena calidad; así como una rehabilitación de los biotopos naturales de la especie *Pinus tropicalis*, especie que fue víctima de los planes de talas de la ordenación del año 1986, áreas donde hoy se encuentran las calidades de sitio menos deseables para la *Pinus caribaea var. caribaea*; un Conocimiento de la dinámica del crecimiento e incremento en altura de la especie *Pinus caribaea var. caribaea*; una disminución

de la degradación de los suelos de los sitios más pobres en cuanto a su fertilidad natural; mayor disponibilidad de productos derivados de la madera de la especie *Pinus caribaea* var. *caribaea*; y una disminución del gasto de energía de la fuerza de trabajo que anteriormente resultaba de la realización de actividades silviculturales en sitio menos adecuados que tenía como meta de producción madera aserrada.

# **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la cumplimentación de los objetivos de la tesis, se arribaron a las siguientes conclusiones:

1. Del análisis crítico realizado al desarrollo de la modelación del crecimiento en el contexto cubano se pudo constatar:
  - que no existe un cuerpo teórico completo que presente las experiencias de las investigaciones en este campo pues las mismas se han restringido a la obtención de tablas de producción de las especies forestales de mayor participación en los planes nacionales; y
  - que los múltiples aspectos de esta área del conocimiento, aplicados a las condiciones de Cuba, han sido poco tratados, como es el caso de la modelación a nivel del árbol individual y de bosques naturales, lo cual denota una lenta evolución de las herramientas que provee esta ciencia a la práctica productiva.
2. La evaluación del turno de corta para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en las condiciones de sitios donde se distribuyen las plantaciones indican que el manejo forestal implementado y el comportamiento medio del volumen favorecen la cortabilidad física de 30 a 35 años de edad.
3. El sistema de curvas de índices de sitio permitió diferenciar las plantaciones en seis calidades, fijados estos para los valores 13, 16, 19, 22, 25 y 28

metros a la edad de 30 años y determinadas por el valor de la altura dominante que a su vez, fue la variable utilizada para la obtención de los modelos de crecimiento del diámetro del árbol medio ( $\bar{d}_{1.30}$ ), de la altura del árbol medio ( $\bar{H}$ ), el área basal por hectárea (G/ha) y el volumen por hectárea (V/ha).

4. El modelo de Kosak sin intercepto resultó el de mejor predicción para representar el comportamiento del diámetro con corteza y el diámetro sin corteza lo que originó, de acuerdo a la relación funcional entre estas variables, la obtención del modelo para el grosor de la corteza, todo lo cual facilita el proceso de cubicación en la práctica.



# **RECOMENDACIONES**

## RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones anteriores se considera pertinente recomendar:

Al Ministerio de la Agricultura:

- Aplicar los modelos y ecuaciones generados dentro de la región de estudio para masas coetáneas y puras de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.
- Incluir en los inventarios forestales la determinación de la altura dominante de modo que facilite el diseño de modelos donde no existan, con la consiguiente disminución de gastos por concepto de construcción de unidades muestrales permanentes para este fin.
- Establecer una red de parcelas permanentes como herramienta fundamental para desarrollar los modelos de crecimientos en diferentes especies así como, perfeccionar los existentes.

A la Empresa Forestal Integral Macurije:

- Implementar el modelo OPTIPC como herramienta para el monitoreo de la medición en las unidades muestrales permanentes de la empresa para el estudio del crecimiento y rendimiento de la especie, que permita las correcciones necesarias en aras de una mayor efectividad del mismo.
- Introducir en el proceso de toma decisiones durante la planificación y el manejo de las plantaciones de la especie los resultados que aporte el modelo que se propone en esta tesis.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abellanas, M; Abellanas, B; García, O y Vilas, C (2009): Vorest: Un modelo informático simula el crecimiento de un bosque. Departamento de Matemática Aplicada de la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid, y el Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba. Disponible en: <http://supertoolbar.ask.com>. Consulta: Lunes 7 Diciembre 2009, 19:57.
2. Ackermann, F (1995): Influence du type de station forestière sur les composantes intracernes de la densité du bois du chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) dans les chênaies de l' Adour et des coteaux basco-béarnais, Ann. Sci. For. 52, 635–652.
3. Aldana, E (1983): Ein Beitrag zur Waldinventur in Kuba Dargestelltan untersuchungen in den Kiefern wäldern der Oberförsterei Cajalbana. Tesis de candidatura. Fakultäd für Bau. Wasser und Fostwessen des Winssenschafrates der Technischen Universität Desdren. Sektion Forstwirtschaft. 222 p.
4. Aldana, E; Puentes, M; Romero, L (2006): Informe Final Proyecto de Ordenación EFI Macurije. Ministerio de la Agricultura.
5. Aldana, E; Rodríguez, J; Padilla, G; García, I (2009): Análisis de diferentes edades para establecer el turno de tala en plantaciones de *Pinus caribaea* en la EFI Viñales. Memorias del IV DEFORS, ISBN: 978-959-7139-89-8.
6. Alder, D (1980): Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Commonwealth Forestry Institute, Reino Unido. FAO. FAO # 22 Vol.2. Editorial Argón.118 p.

7. Allen, P.J (1992): Polynomial Taper equation of *Pinus caribaea*. New Zealand Journal Forestry-Science-194-205. 194-225.
8. Álvarez, P y Varona, J (1988): Silvicultura. Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación. 354 p.
9. Álvarez, D (2005): Tecnología de la madera.Universidad de Pinar del Río.en proceso de impresión. 187p.
10. Álvarez, D; Rodríguez, J. C y Pereira, H (2006): Variation of wood physical and mechanical properties of different provenances of *Pinus caribaea* var. *caribaea*. Report. 32 p.
11. Amateis, R. L; Burkhardt, H. E (1987): Cubic-foot volume equations for Loblolly Pine trees in Cutover, Site-Prepared Plantations. SJAF 11 (4): 190-192.
12. Andenmatten, E y Letourneau, E (2010): Piltriquitrón 1.0 Modelo de Rendimiento Forestal INTA Bariloche, Río Negro.
13. Ares, E (1999): Tablas Dasométricas para bosques naturales de *Pinus tropicalis* Morelet para la EFI La Palma. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales). UPR.
14. Ayerde L. D (1996): Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales, Chapingo México. 255 p.
15. Báez, R (1988): Estudio dasométrico de plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst. En suelos cenagosos de la provincia de La Habana. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas). ISAAC "Frutuoso Rodríguez" INCA. 125.
16. Báez, R y Gra, H (1988): Estudios dasométricos en *Casuarina equisetifolia*. I. Tablas de volumen. Revista Forestal Baracoa. Vol.18 (2): 82 p.

17. Báez, R; Gra, H y Varona, J.C (1991): Tablas de rendimiento de *Casuarina equisetifolia* Forst. en suelos cenagosos. Boletín Técnico Forestal. No 1. 1–13 p.
18. Bailey, R.L. y Clutter, J. L. (1974): Base-Age invariant Polymorphic Site Curves. *Forest Science* 20:155-159.
19. Baldwin, C (1997): A whole stand type growth and yield prediction system for the Pine forests of Honduras. Reports to forest management departament AFE/ COHDEFOR. Honduras.
20. Barnett, J.R; Jeronimidis, G (2003): Wood Quality and its biological basis. CRC Press, 226 p.
21. Barrio, M; Sixto, H; Cañellas, I; González, F (2007): Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 2007 16(1), 65-75. Disponible on line en [www.inia.es/srf](http://www.inia.es/srf) ISSN: 1131-7965 Consulta: Viernes 22 febrero 2008, 18:40.
22. Beets, P.N; Kimberley, M.O; Mckinley, R.B (2007): Predicting wood density of *Pinus radiata* annual growth increments. *New Zealand Journal of Forestry Science* 37(2): 241–266.
23. Benett, J; Anderson, K, Jenrich W (2010): Environmental variables influencing the increment of caribbean pine: (1) Periodic volume increment. *New Zealand Journal of Forestry Science* 4(1): 13–29. Bennett F, Swindel B.F., (1972): Taper curves for planted slash pine. USDA Forest Service Research Note 179, 4 pp.

