



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR  
POR EL GRADO DE LICENCIATURA**

**DETERMINACIÓN DE ECUACIONES DE VOLUMEN Y  
COEFICIENTE MÓRFICO PARA LA ESPECIE *Dalbergia retusa*,  
EN LA ZONA DE PARRITA, PUNTARENAS. COSTA RICA**

**Jose Corrales Solís**

**Cartago, Costa Rica.**

**2012**

## RESUMEN

Las especies navitas de maderas valiosas han sido poco usadas en la reforestación en Costa Rica, debido al poco conocimiento que se tiene sobre ellas y al lento crecimiento que estas presentan. Una de estas especies es el cocobolo (*Dalbergia retusa*), la cual se caracteriza por presentar una madera dura y fina usada en artesanías.

En la zona de Parrita la empresa Barca estableció entre los años 1994 y 2000, plantaciones forestales con árboles de madera valiosa, siendo el cocobolo una de las especies usadas. Las plantaciones de cocobolo se distribuyeron en tres fincas, con un total de 24 ha, ubicadas principalmente en áreas con topografía de moderada a ondulada.

Se cuenta con datos de crecimiento de cocobolo producto de las evaluaciones realizadas a partir de 1997 y hasta el 2012. Para el 2012 las plantaciones de 16,6 años presentan un diámetro promedio de 16,9 cm, mientras que en la plantación de 15,5 años el diámetro es de 15,3 cm. El volumen en pie para estas fincas es de 85,7 m<sup>3</sup> y 93,4 m<sup>3</sup>. En el caso de la altura se encontró que a pesar de que la mayoría de los árboles presentar ejes inclinados, esta condición no afecta el valor de la altura.

Los modelos logarítmicos utilizados en las finca Monte Fresco y Las Lomitas para representar la relación entre el diámetro y la edad obtuvieron valores de R<sup>2</sup> de 0,64 y 0,75 respectivamente, valores aceptables para este tipo de población. En el caso de la altura los modelos para relacionar la edad con la altura generaron valores de R<sup>2</sup> de 0,58 para la finca Monte Fresco y 0,76 para Las Lomitas.

En promedio para las fincas en estudio, se reporta un factor de forma para volumen comercial de 0,401 respecto al volumen de un cilindro. En la estimación del volumen los modelos lineales que utilizan el diámetro y el área basal en conjunto con la altura presentaron valores de R<sup>2</sup> de 0,99.

Debido a que la muestra utilizada es de solo 43 árboles se recomienda que tanto el factor forma del volumen comercial como las ecuaciones de volumen, sean validadas con datos nuevos y empleando una población mayor.

A pesar de ser plantaciones de más de 15 años, aun el desarrollo del duramen es poco y sólo se reporta en algunos árboles en la primera troza, significando el volumen de duramen entre el 6% y 14% del volumen de esa troza.

Palabras claves: cocobolo, crecimiento, coeficiente mórfico, duramen.

# ACREDITACIÓN

Este proyecto de graduación ha sido aceptado por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobado por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura

## DETERMINACIÓN DE ECUACIONES DE VOLUMEN Y COEFICIENTE MÓRFICO PARA LA ESPECIE *Dalbergia retusa*, EN LA ZONA DE PARRITA, PUNTARENAS, COSTA RICA

Miembros del Tribunal Evaluador

---

Ing. Edwin Esquivel M.Sc

Director de la Proyecto de graduación

---

Ing. Lupita Vargas Fonseca Lic.

Lectora

---

Ing. Ricardo Luján Ferrer, M.Sc

Lector BARCA S.A

---

Ing. Jose Corrales Solís.

Estudiante

---

Ing. Ruperto Quesada Monge Ph. D.

Director Escuela de Ingeniería Forestal

Abril 2012

## **DEDICATORIA**

Para mi esposa Rosy quien es el motor que mueve mi vida, gracias por toda tu comprensión y apoyo incondicional.

A mis hijos Jose Isaac y Amy Rochely quienes me motivan a mejorar cada día.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis jefes en BARCA por el apoyo brindado durante la elaboración de este documento.

Al profesor Edwin Esquivel, por sus consejos y guía brindada para el análisis de los datos.

A Lupita Vargas por la ayuda brindada en el tiempo de clases y en la revisión de este documento.

Un especial agradecimiento para Ricardo Luján, con quien he compartido más de 14 años de trabajo y cuyos consejos y observaciones siempre me han sido muy valiosas.

A los compañeros de licenciatura, especialmente a Yorleny, Ivannia, Iván y Vladimir con quienes pasé buenos momentos durante este tiempo.

A Ramiro Arias y Gabriel León, trabajadores de campo en las fincas, quienes fueron vitales para poder recolectar los datos empleados en este estudio.