24. Bergès, L (1998): Variabilités individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. Thèse de Docteur en Sciences Forestières, ENGREF Nancy, 328.
25. Bergès, L; Dupouey, J.L; Franc, A (2000): Long-term change in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since middle of the XIX<sup>th</sup> century, *Trees: Structure and function* 14, 398–408.
26. Bhat, K. M y Priya, P.B (2004): Influence of provenance variation on wood properties of Teak from the Western Ghat region in India. *IAWA Journal*. Vol 25 (3): 273–282.
27. Bi, H. (2000): Trigonometric Variable-Form Taper Equations for Australian Eucalypts. *Forest Science* 46 (3), p. 397-409.
28. Blanco, J.A; Zavala, M.A; Imbert, J.B; Castillo, F.J. (2005): Evaluation of thinning sustainability using a nutrient cycling simulation model. *Forest Ecology and Management* 213, 209-228 p.
29. Blanco J.A., Seely B., Welham C., Kimmins J.P., Seebacher T.M. (2007): Testing the performance of a forest ecosystem model (FORECAST) against 1 29 years of field 2 data in a *Pseudotsuga menziesii* plantation. *Canadian Journal of Forest Research* 37, 1808-1820.
30. Blanco, J.A (2008): Modelización forestal: herramienta importante para pronosticar el desarrollo de los ecosistemas forestales. Conferencia magistral impartida en la Universidad de Pinar del Río, Cuba en el SIMFOR 2008.
31. Bobkó, A y Aldana, E (1981): Ordenación de Montes. Partes 1 y 2. 134 p.

32. Brickell, J., (1984): Stem Analysis: A conventional approach to volume determination. Proceedings Growth and Yield and Other Mensurational Tricks: A regional Technical Conference. Logan Utah. United States Department of Agriculture. Forest Service. General Technical report INT-193.pp 61-67.
33. Burley, J; Hughes, J; Lamb, A.F; Betancourt, O (1973): Variación de la calidad de la madera del *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barret y Golfari: Análisis preliminar de cinco árboles de las plantaciones de Topes de Collantes, Cuba. Revista Forestal Baracoa. Año 3 (3): 4-16.
34. Calliez, A (1980): Predicción del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los Trópicos. Predicción del rendimiento. Volumen 22. FAO. Roma.
35. Cao, Q.V; Burkhardt, H. E; Max, T.A (1980): Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. Forest Science. (26): 71-80.
36. Carlson, T.C; Nimlos, T.J (1992): Using soil series to predict site index and wood specific gravity in Western Montana. Northwest. Sci, Vol. 40 (2): 56-57.
37. Chantre, G y Gouma, R (1993): Influence du génotype, de l'âge et de la station sur la relation entre l'infradensité du bois et la vigueur chez l'Epicéa commun (*Picea abies* Karst), Annales de l'AFOCEL, 61-89.
38. Clutter, J; Forston, J; Pienaar, L; Brister, G; Bailey, R (1983): Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons.
39. Corral, S; Návar, J; Fernández, F (1999): Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango.



Revista Madera y Bosques. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. 5 (2): 53-65.

40. Corvalán, P y Hernández, J (2010): Apuntes de Dendrometría. Mediciones Lineales Universidad de Chile. 24 p.
41. Costas, R; De Oliveira, A; Tereszczuch, M; Weber, E (2003): Funciones de forma para *Pinus taeda* L. en el Norte de Misiones. En: 10º Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF Eldorado – INTA EEA Montecarlo. Eldorado, Misiones. 7 p. Disponible en CD.
42. Costas, R; Friedl, R. A; González, J; Fosco, I; Kubsch, H. A; Korth, S. M (2006): Funciones de volúmenes del híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. En: 12º Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF Eldorado – INTA EEA Montecarlo. Eldorado, Misiones. 10 p. Disponible en CD.
43. Cown, D. J. (1981): Wood density of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* grown in Fiji. New Zeland. Journal of Forestry. 11(3): 224-53.
44. Cown, D.J (1992): New Zealand radiata pine and Douglasfir: Suitability for processing. New Zealand Ministry of Forestry, Forest Research Institute, FRI Bulletin, N° 168.
45. Cown, D.L; McConchie, D.L (1981): Effects of thinning and fertiliser application on wood properties of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 11: 79–91.
46. Crechi, E; Fassola, H. E; Friedl, R. A (1998): Manual de Descripción Técnica del Simulador Forestal de *Pinus elliittii* V 1.0. INTA EEA Montecarlo. Facultad de Ciencias Forestales. 21 p.

47. Crechi, E; Friedl, R. A; Fassola, H. E (1997): Manual de Descripción Técnica del Simulador Forestal de *Pinus taeda* 2.0. INTA EEA Montecarlo – Facultad de Ciencias Forestales. 16 p.
48. Crechi, E.; Moscovich, F.; Fassola, H.; Hampel, H.; Domecq, C.; Maletti, C.(2004): Ecuaciones de volúmenes para *Grevillea robusta* A. en Misiones, Argentina. INTAEEA- Montecarlo. Informe Técnico N° 56. 12p.
49. Curtis, R. O (1972): Yield tables–past and present. Jour. For. 71 (1): 28–32.
50. Daniel, T. W; Helms, J. A; Baker, F. S (1982): Principios de silvicultura. Trad. Ramón Elizondo Mata. Mc Graw- Hill. México. D.F. 491 p.
51. De Nacimiento, J (1979): Tabla de surtidos para *Pinus tropicallis*. Revista Forestal Baracoa. Vol.9 (1–2): 36.
52. De Nacimiento, J; Arias, J (1983): Estudios del Tronco en los Pinos Cubanos. Revista Forestal Baracoa, 7-26 p.
53. De Nacimiento, J; González, O; Benítez, H; Abreu, E; Pérez, J (1983): Tabla preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea*. Pinar del Río. Revista Forestal Baracoa. Vol. 13. 57-103.
54. Decourt, N (1972): Méthode utilisée pour la construction rapide de tables de production provisoires en France. Ann ,Sci. Forest .29 (1): 35-38.
55. Degron, R y Nepveu, G (1996): Prévission de la variabilité intra-et interarbre de la densité du bois de Chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl.) par modélisation des largeurs et des densités des bois initial et final en fonction de l' âge cambial, de la largeur de cerne et du niveau dans l' arbre, Ann. Sci. For. (53): 1019–1030.
56. Demaerschalk J (1972):Converting volume equations to compatible taper equations. Forest Science 18 (3), 241- 245.

57. Downes, G. M; Hudson, I; Raymond, C; Dean, A; Micheli, A; Schimlek, L; Evans, R; Muneri, A (1997): Sampling *Eucalyptus* for wood and fibre properties. CSIRO Publishing, Australia, 132 p.
58. Dutilleul, P; Herman, M; Avella, T (1998): Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Can. J. For. Res.* 28: 56-68.
59. Encarta (2009). Enciclopedia digital de Microsoft Windows.
60. Erickson, H.D; Harrison, A.T (1974): Douglas-fir wood quality studies. Effects of age and simulated growth on wood density and anatomy (Part I). *Wood Sci Technol*, (8): 207-226.
61. Espinoza, J (2004): Gradiente de variación de la densidad de la madera en árboles de *Gmelina aborea* en Venezuela. IV Congreso Forestal Venezolano. Barinas, Venezuela. 56 pp.
62. FAO (1980): Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol 1.
63. FAO (2002): Evaluación de los recursos forestales del mundiales 2000. Roma.
64. FAO (2010): Los productos forestales no madereros y la generación de ingresos. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep.htm> Consulta: 24 de mayo de 2010.
65. Fassola, U.E; Crechi, E; Keller, A; Barth, S (2006): Ecuaciones de forma variable para la estimación de diámetros a distintas alturas para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina. XXI Jornadas Forestales de Entre Ríos.
66. Ferguson, C.W (1979): Dendrochronology of bristlecone pine, *Pinus longaeva* *Environment International* 2 (4-6): 209-214.

67. Fernández, A y Rodríguez, P (2010): Metodología de cubicación de árboles en pie. Disponible en: [www.cesefor.com/cubifor](http://www.cesefor.com/cubifor) Consulta: 23 mayo 2010
68. Ferrere, P; Fassola, H; Fahler, J; Crechi, E (2001): Funciones de volúmenes totales, parciales y de forma en *Pinus caribaea* var. *caribaea*. Montecarlo, EEA Montecarlo. Informe Técnico N° 26.
69. Fidalgo, D y García, I (2005): Tablas de producción para plantaciones jóvenes de *Tectona grandis*, Guisa, Granma. II Encuentro de Jóvenes Investigadores Forestales. DEFORS.
70. Fierros, G (1989): Site quality, growth and yield and growing space occupancy by plantations of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in Oaxaca, México. Ph.D. thesis. New Haven, Yale University, Conn. 5-15, 62-110 y 168-197.
71. Fonton, A; Tourret, V (1986): Modélisation de la croissance des résineux. Essai d' extension du modèle de Maugé établi sur Pin maritime à l' Épicea, au Douglas et au Pin laricio. Mémoire de 3ème année de l'ENITEF. 69 P.
72. Friedl, R.A; Costas, R.A; Orué, E; Amarilla, A; Cinto, J.P (1992): Funciones de forma relativa polinomiales en *Araucaria angustifolia* (bert.) o. Ktze. Revista Yvyrareta. N° 3, P.63-69.
73. Furnival, G (1961): An index for comparing equations used in constructing volume tables. Forest Science 7 (4): 337-341.
74. Gadow, K.V; Real, P; Álvarez, J.G (2010): Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series vol.12, Viena, 242 p.
75. García, I (1983): Investigaciones para la elaboración de una tabla de rendimiento preliminar para el *Pinus caribaea* var. *caribaea*. II Foro Multisectorial de la ACC en Pinar del Río.

76. García, J. M y Vidal, A (1988): Expresión matemática del perfil longitudinal y fórmulas de volumen para los bolos de las especies *Pinus cubensis* y *Pinus tropicallis*. Revista Forestal Baracoa. Vol.18 (2): 83.
77. García, I (1989): Contribución para el establecimiento de tablas de rendimientos de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la provincia Pinar del Río.90 p.
78. García, O (1995): Apuntes de Mensura Forestal I, Estática. Universidad Austral de Chile. Santiago de Chile. p 65.
79. García, I y Aldana, E (2000): Tablas de rendimiento y crecimiento para el *Pinus caribaea* en Pinar del Río. Memorias del I SIMFOR. UPR.
80. García, Y (2002): Variabilidad genética en pruebas combinadas de procedencia/progenies en *Pinus caribaea* Morelet var.*caribaea* Barret y Golfari. Tesis en opción al título Académico de Máster en ciencias Forestales. Mención Manejo de Bosques.
81. García, L; Guindeo, A; Peraza, C (2003): La Madera y su Anatomía. Mundi-Prensa/Fundación Salazar. Madrid, España.327 pp.
82. García, I (2004): Bases para el control y planificación del *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari en la provincia de Pinar del Río. Tesis (en opción al título de Máster en Ciencias Forestales, mención Manejo de Bosques). UPR.
83. García, I; Aldana, E; Zaldívar, A (2004): Tablas de rendimiento y crecimiento para La EFI Macurije. Memorias del III SIMFOR. UPR.
84. García, J.M; González, O; León, M y Henry, P.P (2006): Determinación de las fórmulas de volumen de las trozas de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*. Revista Forestal Baracoa. Vol.25 . (2): 58.

85. García, O (2010): El enfoque del espacio de estados en modelos de Crecimiento. Universidad Austral de Chile.
86. Geada López, G (2004): Variabilidad genética usando marcadores moleculares del ADN nuclear y de cloroplasto en *Pinus caribaea* var. *caribaea* .In: III Congreso Forestal de Cuba, Habana (ed.) Ministerio de la Agricultura, N.34.
87. Gezan, S. A; Moreno, P.C; Ortega, A (2009): Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. ISSN 0717-9200 Disponible en: <http://scielo.php.htm>. Consulta: 24 de mayo de 2010.
88. Goelz, J. C; Burk, T. E (1992): Development of a well – behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. Can. J. For. Res. 22: 776 – 784
89. González, SC; Salvador, L; Agúdez, P; Alía, R; Gil, L (2001): Geographical variation of gene diversity of *Pinus pinaster* Ait. In the Iberian Peninsula En: Genetic response of forest system to changing enviromental conditions (eds): Müller-Starcks), Kluwer Academic Press.
90. González, SC; Gerber, S; Cervera, MT; Martínez, JM; Alía, R; Gil L (2003): Annals Forest Science 60(2): 115-121. Selfing and sibship structure in a two-cohort stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) using nuclear SSR markers.
91. González, SC; Gerber, S; Cervera, MT; Martínez, JM; Alía, R; Gil, L (2005): Detecting realible parent-offspring matches in parentage analysis: a case study.
92. González, I (2007): Comportamiento de algunas propiedades físicas en la dirección radial de la madera de la especie *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea*.Revista Forestal Baracoa.No1;Vol 26.

93. González, I (2008): Análisis numérico de las deformaciones de la madera *aserrada de Pinus caribea* Morelet var. *caribea* inducidas por las variaciones de la humedad. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales). UPR.
94. Gordon, A y Graham, J.D (1986): Changes in *Pinus radiata* stem form in response to nitrogen and phosphorus fertilizer. N.Z.J. For. Sci; 16 (1): 41-54.
95. Gra, A; Lockow, K; Vidal, A; Rodríguez, J; Echeverría, M; Figuerroa, C (1990): Tablas de Volumen y surtido y densidad del *Pinus caribaea* en plantaciones puras para Cuba. Informe etapa 509-09.24.
96. Groothausen, C y Ferreira, O (1989): Curvas de índice de sitio para *Pinus caribaea* Morelet en Honduras. El Tatascán. Vol.6 (1), Siguatepeque, Honduras.
97. Guilley, E y Nepveu, G (1999): Using mixed models to estimate the pith-to-bark density profiles in individual logs from reduced density measurements; Application to Sessile oak, Proceedings of the Third Workshop <<Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approach and Simulation Software>>. La Londe-les-Maures, France, 5-12, 245-252.
98. Guilley, E; Hervé, J.C; Huber, F y Nepveu, G (1999): Modelling variability of within-rings density components in *Quercus petraea* Liebl. with mixed-effects models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density, Ann. Sci. For. 56, 449-458.
99. Guilley, E (2000): La densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.): Elaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra-et inter-arbre; Origine et evaluation non destructive de l'effet "arbre"; Interprétation anatomique du modèle proposé. Thèse (pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF) Spécialité: Sciences Forestières et Sciences du Bois.  
206 p.