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	i
ACREDITACIÓN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
1. INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. Descripción de la especie .....	3
2.2. Diseño de muestreo .....	5
2.3. Crecimiento y rendimientos.....	5
2.4. Análisis de regresión.....	9
2.5. Test de normalidad .....	11
2.6. Factor volumétrico de forma.....	11
3. METODOLOGÍA .....	13
3.1. Localización del estudio .....	13
3.2. Descripción del muestreo realizado .....	14
3.3. Información base del estudio .....	14
3.4. Determinación del factor de forma .....	15
3.5. Elaboración de curvas de crecimiento y análisis de regresión.....	17
3.6. Determinación del volumen de duramen .....	17
4. RESULTADOS.....	18
4.1. Evaluación del crecimiento de los rodales.....	18
4.1.1. Finca Monte Fresco .....	18
4.1.2. Finca Las Lomitas .....	20
4.1.3. Comparación de los incrementos anuales en diámetro.....	22
4.2. Comportamiento del diámetro .....	23
4.3. Comportamiento de la altura .....	27
4.4. Pruebas de normalidad .....	29

4.5. Determinación del coeficiente mórfico.....	34
4.6. Determinación del porcentaje de duramen.....	38
5. CONCLUSIONES .....	42
6. RECOMENDACIONES.....	43
7. BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXO 1. Ubicación de parcelas permanentes en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas .....	46

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Datos básicos requeridos en el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento.....	7
Cuadro 2. Modelos de regresión comúnmente utilizados en la estimación de volumen y peso de árboles individuales.....	8
Cuadro 3. Detalles de las parcelas de Dalbergia retusa de las finca Monte fresco y Las Lomitas empleadas en el presente estudio. Febrero 2012.....	14
Cuadro 4. Resultados de la evaluación de las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la finca Monte Fresco en 1995, a la edad de 16,6 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	18
Cuadro 5. Resumen histórico de la evaluación de las parcelas permanentes en las plantaciones de Dalbergia retusa de la finca Monte Fresco hasta los 16,6 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.....	19
Cuadro 6. Resultados de la evaluación de las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la finca Las Lomitas en 1996 a la edad de 15,5 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	20
Cuadro 7. Resumen histórico de la evaluación de las parcelas permanentes en las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la finca Las Lomitas hasta los 15,5 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	21
Cuadro 8. Valores de P y W para determinar la normalidad en diámetro y altura para las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	30



Cuadro 9. Valores de P y W para determinar la normalidad en diámetro y altura para las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	30
Cuadro 10. Cantidad de árboles por clase diamétrica para las plantaciones de Dalbergia retusa establecidas en la fincas Monte Fresco y Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	34
Cuadro 11. Resultados de los árboles de Dalbergia retusa evaluados en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	35
Cuadro 12. Factor de forma para el volumen comercial por clase diamétrica para la especie Dalbergia retusa. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	36
Cuadro 13. Resultados de la regresión lineal aplicada a varios modelos para predecir el volumen comercial en la especie Dalbergia retusa. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	37
Cuadro 14. Resultados de la evaluación del duramen en árboles de Dalbergia retusa con más de 15 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	38

## Índice de figuras

Figura 1. Árbol de Dalbergia retusa (cocobolo) en plantaciones de 16,6 años. Parrita, 2012. ....	3
Figura 2. Tabla de Dalbergia retusa (cocobolo) .....	4
Figura 3. Representación del método de obtención del factor de forma. ....	12
Figura 4. Ubicación de las fincas Monte Fresco y Las Lomitas, incluidas en el estudio. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	13
Figura 5. Comportamiento de los incrementos corriente y medio anual del diámetro para Dalbergia retusa en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	22
Figura 6. Comportamiento del diámetro de Dalbergia retusa en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	23
Figura 7. Comportamiento del diámetro de Dalbergia retusa por parcela en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	24
Figura 8. Variación del diámetro de Dalbergia retusa en la finca Monte Fresco desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	25

Figura 9. Variación del diámetro de Dalbergia retusa en la finca Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	26
Figura 10. Comportamiento de la varianza del diámetro para Dalbergia retusa en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	26
Figura 11. Comportamiento de la altura de Dalbergia retusa en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	27
Figura 12. Variación de la altura de Dalbergia retusa en la finca Monte Fresco desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	28
Figura 13. Variación de la altura de Dalbergia retusa en la finca Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	28
Figura 14. Comportamiento de la varianza de la altura para Dalbergia retusa en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	29
Figura 15. Relación logarítmica entre la edad y el diámetro de Dalbergia retusa en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	31
Figura 16. Relación logarítmica entre la edad y el diámetro de Dalbergia retusa en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	32
Figura 17. Relación logarítmica entre la edad y el altura de Dalbergia retusa en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	33
Figura 18. Relación logarítmica entre la edad y la altura de Dalbergia retusa en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	33
Figura 19. Detalle del duramen en un árbol de Dalbergia retusa a alturas de 1 m y 2 m. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	39
Figura 20. Estimación del desarrollo del duramen en una troza de 2 m de largo de Dalbergia retusa. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	40
Figura 21. Desarrollo del duramen en las dos primeras trozas de 1 m de largo de un árbol de Dalbergia retusa. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012. ....	41

# 1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones en la gestión forestal se basa en la estimación precisa de la tasa actual de crecimiento del árbol y específicamente del tronco, pero el objetivo final es la estimación de la producción esperada total o comercial, ya sea para cosechas intermedias (raleos) y/o finales (Van Laar, 1997)

En los proyectos forestales, la información sobre el rendimiento de las especies se emplea para determinar las labores silviculturales requeridas por la plantación, por lo cual previo al establecimiento de una plantación forestal, el productor debe contar con información sobre el crecimiento de la especie, a partir del cual se generan estimados de producción, los cuales indicarán a la empresa la cantidad potencial de dinero que puede percibir a una determinada edad por la venta de la madera.

Algunas especies como teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) cuentan con diversos estudios que suelen ser usados como base de nuevos proyectos. En el caso de especies nativas de maderas finas como el cocobolo (*Dalbergia retusa*), cristóbal (*Platymiscium pinnatum*) y ron ron (*Astronium graveolens*) son pocas las empresas que se han arriesgado a usarlas en plantaciones puras; y son aun menos los estudios que indiquen el ritmo de crecimiento de estas especies.

A partir de 1994, la empresa Brinkman y Asociados, Reforestadores de Centroamérica S. A (Barca S.A) estableció en la zona de Parrita plantaciones de árboles con maderas finas, las cuales se incluyen bloques plantados con cocobolo, cristóbal, ron ron, amarillón (*Terminalia amazonia*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y surá (*Terminalia oblonga*), entre otras.

Estas plantaciones con especies nativas se ubicaron principalmente en áreas con topografía ondulada o laderas cortas, dejando las áreas planas o de menor pendiente para plantaciones con teca, dado que esta especie presenta un crecimiento más rápido que las especies nativas de madera fina.

En 1997 la empresa Barca S. A. establece un programa de monitoreo mediante parcelas permanentes en sus fincas, buscando contar con información de todas las especies plantadas. Generalmente las evaluaciones se realizan cada año y representan una fuente de información importante para modelar curvas de crecimiento preliminares y analizar el comportamiento de los individuos de estas especies.

### **Objetivo general**

- Elaborar ecuaciones de crecimiento preliminares para la especie *Dalbergia retusa* en la zona de Parrita.

### **Objetivos específicos**

- Obtener el coeficiente mórfico para la especie *Dalbergia retusa* en las plantaciones de la empresa Barca SA.
- Crear ecuaciones preliminares para la estimación del volumen comercial para la especie *Dalbergia retusa*.
- Determinar el porcentaje de duramen para la especie *Dalbergia retusa* en arboles con edades superiores a los 15 años.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Descripción de la especie

*Dalbergia retusa* (cocobolo) pertenece a la familia Fabaceae, se distribuye desde México hasta Panamá, en zonas con elevaciones de los 50 hasta los 300 msnm, y precipitaciones inferiores a 2000 mm, las temperaturas varían entre 25 y 35°C. En Costa Rica se ubica en el Pacífico Seco y Central (Holdridge *et al.* 1997). Crece también en lugares con pendientes menores a 15% (CATIE 2000).

Es un árbol pequeño o mediano en tamaño, con fuste negruzco y exfoliante (Holdridge *et al.* 1997). Las hojas son compuestas imparipinnadas y alternas, tienden a tener entre 7 y 15 folíolos (CATIE 2000). El mismo autor menciona que el haz es de color verde oscuro y lustroso y el envés tiene un color verde más opaco y claro.

En las plantaciones establecidas en Parrita predominan árboles con torceduras, inclinaciones, varios ejes y bifurcaciones, lo cual dificulta encontrar trozas rectas de más de 1m de largo.



**Figura 1.** Árbol de *Dalbergia retusa* (cocobolo) en plantaciones de 16,6 años. Parrita, 2012.

CATIE (2000) menciona que es una especie de lento crecimiento, reportándose en la zona del Pacífico Seco de Costa Rica a los cinco años de edad, un incremento medio anual (IMA) en altura de 0,6m. Añade que en una plantación pura con espaciamiento de 2 x 2 m, a la edad de 11 años el IMA en altura fue 0,6 m, mientras que en dap (*d*) el IMA fue de 1,0 cm, con una productividad en volumen de 9,0 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>.

La madera en condición seca al aire, tiene una coloración pardo oscura, se clasifica como excesiva a extremadamente pesada, con un peso específico básico promedio de 0,86 g cm<sup>-3</sup> (Carpio 1995).

La madera es dura, fina y muy valiosa, de color rojo o pardo rojiza a negro, con veteados oscuros irregulares, donde la albura va de un color crema a amarillo pálido, claramente discernible del duramen, el cual es amarillo rojizo recién pulido y se oscurece hasta castaño oscuro con la exposición al aire, además presenta buena durabilidad natural pero es resistente a tratamientos preservantes (CATIE 2000).



Fuente“([http://smokingmonkeydiary.blogspot.com/2005\\_12\\_01\\_archive.html](http://smokingmonkeydiary.blogspot.com/2005_12_01_archive.html))”

**Figura 2.** Tabla de *Dalbergia retusa* (cocobolo)

## **2.2. Diseño de muestreo**

Los inventarios forestales están diseñados, según Alder (1980), para obtener estimaciones confiables de las masas boscosas en relación a la superficie que ocupan. Cox (1985) y Alder (1980) mencionan que es común que los inventarios forestales continuos se basen en unidades permanentes de medición, distribuidas en forma sistemática sobre la superficie del rodal. La ubicación de las parcelas es de suma importancia ya que como menciona Silva (1971), las unidades de muestreo deben ubicarse en áreas de rodales coetáneos y con un vuelo con características uniformes.