100. Hagglund, B (1981): Evaluation of forest site productivity. For. Abstract Comm. For. Bureau. Vol 42 (11): 515–527.
101. Halminton, GJ; Christie, JM; Edwards, J (1981): Yield models for forest management. Forestry commission booklet; No 48, 32 p.
102. Hapla, F (1997): How to bring into accord the silvicultural management and end-users interests in case of the Douglas fir. Timber management toward wood quality and end-product value. CTIA / IUFRO International Wood Quality Workshop. Quebec. Canadá. p 3-7.
103. Hernández, L.A; Martínez, R.M; Vargas, H.J; Velázquez, M.A; Ángeles, P.G (1996): Características de los anillos y densidad de la madera a diferentes alturas del fuste en rodales aclareados de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Ciencia Forestal en México*. 21: 39-55.
104. Hernández, R; Fernández, C; Baptista, P (1997): Metodología de la investigación. McGRAW - Hill Interamericana de México, S.A. de C.V.
105. Herrero, J A; Renda, A; González, A; Grá, H; De Nacimiento, J; González, A; Peña, M; Castillo, E; Jiménez, M; Herrero, G; Álvarez, M; García, A; Pérez, M (1985): Manejo del *Pinus caribaea* var *caribaea* en las zonas de Alturas de Pizarra provincia de Pinar del Río. Boletín de Reseñas. Grupo de publicaciones CIDA. No 3. Centro de Investigaciones Forestales. Ministerio de la Agricultura. 60 p.
106. Hervé, J.C (1999): Mixed-effects modelling of between-tree and within variations. Application to wood basic density in the stem. Rapport final FAIR CT 96–1915. Sub-task 2.1; 18 p.



107. Husch, B; Miller, C.I; Beers, T.W (1982): Forest mensuration. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 402 p.
108. Ibáñez, A. (1975): Informe sobre nueve especies maderables cubanas. Instituto de Investigaciones Forestales. Ministerio de la Agricultura. Ciudad Habana. Cuba. 76 p.
109. Igartúa, D.V; Monteoliva, S.E; Monterrubianesi, M.G; Villegas, M.S (2002): Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*. Variación de la densidad básica y la longitud de fibras en Lobería, provincia de Buenos Aires, Argentina. Rev. Fac. Agr. 105 (1): 35-45.
110. Igartúa, D.V; Monteoliva, S.E; Monterrubianesi, M.G; Villegas, M.S (2003): Basic density and fibre length at breast height of *Eucalyptus globulus* ssp. *Globules* for parameter prediction of the whole tree. IAWA Journal 24 (2): 173-184.
111. Igartúa, D.V; Monteoliva, S.E; Núñez, C (2004): Densidad básica, longitud de fibras y composición química de la madera de *Eucalyptus globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, argentina. III Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, Córdoba, España, 8p.
112. Igartúa, D.V; Monteoliva, S.E (2006): El *Eucalyptus globulus* en Argentina: potencialidad del sudeste de la provincia de Buenos Aires para la producción de materia prima fibrosa. IV Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, Santiago y Valdivia, Chile, 8 p.
113. Igartúa, D.V y Monteoliva, S.E (2009): Densidad básica de la madera de *Acacia melanoxylon* R. Br en relación con la altura de muestreo, el árbol y el sitio. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 18 (1): 101-110 Disponible en: [www.inia.es/srf](http://www.inia.es/srf). ISSN: 1131-7965 Consulta: (15 febrero 2010).

114. Jackson, L.W (1968): Effect of thinning on growth and specific gravity of loblolly and slash pine. Res. Pap. Ga. For. Res. Council. No. 50. 6 p.
115. Jardón, L.; Geada, G; Delgado, P.; Vázquez, A.; Piñero, D (2010): Phylogeography of Subsection Australes pines in the Caribbean basin. *Annals of Botany*. (In press)
116. Jiménez, S; Alfaro, M; Araya, J. (1998): Introducción a la valoración forestal. Serie: Recursos Naturales y Desarrollo. Nro. 1. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional. Costa Rica. 81 p.
117. Kimmins, J.P; Mailly, D; Seely, B (1999): Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecological Modeling* 122, 195-224.
118. Knigge, W y Schulz, H. (1966): *Grundriss der Forestbenutzung* Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin. 584 p.
119. Kollmann, F (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Auflg. Springer. Verlag, Berlín.
120. Kollmann, F. F; Cote Junior, W. A (1968): *Principles of wood science and technology*. Berlín: Springer, 2 v.
121. Koubaa, A; Hernández, R.E; Beaudoin, M; Poliquin, J (1998): Interclonal, intraclonal, and within tree variation in fiber length of poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science* 30 (1): 40-47.
122. Kosak, A (1969): Taper functions and their applications in forest inventory. *Forestry Chronicle* 45 (4).278-283.
123. Kosak, A; Munro D; smith, J (1969): Taper functions and their application in forest inventory. *Forestry Chronicle* 45 (4).278-283 p.

124. Kosak, A (1988): A variable-exponent taper equation. Can. J. For. Res; (18): 1363-1398.
125. Laasasenaho, J (1982): Taper curve and volume functions for pine, spruce, and birch. Commun. Inst. For. Fenn. 108.
126. Lausberg, M.J; Cown, D.J; Mcconchie, D.L; Skipwith, J.H (1995): Variation in some wood properties of *Pseudotsuga menziesii* provenances grown in New Zealand. *New Zealand of Forestry Science*, Vol. 25 (2): 133-146.
127. Le Moguédec, G ( 2000): Choosing simplified mixed models for simulations when data have a complex hierarchical organization. An example with some basic properties in Sessile oak wood *Quercus petraea*, Ann. Sci. For à soumettre.
128. Lei, H; Milota, M. R; Gartner, B.L (1996): Between-and within-tree variation in the anatomy and specific gravity of wood in Oregon white oak (*Quercus garryana* Dougl.). IAWA 17 (4): 445-461.
129. Lemoine, B (1980): Densité de peuplement, concurrence et coopération chez le Pin maritime. II. Résultats à 5 et 10 ans d'une plantation à espacement variable. Ann. Sci. For. (37): 217-237.
130. Letourneau, F y Andenmatten, E (2000): Curvas de perfil de fuste, para la estimación de diámetros con corteza a distintas alturas, para Pino Ponderosa (*Pinus ponderosa* (Dougl) Laws.) Comunicacion Técnica N° 13 Area Forestal Silvicultura. Informe Técnico 13 p.
131. Lindström, H (1996): Basic density in Norway Spruce. Part III. Development from pith outwards. *Wood Fiber Sci.* 28: 391-405.
132. Lindstrom, M.J y Bates, D.M (1990): Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. *Biometrics* (46): 673-687.

133. Madrigal, A (1991): Tablas de producción. Seminario sobre inventario y ordenación de montes, Valsaín, Segovia, Vol. II.
134. Maldonado, J (2010): Metodología para la construcción de modelos de crecimientos de masa. serie investigación y desarrollo PUMA. Costa Rica
135. Markstrom, D; Troxell, H; Boldt, C (1983): "Wood properties of immature ponderosa pine after thinning", *Forest Products Journal* 33 (4): 33-36.
136. Martínez, M.O y Ferreira, O.W (2002): Modelos de regresión para generar tablas de rendimiento en bosques naturales de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* en Potun, Peten, Guatemala. Revista Tatascan. Vol. 14. (2): 55-66.
137. Matos, E (1972): Análisis de crecimientos en diámetros, alturas, áreas basales y volúmenes del *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, en algunas plantaciones realizadas en Cuba. Memorias especiales de Cuba al VII Congreso Forestal Mundial, p 113–134.
138. Max, T y Burkhart, H (1976): Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science*. (22): 283–289.
139. Max, T y Burkhart, H (1985): Segmented polynomial regression applied to taper equation. *For. Sci.* 22 (3).
140. Mazet, J.F; Nepveu, G; Velling, P; Deret-Varcin, E (1990): Etude des effets de quelques paramètres sylvicoles et environnementaux sur la densité du bois de l' *Epicéa* commun, du *Sapin* pectiné et du *Pin* sylvestre dans le Nord-de la France, Actes du Troisième Colloque Sciences et Industries de Bois. ARBORA Bordeaux, France.