El diseño de un muestreo es importante para lograr resultados representativos sobre el objetivo del estudio, así mismo, para obtener un análisis estadístico significativo (Ladrach 2010). El muestreo aleatorio simple es sencillo y muy eficiente cuando se aplica en poblaciones con unidades de muestreo homogéneas en cuanto al parámetro poblacional que se desea estimar (volumen total, área basal, número de árboles por hectárea, etc.) (CATIE 2002). Según esto cada muestra dada de un tamaño muestral específico tiene la misma probabilidad de ser seleccionada que cualquier otra muestra del mismo tamaño (Walpole *et al* 2007).

Para seleccionar la muestra se divide el área total efectiva del bosque ( $A$ ) en parcelas de muestro de tamaño ( $a$ ), a cada unidad se le asigna un número y la muestra se escoge al azar utilizando un generado o una tabla de números aleatorios, con el fin de asegurar que cada unidad de muestreo tenga igual probabilidad de ser escogida como parte de la muestra (CATIE 2002).

## **2.3. Crecimiento y rendimientos**

El crecimiento es el incremento gradual de un organismo, población u objeto en un determinado periodo de tiempo y el crecimiento acumulado hasta una edad determinada representa el rendimiento a esa edad. (Prodan *et al* 1997). Al graficar el tamaño (volumen, diámetro o altura) contra la edad, la curva formada se le llama curva de crecimiento (Husch *et al* 1982).

Las técnicas de estimación de crecimientos y rendimientos son el conjunto de herramientas que nos permitirá generar información para tomar decisiones acertadas en el proceso de administración forestal (Ortiz 1993).

Los métodos estáticos de predicción de rendimiento se presentan directamente como una función de la edad, clase de sitio e historia de la densidad del rodal y son estáticos ya que las funciones resultantes del rendimiento no permiten variación alguna en la historia de los tratamientos del rodal. Algunos de los métodos según Alder (1980) son:

- a) Métodos gráficos basados en la función diámetro – altura; donde se coloca los valores de diámetro promedio en el eje vertical y altura dominante en el eje horizontal. Los gráficos pueden construirse utilizando la edad pero se requiere conjuntos separados de curvas para cada clase de sitio.
- b) Estimación estadística directa de funciones de predicción del diámetro promedio.
- c) Definición de la historia de los tratamientos en función de la densidad y la edad.
- d) Funciones estáticas de rendimiento predictivas de área basal y volumen.

Las desventajas de los modelos estáticos de rendimiento son:

- a) Difícil combinar datos de rodales con historias de tratamientos diferentes.
- b) Una vez construido el modelo no puede ser usado para predecir rendimientos alternativos.
- c) La determinación de los rendimientos de los aclareos es difícil a menos que se lleven registros exactos.

Para Prodan (1997), el término crecimiento se debe clasificar de acuerdo con:

- a) Parámetros o variable considerado.
- b) Periodo de tiempo considerado.
- c) Porción o parte del rodal considerado.



Además este mismo autor, indica que considerando el periodo del tiempo se pueden distinguir el crecimiento corriente, el crecimiento periódico y el crecimiento anual. Ortiz (2008) menciona que la predicción del crecimiento y rendimiento consta de cuatro etapas:

- Definición del término rendimiento.
- Construcción de un modelo de simulación del crecimiento y rendimiento.
- Validación de modelo de simulación.
- Aplicación del modelo.

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 (Prodan *et al* 1997).

En el Cuadro 1 se presentan los datos básicos requeridos en el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimientos.

**Cuadro 1.** Datos básicos requeridos en el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento.

Símbolo.	Descripción	Unidades
E	Edad del rodal	Años o meses
Dg	Diámetro del árbol de área basal promedio $Dg = [G / (0.7854 * N)]^{0.5}$ $Dg = \left[ \frac{\sum (di)^2}{N} \right]$	Cm
G	Área basal del rodal $G = \_ (0.7854 * d^2)$ .	m <sup>2</sup> /ha
Ge	Área basal extraída en un raleo	m <sup>2</sup> /ha
G`	Área basal después del raleo	m <sup>2</sup> /ha
Hm	Altura promedio del rodal	M
Hd	Altura dominante del rodal, definida como la altura promedio de los 100 árboles más altos por hectárea	M
N	Número de árboles por hectárea	Árboles/ha
N`	Número de árboles después de un raleo	Árboles/ha
Tr	Proporción de raleo: $Tr = (N' / No) / (G' / G) = (Dg / D'g)^2$	
V	Volumen del rodal. El tipo se puede designar con un subíndice. Por ejemplo: Vsc = Volumen sin corteza V8 = Volumen con corteza hasta 8 cm. Ve = Volumen extraído en un raleo	m <sup>3</sup> /ha

Ortiz 2008, adaptado de Alder, D. 1980.

Ortiz (2008) menciona que los modelos de regresión se proponen después del análisis de los gráficos o ploteo de la variable dependiente vs la variable independiente y puede ser de la siguiente forma:

a. Modelos lineales

- i. Lineal simple  $y = a + b * x$   
 $y = a + b * x^2$   
 $y = a + b * \ln(x)$
- ii. Lineal cuadrático  $y = a + b * x + c * x^2$
- iii. Lineal cúbico  $y = a + b * x + c * x^2 + d * x^3$
- iv. Lineal múltiple  $y = a + b * x_1 + c * x_2 + d * x_3$

b. Modelo potencial (No lineal)

- i. Simple  $y = a * x^b$
- ii. Múltiple  $y = a * x_1^b * x_2^{bc}$

c. Modelos logarítmicos potencial

- i. Simple  $\ln(y) = \ln(a) * b * \ln(x)$
- ii. Múltiple  $\ln(y) = \ln(a) * b * \ln(x_1) + c * \ln(x_2)$

d. Modelo exponenciales

- i. Simple  $y = a * e^b$

Los modelos de regresión que son utilizados con mayor frecuencia en la literatura se muestran en el Cuadro 2 (Ortiz 1993):

**Cuadro 2.** Modelos de regresión comúnmente utilizados en la estimación de volumen y peso de árboles individuales.

Nombre	Modelo de regresión.
1. Factor de forma constante	$Y = b1 D^2 H$
2. Variable combinada	$Y = b0 + b1 (D^2 H)$
3. Variable combinada generalizada	$Y = b0 + b1 D^2 + b2 H + b3 (D^2 H)$
4. Logarítmico.	$Y = b1 (D^{b2} H^{b3})$
5. Logarítmico generalizado	$Y = b0 + b1 D^{b2} H^{b3}$
6. Variable transformada de Honer	$Y = \frac{D^2}{(b0 + b1(H - 1))}$
7. Clase de forma	$Y = b0 + b1 D^2 H F$

Donde:

Y: volumen o peso del fuste u otro componente  
D: es el diámetro de referencia (Dap)  
H: es alguna medida de altura del árbol  
F: alguna medida de la forma del árbol.  
b0, b1, b2 y b3: son coeficientes de regresión a estimar

Ortiz 1993, mencionando a Clutter *et al* 1983

Alder (1980) y Schlaegel (1981) citados por Ortiz (1993) indican que entre los criterios y estadísticos que han sido utilizados y recomendados para seleccionar el mejor modelo de ajuste se deben citar:

- a) Coeficiente de determinación ( $r^2$ ).
- b) Coeficiente de determinación ajustado ( $r^2$ -ajust).
- c) Error estándar ( $S_{yx}$ ).
- d) Índice de ajuste (FI).
- e) Error estándar en unidades reales ( $S_e$ ).
- f) Índice de Furnival (IF).
- g) Análisis de residuos.
- h) Simplicidad y facilidad de uso del modelo.

## 2.4. Análisis de regresión

Mendiburú (2007) menciona que el análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes (o relacionadas). Una relación funcional dada por:

$$Y = f(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) \quad \text{donde:}$$

- Y : Variable respuesta (o dependiente)
- $x_i$  : La  $i$ -ésima variable independiente ( $i=1, \dots, n$ )
- $\theta_j$  : El  $j$ -ésimo parámetro en la función ( $j=1, \dots, m$ )
- f : La función

Una vez decidido el tipo de función matemática que mejor se ajusta, se presenta el problema de elegir una expresión particular de esta familia de funciones; es decir, se ha postulado una cierta función como término del verdadero estado en la población y ahora es necesario estimar los parámetros de esta función (ajuste de curvas).

Como los valores de los parámetros no se pueden determinar sin errores por que los valores observados de la variable dependiente no concuerdan con los valores esperados, entonces la ecuación general replanteada, estadísticamente, sería:

$$Y = f(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) + \varepsilon$$

Donde  $\varepsilon$  representa el error cometido en el intento de observar la característica en estudio, en la cual muchos factores contribuyen al valor que asume  $\varepsilon$ .

Las regresiones se pueden clasificar según varios criterios, tales como:

- a. En función del número de variables independientes:
  - Regresión simple: Cuando la variable Y depende únicamente de una única variable X.
  - Regresión múltiple: Cuando la variable Y depende de varias variables ( $X_1, X_2, \dots, X_r$ ).
- b. En función del tipo de función  $f(X)$ :
  - Regresión lineal: Cuando  $f(X)$  es una función lineal.
  - Regresión no lineal: Cuando  $f(X)$  no es una función lineal.

### **Regresión Lineal Simple**

Cuando la relación entre las variables dependiente (Y) e independiente (X) es una línea recta, se tiene una regresión lineal simple, dada por la ecuación

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad \text{donde:}$$

- $\beta_0$ : El valor de la ordenada donde la línea de regresión se intercepta al eje Y.
- $\beta_1$ : El coeficiente de regresión poblacional (pendiente de la línea recta).
- $\varepsilon$ : El error.

Suposiciones de la regresión lineal

1. Los valores de la variable independiente X son "fijos".
2. La variable X se mide sin error (se desprecia el error de medición en X).
3. Existe una subpoblación de valores Y normalmente distribuido para cada valor de X.
4. Las variancias de las subpoblaciones de Y son todas iguales.
5. Todas las medias de las subpoblaciones de Y están sobre la misma recta.
6. Los valores de Y están normalmente distribuidos y son estadísticamente independientes.

Los supuestos del 3 al 6 equivalen a decir que los errores son aleatorios, que se distribuyen normalmente con media cero y variancia  $\sigma^2$ .