141. Megraw, R.A (1986): Effect of silvicultural practices on wood quality. In Proceedings: TAPPI R&D Conference, Raleigh, North Carolina Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Atlanta. 27-34.
142. Meredieu, C (1998) : Croissance et branchaison du Pin Laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. (Poiret) Maire): Élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prevision de caractéristiques des arbres et du bois.Thèse présentée l'Université Claude Bernard-Lyon I pour Diplôme de doctorat.
143. Miranda, I; Almeida, M.H; Pereira, H (2001): Influence of provenance, subspecies and site on Wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. Wood and Fiber Science 33 (1): 9-15.
144. Monárrez, J. C. y Maldonado, H (2003): Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* MTZ. en el estado de Durango. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. Vol. 9 (001): 45-56.
145. Montalvo, J.M; Gra, H y De Nacimiento, J (1992): Estudios dasométricos en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea*: Distribución de frecuencia diamétrica. Revista Forestal Baracoa. Vol.22 (3): 26.
146. Montalvo, J.M; Bravo, J.A; Herrera, M y Rodríguez, L (2007): Influencia del espaciamiento inicial en el crecimiento y rendimiento de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari sobre la altura dominante. Revista Forestal Baracoa. Vol.26 ( 2): 70.
147. Monteoliva, S; Núñez, C; Igartúa, D (2002 a): Densidad básica, longitud de fibras y composición química de una plantación de *Eucalyptus globulus* de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. II Congreso Iberoamericano de Celulosa y Papel, San Pablo, Brasil, 8 p.

148. Monteoliva, S; Senisterra, M.G; Marquina, J; Marlats, R; Villegas, M.S (2002 b):  
Estudio de la variación de la densidad básica en siete clones de *Salix*.  
Revista Facultad Agronomía La Plata 105 (1): 29-34.
149. Monteoliva S., Senisterra G., Marlats R. (2005). Variation of wood density and  
fibre length in six willow clones (*Salix* spp). IAWA Journal 26 (2), 197-202.
150. Monteoliva, S (2007): Salicáceas: variación de la calidad de madera para papel  
de diario. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales Madereros y  
no Madereros (Iberomadera), Buenos Aires, Argentina, 8 p.
151. Montero, M (1992): Modelo de crecimiento para *Pinus caribaea* var. *caribaea*.  
*hondurensis* Barret y Golfari en la sabana Oaxaca, México. Universidad  
autónoma de Chapingo 95 p.
152. Montero, M ; Fierros, A. M.(2002): “Predicción de crecimiento de *Pinus caribaea*  
var. *hondurensis* Barr y Golf. en “La Sabana”, Oaxaca, México. Revista  
Forestal centroamericana. Oct.- dic. 2000. (32):20-25.
153. Moschler, W.W; Dougal, E.F; McRae, D.D (1989): Density and growth ring  
characteristics of *Pinus taeda* L. following thinning. *Wood Fiber Sci.* 21: 313-  
319.
154. Mothe, F; Sciama, D; Leban, J. M; Nepveu, G (1998): Localisation de la transition  
bois initial-bois final dans un cerne de Chêne par analyse  
microdensitométrique, Ann. Sci. For. 55, 437-449.
155. Muhairwe C. K; (1999 a): Tree form and taper variation over time for interior  
lodgepole pine. Canadian Journal of Forest Research 24, 1.904-1.913.
156. Muhairwe C. K; (1999 b): Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus*  
*grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. Forest Ecology  
and Management 113, 251-269.

157. Návar, J; Domínguez, P. A; Contreras, J. C y Estrada, M (1997): Ajuste de siete modelos de ahusamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl. del Noreste de México. *Agrociencia* 31: 73-81.
158. Newnham R (1990): Mesure du defilement de forme variable. Forests Canada. Institut Forestier National de Petawawa. Rapport d'information PI-X-83-F,31 p.
159. Novo, N; Rojo, A; Álvarez J.G (2003): Funciones del perfil del fuste y tarifas de cubicación con clasificación de producto para el *Pinus silvestris*, Galicia España. Universidad de Santiago de Compostela.
160. Nyakuengama, J.G; Downes, G.M; NG, J (2003): Changes caused by mid-rotation fertilizer application to the fibre anatomy of *Pinus radiata*. *IAWA Journal* 24(4): 397–409.
161. Ottorini, J.M (1981): Application des données de L'Inventaire Forestier National à l'étude de la production du pin sylvestre en Margeride. *Ann ,Sci. Forest* .38 (4) : 487-502.
162. Owoundi, E (1992): modélisation de la retractsibilité du bois en relation avec des paramètres de la structure de l'accroissement annuel et de la position dans l'arbre chez *Quercus robur* L. Et *Quercus petraea* Liebl. Application à l'intégration de la rétractsibilité du bois dans les modèles de croissance de peuplements et d'arbres. Thèse de docteur en Science du bois, EGF Nancy, 233p.
163. Padilla, G (1999): Tablas dasométricas para plantaciones de *Pinus tropicalis* Morelet. Tesis (en opción de grado científico de Doctor en Ciencias Forestales). UPR.

164. Panshin, A; De Zeeuw, C (1980): Textbook of wood technology. McGraw-Hill Book Company, 722 p.
165. Pape, R (1999): Influence of thinning and tree diameter class on the development of basic density and annual ring width in *Picea abies*, Scand. J. For. Res. 14, 27-37.
166. Pardé, J y Bouchonh, J (1994): Dasometría. 2da Reimpresión. Versión española. Editorial Paraninfo. Madrid. 382 p.
167. Parker, M.L; Hunt, K; Warren, W; Kennedy, R (1976): Effect of thinning and fertilization on intraring characteristics and kraft pulp yield of Douglas-fir. Appl. Polym Symp, N° 28: 1095-1086.
168. Peñalver, A (1991): Estudio del Crecimiento y Rendimiento de las plantaciones de *Eucaliptus* sp de la provincia de Pinar del Río. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales). UPR.
169. Pereyra, O; Gelid, M (2002): Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y Norte de Corrientes. Revista Floresta 33 (1): 3-19.
170. Peszlen, I (1998): Variation in specific gravity and mechanical properties of poplar clones. Drevársky Výskum 43 (2): 1-17.
171. Pliura, A; Yu, Q; Zhang, S.Y; Mackay, J; Perinet, P; Bousquet, J (2005): Variation in wood density and shrinkage and their relationship to growth of selected young poplar hybrid crosses. Forest Science 51 (5): 472-482.
172. Pliura, A; Zhang, S.Y; Mackay, J; Bousquet, J (2007): Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. Forest. Ecol. Manage. 238, 92-106.