## 2.5. Test de normalidad

Uno de los test usados en estadística para contrastar la normalidad de un conjunto de datos es el Test de Shapiro–Wilk. En este, se plantea como hipótesis nula que una muestra  $x_1, \dots, x_n$  proviene de una población normalmente distribuida (Shapiro y Wilk, 1965).

Se considera uno de los test más potentes para el contraste de normalidad, sobre todo para muestras pequeñas ( $n < 30$ ).

El estadístico del test es:  $W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2}$  donde

- $x_{(i)}$  (con el subíndice  $i$  entre paréntesis) es el número que ocupa la  $i$ -ésima posición en la muestra;
- $\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n) / n$  es la media muestral;
- las constantes  $a_i$  se calculan

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$$

Donde:

$$m = (m_1, \dots, m_n)^T$$

Siendo  $m_1, \dots, m_n$  los valores medios del estadístico ordenado, de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, muestreadas de distribuciones normales.

$V$  es la matriz de covarianzas de ese estadístico de orden.

La hipótesis nula se rechazará si  $W$  es demasiado pequeño.

## 2.6. Factor volumétrico de forma

Se define como la relación entre el volumen del árbol y el volumen del cilindro, donde el área basal ( $g$ ) se multiplica por la longitud ( $h$ ), dando como resultado el volumen del cilindro; según donde se toma el área basal y la longitud que empleada para la cubicación, el factor de forma ( $f$ ) recibe diferentes nombres, como (FAO 1973):

- a. f absoluto; área basal a nivel del suelo y altura total.
- b. f AP, con área basal a 1,30m y altura total.
- c. f comercial, con área basal a 1,30m y altura comercial.



$$f = \frac{\text{Volumen del árbol}}{\text{volumen del cilindro}}$$

**Figura 3.** Representación del método de obtención del factor de forma.

Donde el volumen del árbol se obtiene mediante la sumatoria de los volúmenes de cada una de las trozas o secciones del árbol obtenidas, para lo cual se emplea la fórmula de Smalian.

Fórmula de Smalian 
$$V = \pi * \left(\frac{A+a}{2}\right) * L$$

Donde:

- V = Volumen de la troza
- A = Área de la cara mayor de la troza (cm)
- a = Área de la cara menor de la troza (cm)
- L = Largo de la troza (m)

Este factor de forma o coeficiente mórfico varía según especie y características de sitio y por lo tanto, se requiere de estudios específicos que determinen cuál es el factor de forma para cada rodal dentro de un sitio específico, sin embargo, se tiende a usar un factor de 0,5 en el cálculo de volúmenes totales (Corvalán y Hernández 2009).

### 3. METODOLOGÍA

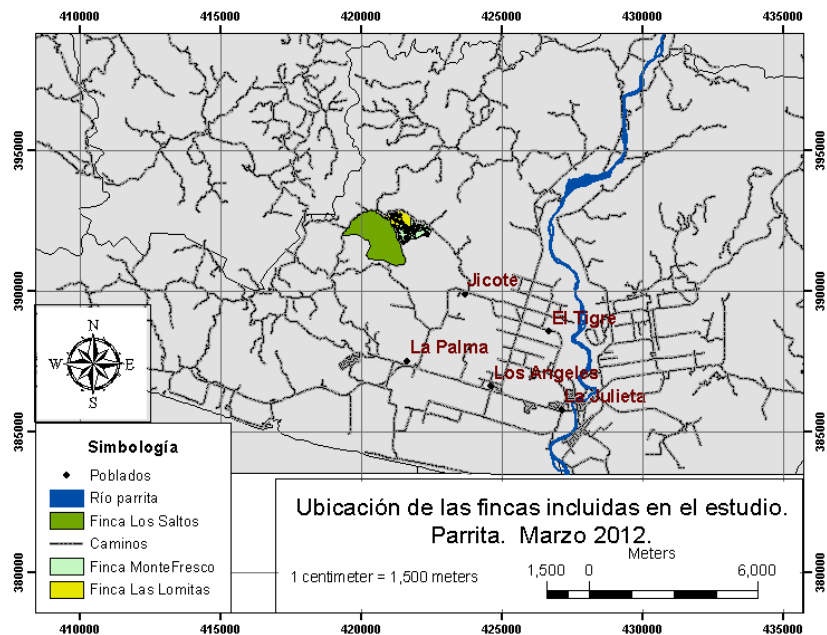
#### 3.1. Localización del estudio

El área de estudio se ubica en el cantón de Parrita, provincia de Puntarenas, en el caserío de Jicote.

Según Herrera (1985) el clima de la zona se clasifica como “clima húmedo, muy caliente”, con déficit moderado de agua, con una precipitación anual entre 3080 mm a 3420 mm, con una temperatura media anual entre 25°C y 27°C, con una estación seca que inicia a finales de diciembre y termina a principios de abril.

En total el área plantada con cocobolo entre 1995 y 1996 en dos fincas es de 13,6 ha:

- Finca Monte Fresco, ubicada en el caserío Jicote, Parrita, con un área total de 59,7 ha, de las cuales 7,1 ha fueron plantadas con cocobolo en 1995.
- Finca Las Lomitas, ubicada en el caserío Jicote, Parrita con un área total de 53,9 ha, siendo 6,5 ha plantadas con cocobolo en 1996.



**Figura 4.** Ubicación de las fincas Monte Fresco y Las Lomitas, incluidas en el estudio. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

### 3.2. Descripción del muestreo realizado

Las plantaciones incluidas en el estudio cuentan con parcelas permanentes de forma circular, con un área de 400 m<sup>2</sup> y distribuidas mediante un muestreo simple al azar dentro de los bloques establecidos con cocobolo.

La finca Monte Fresco cuenta con 6 parcelas permanentes y una intensidad de muestreo del 3,4 %, mientras que la finca Las Lomitas cuenta con 3 parcelas, lo que representa un 1,9 % de intensidad de muestreo. El detalle de las parcelas empleadas se presenta en el Cuadro 3, en el anexo 1 se presenta el mapa de ubicación de las parcelas.

**Cuadro 3.** Detalles de las parcelas de *Dalbergia retusa* de las finca Monte fresco y Las Lomitas empleadas en el presente estudio. Febrero 2012.

Finca	Parcela	Año de siembra	Coordenada X	Coordenada Y
Monte Fresco	1	1995	422265	392021
Monte Fresco	2	1995	422028	392278
Monte Fresco	3	1995	421775	391893
Monte Fresco	4	1995	421285	391878
Monte Fresco	5	1995	411320	392062
Monte Fresco	6	1995	421363	392065
Las Lomitas	1	1996	420961	392616
Las Lomitas	2	1996	421232	392554
Las Lomitas	3	1996	421148	392452

Área de las parcelas 400 m<sup>2</sup>. Coordenadas en sistema de unidades Lambert sur.

### 3.3. Información base del estudio

En este estudio se empleó la información proveniente de las evaluaciones realizadas a las parcelas permanentes de cocobolo establecidas en 1997; estas parcelas se evalúan anualmente y la evaluación más reciente se realizó en enero del 2012; únicamente no se evaluaron en el 2003.



En la evaluación de los rodales de cocobolo, se recolectó información sobre la densidad de plantación, diámetro ( $d$ ) y altura para los árboles de cada parcela evaluada. Mediante el programa Excel se obtuvieron los valores promedios de las variables medidas; así como, el área basal y volumen. Para el cálculo del volumen se empleó un factor de forma de 0,5. Además, se obtuvieron los incrementos medios y corrientes anuales (IMA e ICA) para el diámetro, altura y volumen.

Inicialmente con los datos promedios se graficó el crecimiento promedio por finca del diámetro y la altura versus la edad. Con los datos individuales de los árboles evaluados se relacionó, mediante una regresión lineal, el diámetro y la altura de cada árbol con su edad, previamente se aplicó a los datos una prueba de normalidad, para lo cual se empleó el test de Shapiro-Wilk mediante el programa InfoStat. Para estas pruebas se establecieron las siguientes hipótesis:

- $H_0$ : los datos de diámetro y altura tienen distribución normal
- $H_1$ : los datos de diámetro y altura no tienen distribución normal

El estadístico del test es:  $W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2}$  donde:

- $x_{(i)}$  (con el subíndice  $i$  entre paréntesis) es el número que ocupa la  $i$ -ésima posición en la muestra;
- $\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n) / n$  es la media muestral;
- la constante  $a_i$  se calcula.

### 3.4. Determinación del factor de forma

A partir de la evaluación realizada en el 2012 y uniendo los datos de las 9 parcelas evaluadas, se realizó la distribución diamétrica de los árboles, donde el tamaño de las clases fue 5 cm. En total se utilizaron 10 árboles por clase.

A los árboles en pie se les midió el diámetro a la altura del pecho y las alturas total y comercial, ésta última hasta un estimado de diámetro de 2 cm. Posteriormente se cortaron los árboles y se midió, tanto, el largo total del árbol como el diámetro cada metro, iniciando en la base.

Con los datos de cada árbol se determinó el volumen de un cilindro empleando el diámetro a la altura de pecho y la altura total. El volumen real se obtuvo a partir de la suma de los volúmenes de cada sección, los cuales, se calcularon con las fórmulas:

### Volumen del cilindro

$$V_c = \frac{\pi}{4} * d_{ap}^2 * H_t \quad \text{Donde:}$$

$V_c$  = volumen del cilindro ( $m^3$ ).

$d_{ap}$  = diámetro a la altura del pecho (m).

$H_t$  = altura total (m).

### Volumen real

$$V_r = \sum \left( \left( \frac{g_1 + g_2}{2} \right) * l_1 + \left( \frac{g_2 + g_3}{2} \right) * l_2 + \dots + \left( \frac{g_n + g_{(n+1)}}{2} \right) * l_n \right) \quad \text{Donde:}$$

$V_r$  = volumen real ( $m^3$ ).

$g$  = área basal de cada cara ( $m^2$ ).

$l$  = largo de la sección (m).

Para obtener el valor de área basal ( $g$ ) se emplea la siguiente fórmula:

$$g = \frac{\pi}{4} * \left( \frac{d_1 + d_2}{200} \right)^2 \quad \text{Donde:}$$

$g$  = área basal de cada cara ( $m^2$ ).

$d$  = diámetro de cada cara (cm).