173. Polge, H y Nicholls, J (1972): Quantitative radiography and the densitometric analysis of wood, *Wood. Sci.* 5 (1): 51–59.
174. Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P (1997): *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible.* San José, Costa Rica. 561 p.
175. Quihlo, J.F.T y Pereira, H (2001): Variability of fibre length in wood and bark in *Eucalyptus globulus*. *IAWA Journal*, 2000, vol. 21, No 1, p. 41-48.
176. Raymond, C.A; Muneri, A (2001): Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. Basic density. *Wood Sci. Tech.* 35: 27-39.
177. Real, P (1993): Funciones de ahusamiento, Zonas 1, 2, 4, 6 y 7. Proyecto Modelo Nacional de Simulación de Pino radiata. Fundación Chile, Documento de trabajo N°14. 25 p.
178. Real, P y Moore, J (1987): An individual tree taper system for Douglas-fir in the Inland-Northwest. IUFRO. Mineapolis.
179. Rentería, J. B; Ramírez, H y Zamudio, F. J (1995): Estimación de volumen comercial de *Pinus cooperi* blanco mediante modelos de ahusamiento en Durango. II Congreso de Mexicano sobre Recursos Forestales. Resumen de ponencias. Desarrollo sustentable redefiniendo el papel de los recursos forestales. Montecillo, México. 91 p.
180. Rodríguez, F y Broto, M (2003): Cubica v1.2: Programa informático para cubicar y clasificar productos a partir de los datos procedentes de un inventario. *Montes: Revista de Ámbito Forestal.* 72: 33-38.

181. Rodríguez, F y Molina, C (2003): Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilindridad para tres clones de chopo (*Populus xeuramericana*) en Navarra. Invest. Agrar: Sist. Recur. For. 12 (3), 73-85.
182. Rodríguez, M y Arteaga, B (2005): Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Mtnez) andrese, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol 11(001): 39-44.
183. Rodríguez, M, Sánchez L; Romero, C (2009): Contrucción de un modelo de crecimiento para el *Pinus caribaea* var *caribaea* en Misiones Argentina. informe técnico.
184. Rondeaux, J (1993): La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique. 521 p.
185. Salazar, R (1985): Productividad del *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barret. y Golfari. en Turrialba, Costa Rica IPEF n.29, 19-24 p.
186. Sawa, Y; Schweingruber, F; Milyuntin L (2002): Genetic and environmental signal in tree ring from different provenance of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia. Trees 16: 124-131.
187. Simpson, HL y Denne, PM (1997): Variation of ring width and specific gravity within tree from unthinned Sitka spruce spacing trial in Clocaenog, North Wales. Forestry 70: 31-45.
188. Situación del patrimonio y las plantaciones forestales de la República de Cuba. [diapositiva]. Linares, E.; Álvarez, A.; Diago, I. y Mercadet, A. 2008. Instituto de Investigaciones Forestales. Cuba. 16 diapositivas, color.
189. Suárez, M. T; Palenzuela, L. y Roldán, P.P (2002): Manual para la Ejecución de la Ordenación Forestal. Reelaborado basándose en el trabajo original de

Alexander Eremeev- asesor internacional del equipo técnico de Ordenación Forestal. 103 p.

190. Talbert, J. T; Jett, J. B (1981): Regional specific gravity values for plantation grown, loblolly pine in the Southeastern United States. For. Sci. Madison: 27: 801 –807.
191. Taras, M. A (1965): Some wood properties of slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) and their relationship to age and height within the stem. Agriculture. V. 26 (2): 559-600.
192. Thomasius, H (1974): Reisebericht–Vorlage zum Sommerkurz der Universität Habana– Sommerkurz.
193. Torres, J. M; Magaña, T y Valles, G. (1993): Funciones de ahusamiento para 8 especies Forestales del Estado de México. I Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Resumen de Ponencias. Saltillo, Coahuila. 109 p.
194. Torres, J.M (2001): Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigaciones forestales. Agrociencia 35: 87-98.
195. Valdez, L (2000): Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de *Pinus patula* en Puebla, México. Colegio postgraduado. Agrociencia. Montecillo, México. 34(6): 747-758.
196. Verbug, P.S.J; Johnson, D.W. (2001): A spreadsheet-based biogeochemical model to simulate nutrient cycling processes in forest ecosystems. Ecological Modelling 141, 185-200.
197. Wilkes, J (1988): Variation in wood anatomy within species of *Eucalyptus*. IAWA Bull. n.s. 9 (1): 13-23.
198. Zahner, R y Whitmore, FW (1960): Early growth of radically thinned loblolly pine. J. For. 58: 628-634.

199. Zaldívar, A (2000): Estudio dasométrico de plantaciones de *Hibiscus elatus* SW en la provincia de Pinar del Río. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales). UPR.
200. Zepeda, M (1993): Sistemas de cubicación para *Pinus patula* Schl, Cham; de Perote, Veracruz, México.
201. Zhang, S. Y; Eyono, R; Nepveu, G; Mothe, F; Dhôte, J.F (1993): Modelling wood density in European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) and simulating the silvicultural influence, Can. J. Fors. Res. 23, 2587–2593.
202. Zobel, B. J. (1964): Mejora genética de las propiedades de especies forestales. Unasylva. 18(2-3): 89-104.
203. Zobel, B.J y Van Buijtenen, J.P (1989): Wood variation. Its causes and control. Springer-Verlag. Springer Series in Wood Sciences. Berlin. Germany. 363 p.

**ANEXOS**

### Anexo.1-Modelos analizados para el perfil de dcc, dsc y e.

d: diámetro (cm) correspondiente a la altura h

dcc1.30: diámetro con corteza normal

ht: altura total del árbol (m)

h: altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde alcanza el diámetro d

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_7$  : coeficientes

Modelos	Expresiones
1 Polinomio de segundo grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{h}{ht}\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$
2 Polinomio de tercer grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{h}{ht}\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2 + \left(\frac{h}{ht}\right)^3$
3 Polinomio de cuarto grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{h}{ht}\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{ht}\right)^4$
4 Polinomio de segundo grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{h}{ht} - 1\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht} - 1\right)^2$
5 Kosak (1969) a	$\left(\frac{d}{dcc_{1,30}}\right)^2 = \beta_1 \left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h^2}{ht^2} - 1\right)$
6 Kosak (1969) b	$\left(\frac{d}{dcc_{1,30}}\right)^2 = \beta_1 \left(1 - 2\left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \left(\frac{h^2}{ht^2} - 1\right)\right)$
7 Kosak, Munro y Smith (1969)	$\left(\frac{d}{dcc_{1,30}}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$
8 Polinomio de segundo grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right) + \beta_2 \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)^2$
9 Polinomio de tercer grado $\frac{d}{dcc_{1,30}} = f\left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)$	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right) + \beta_2 \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)^2 + \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)^3$
10 Newhan (1990)	$\frac{d}{dcc_{1,30}} = \beta_0 \left(\frac{ht - h}{ht - 1,30}\right)^{\beta_1}$

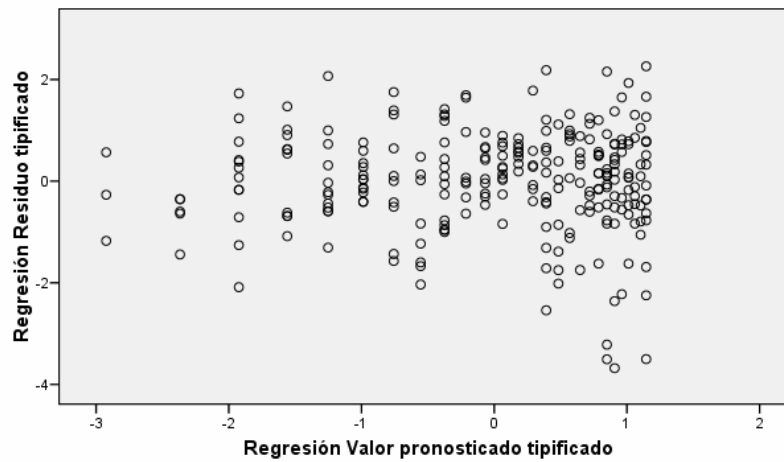
## Anexo.2

### Elementos del análisis por Regresión lineal

#### Modelo de crecimiento del Volumen/ha

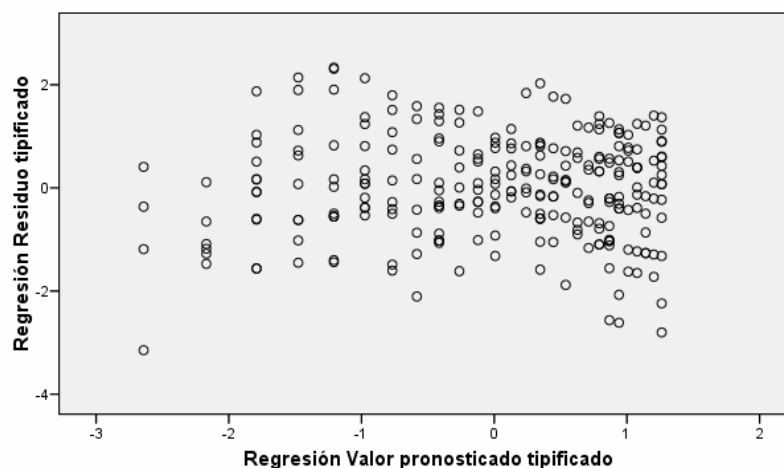
#### ANOVA

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	615,910	1	615,910	1575,551	,000
	Residual	299,443	766	,391		
	Total	915,353	767			



### Anexo.3

#### Dispersión de los residuos del modelo de crecimiento de altura dominante



### Anexo.3

#### Correlación entre las diferentes variables dasométricas en la masa

		Edad	Ho	$\bar{h}$	$\bar{d}_{1,30}$	G	V
Edad	Correlación de Pearson	1	,812(**)	,802(**)	,788(**)	,779(**)	,755(**)
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,000	,000
	N	512	512	512	512	512	512
Ho	Correlación de Pearson	,812(**)	1	,978(**)	,989(**)	,975(**)	,969(**)
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,000	,000
	N	512	512	512	512	512	512
$\bar{h}$	Correlación de Pearson	,802(**)	,978(**)	1	,948(**)	,914(**)	,960(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000	,000	,000
	N	512	512	512	512	512	512
$\bar{d}_{1,30}$	Correlación de Pearson	,788(**)	,989(**)	,948(**)	1	,992(**)	,973(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,000
	N	512	512	512	512	512	512
G	Correlación de Pearson	,779(**)	,975(**)	,914(**)	,992(**)	1	,945(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000		,000
	N	512	512	512	512	512	512
V	Correlación de Pearson	,755(**)	,969(**)	,960(**)	,973(**)	,945(**)	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	512	512	512	512	512	512

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).



## Anexo.4

### Elementos del análisis por Regresión lineal

#### Modelo de altura de árbol medio de la masa ( $\bar{h}$ )

#### ANOVA

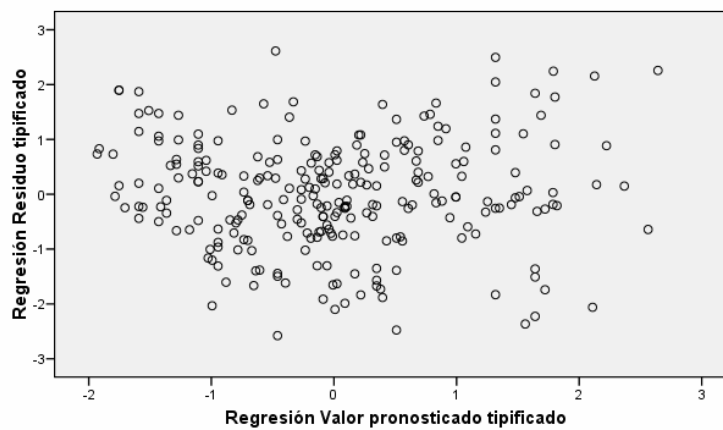
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	7538,219	1	7538,219	5645,981	,000
Residual	339,128	254	1,335		
Total	7877,346	255			

#### Coefficientes

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Sx	Beta		
1 $\beta_0$	-,976	,199		-4,906	,000
$\beta_1$	,879	,012	,978	75,140	,000

## Anexo.5

### Dispersión de los residuos del modelo de crecimiento de ( $\bar{h}$ )



## Anexo.6

### Elementos del análisis por Regresión no lineal

Modelo de diámetro del árbol medio de la masa (  $\bar{d}_{1.30}$  )

#### Estimaciones de los parámetros

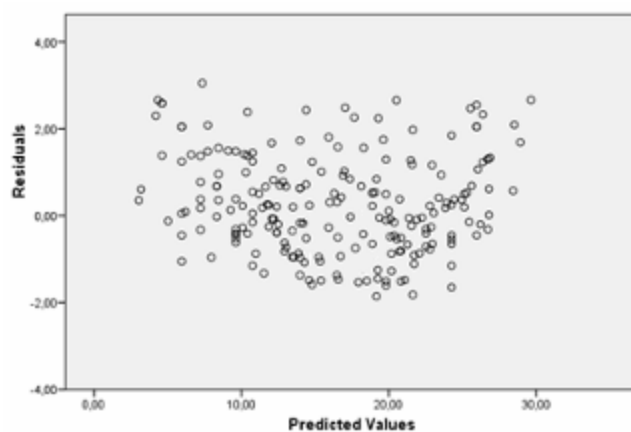
Parámetro	Estimación	Sx	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
$\beta_0$	-5,214	1,366	-7,903	-2,524
$\beta_1$	,700	,047	,608	,792
$\beta_2$	3,185	,613	1,978	4,392

## ANOVA

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	78751,382	2	39375,691
Residual	334,138	254	1,316
Total sin corrección	79085,520	256	
Total corregido	9784,958	255	

## Anexo.7

Dispersión de los residuos del modelo de crecimiento de (  $\bar{d}_{1.30}$  )



## Anexo.8

### Elementos del análisis por Regresión lineal

#### Modelo de área basal (G/ha)

#### ANOVA(b)

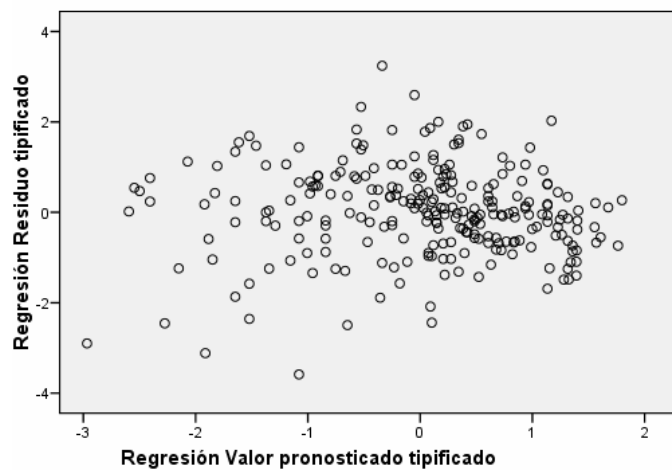
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	68,115	1	68,115	2307,572	,000
Residual	7,498	254	,030		
Total	75,613	255			

#### Coefficientes(a)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	$\beta_0$	3,900	,023		166,774	,000
	$\beta_1$	-13,073	,272	-,949	-48,037	,000

## Anexo.9

### Dispersión de los residuos del modelo de crecimiento de (G/ha)



## Anexo.10

### Elementos del análisis por Regresión no lineal

#### Modelo de volumen (V/ha)

#### Estimaciones de los parámetros

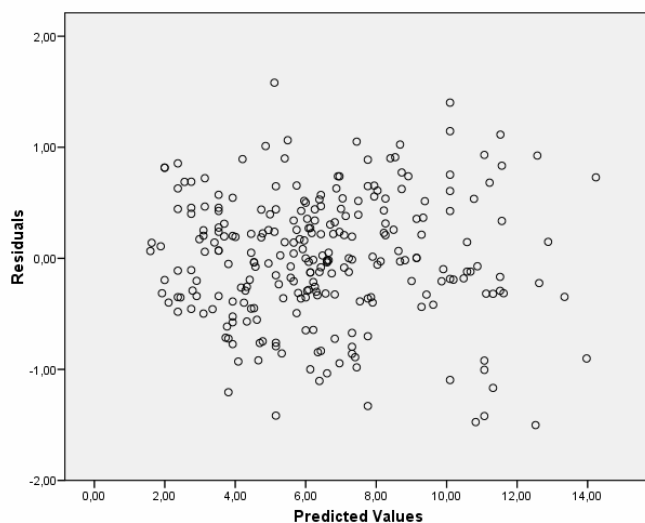
Parámetro	Estimación	Sx	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
a	,211	,210	-,203	,625
b	,343	,026	,290	,395
c	,003	,001	,001	,004

### ANOVA(a)

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	12622,631	3	4207,544
Residual	80,369	253	,318
Total sin corrección	12702,999	256	
Total corregido	1969,097	255	

## Anexo.11

### Dispersión de los residuos del modelo de crecimiento de (V/ha)



## Anexo 12

### Perfil del fuste dcc

### Modelo para el dcc

dcc: diámetro con corteza (cm) correspondiente a la altura h

dcc1.30: diámetro con corteza normal

ht: altura total del árbol (m)

h: altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde alcanza el diámetro d

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  : coeficientes determinados mediante el ajuste

	Modelos	Expresiones
1	Polinomio de segundo grado	$\frac{dcc}{dcc_{1.30}} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$
2	Polinomio de tercer grado	$\frac{dcc}{dcc_{1.30}} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2 + \left(\frac{h}{ht}\right)^3$
3	Polinomio de segundo grado	$\frac{dcc}{dcc_{1.30}} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht} - 1\right)^2$
4	Kosak (1969)	$\left(\frac{dcc}{dcc_{1.30}}\right)^2 = \beta_1 * \left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h^2}{ht^2} - 1\right)$
5	Kosak, Munro y Smith (1969)	$\left(\frac{dcc}{dcc_{1.30}}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$

Modelo	Bondad de ajuste				Capacidades predictivas	
	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corr	Sx	RECM	DIFA
1	,971	,943	,942	,062	0,600	-0,302
2	,979	,959	,959	,052	0,609	-0,563
3	,961	,923	,923	,072	0,266	-0,160
4	,974	,949	,949	,073	0,182	-0,138
5	,993	,986	,986	,078	0,526	-0,393

## Anexo 13

### Elementos del análisis por Regresión lineal

#### Ecuación del perfil para el diámetro con corteza (dcc)

##### ANOVA(c,d)

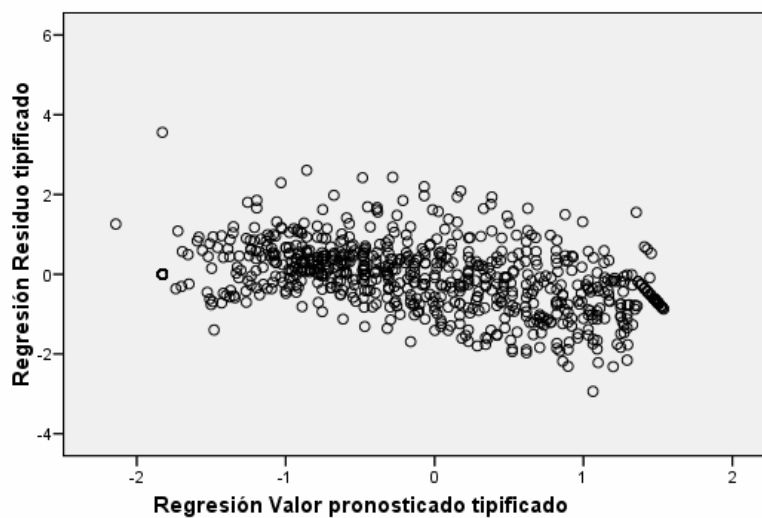
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	351,983	2	175,992	28682,385	,000
Residual	4,921	802	,006		
Total	356,904	804			

##### Coeficientes(a,b)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Sx	Beta	B	Sx
1	$\beta_1$	-1,648	,029	-1,587	-55,949	,000
	$\beta_2$	,504	,024	,605	21,310	,000

## Anexo 14

### Dispersión de los residuos del modelo de perfil para el (dcc)



## Anexo. 15

dsc: diámetro sin corteza (cm) correspondiente a la altura h

dcc1.30: diámetro normal con corteza

ht: altura total del árbol (m)

h: altura (m) desde la base del árbol hasta el punto donde alcanza el diámetro d

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  : coeficientes determinados mediante el ajuste

	Modelos	Expresiones
1	Polinomio de segundo grado	$\frac{dsc}{dcc_{1.30}} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$
2	Polinomio de tercer grado	$\frac{dsc}{dcc_{1.30}} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2 + \left(\frac{h}{ht}\right)^3$
3	Kosak (1969)	$\left(\frac{dsc}{dcc_{1.30}}\right)^2 = \beta_1 * \left(\frac{h}{ht} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h^2}{ht^2} - 1\right)$
4	Kosak, Munro y Smith (1969)	$\left(\frac{dsc}{dcc_{1.30}}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2$

Modelo	Bondad de ajuste				Capacidades predictivas	
	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corr	Sx	RECM	DIFA
1	,966	,933	,933	,059	0,590	-0,502
2	,976	,952	,952	,050	0,309	-0,563
3	,993	,985	,985	,064	0,072	,046
4	,965	,930	,930	,065	0,68	0,06

## Anexo. 16

### Elementos del análisis por Regresión lineal

### Perfil del fuste dsc

#### ANOVA(c,d)

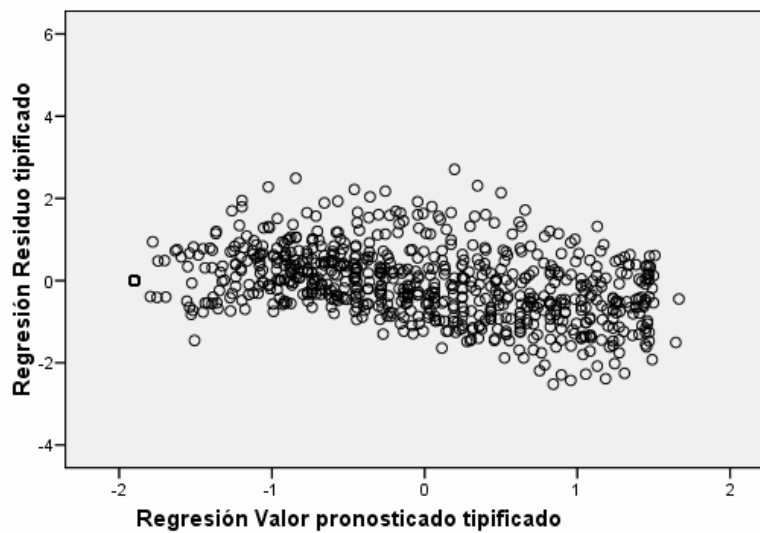
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	1331,160	2	665,580	159213,058	,000
Residual	20,158	4822	,004		
Total	1351,318	4824			

#### Coeficientes(a,b)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	$\beta_1$	-1,193	,010	-1,448	-120,998	,000
	$\beta_2$	,306	,008	,463	38,674	,000

### Anexo 17

#### Dispersión de los residuos del modelo de perfil para el (dsc)



### Anexo. 18