$\pi$  = valor de Pi.

El valor del coeficiente de forma de cada árbol se obtuvo dividiendo el volumen real entre el volumen del cilindro

$$F_c = \frac{V_r}{V_c} \quad \text{Donde:}$$

$F_c$  = coeficiente de forma.

$V_c$  = volumen del cilindro ( $m^3$ ).

$V_r$  = volumen real ( $m^3$ ).

Mediante un análisis de varianza (ANOVA) se determinó si existen diferencias entre los coeficientes obtenidos. Se plantearon las siguientes hipótesis:

- $H_0$ : no existe diferencia entre los coeficientes de forma obtenidos en los árboles evaluados
- $H_1$ : al menos uno de los coeficientes de forma obtenidos en los árboles es diferente.

### **3.5. Elaboración de curvas de crecimiento y análisis de regresión**

Para determinar el crecimiento en diámetro, se analizó el desarrollo de los árboles remanentes en las parcelas, mediante los programas Excel e InfoStat, para obtener una ecuación que modele el crecimiento en diámetro de los árboles de cocobolo.

Para la elaboración de las curvas de crecimiento se empleó la información existen de las evaluaciones realizadas a las parcelas de cocobolo de ambas fincas y el volumen obtenido con el coeficiente de forma calculado. A partir de los datos promedios de los árboles se hizo un análisis de regresión simple para determinar si existen relaciones entre las variables evaluadas.

Con estos datos obtenidos, se creó una ecuación para proyectar el crecimiento del cocobolo a 30 años para estimar las posibles dimensiones de los árboles al turno de corta.

### **3.6. Determinación del volumen de duramen**

En los árboles cortados para el estudio del coeficiente de forma se midió el diámetro de duramen. Con esta información se obtuvo un volumen de duramen por árbol y se relacionó con el volumen total del árbol, lo cual permitió estimar el porcentaje de volumen del árbol que presenta duramen.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Evaluación del crecimiento de los rodales

#### 4.1.1. Finca Monte Fresco

En enero del 2012 se realizó la evaluación de las parcelas de cocobolo de la finca Monte Fresco dichos resultados se presentan en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Resultados de la evaluación de las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la finca Monte Fresco en 1995, a la edad de 16,6 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Parcela	Densidad (árbha <sup>-1</sup> )	Cantidad de ejes (ejsha <sup>-1</sup> )	Diámetro (cm)	IMA diámetro (cmaño <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
MF P1	425	425	17,8	1,1	11,0	10,8	63,37
MF P2	475	475	19,3	1,2	14,9	14,5	111,68
MF P3	300	525	12,8	0,8	12,1	7,3	49,04
MF P4	500	500	18,6	1,1	14,6	14,0	105,85
MF P5	400	425	19,7	1,2	14,7	13,5	100,82
MF P6	500	1025	13,4	0,8	9,7	15,8	83,71
<b>Promedio</b>	<b>433</b>	<b>563</b>	<b>16,9</b>	<b>1,0</b>	<b>12,8</b>	<b>12,7</b>	<b>85,74</b>
<b>Error de muestreo (%)</b>	<b>18%</b>	<b>42%</b>	<b>18%</b>	<b>---</b>	<b>34%</b>	<b>25%</b>	<b>33%</b>

Notas: IMA: Incremento medio anual

En el 2012 estas plantaciones presentan una densidad promedio de 433 árb ha<sup>-1</sup>, los cuales en promedio presentan 563 ejes ha<sup>-1</sup>; lo que significa una relación de 1,3 ejes árb<sup>-1</sup>. El diámetro promedio es de 16,9 cm, el cual representa un incremento medio de 1,0cm año<sup>-1</sup>. La altura es de 12,8m, sin embargo al realizar esta evaluación se presenta una limitante causada por la inclinación de los fustes en la mayoría de los árboles, por lo cual se considera que se subestima la altura, afectando el cálculo del volumen. El área basal es de 12,8 m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup> y el volumen en pie es de 85,74 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>.

El error de muestreo para las variables evaluadas es mayor al 10% debido a diferentes distanciamientos de siembra, donde unas áreas fueron plantadas a 3X3 metros y otras a 4x4 metros; y un manejo diferente en cuanto a poda de ejes en los diferentes sectores; lo anterior indica la necesidad de estratificar la finca, para mejorar el análisis de la información, no obstante debido a la poca cantidad de parcelas, se decide trabajar con los datos sin estratificar.

De manera general para la finca Monte Fresco se presentan en el Cuadro 5 los resultados históricos de las evaluaciones realizadas en los rodales de cocobolo desde 1997 hasta el 2012.

**Cuadro 5.** Resumen histórico de la evaluación de las parcelas permanentes en las plantaciones de *Dalbergia retusa* de la finca Monte Fresco hasta los 16,6 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012

Año de evaluación	Edad (años)	Densidad (árbha <sup>-1</sup> )	Cantidad de ejes (ejesha <sup>-1</sup> )	Diámetro (cm)	IMA diámetro (cmaño <sup>-1</sup> )	ICA diámetro (cmaño <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Vol. Acu. (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA Vol. acu (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
1997	2,3	758	925	3,9	1,7		4,5	1,1	2,76	2,76	1,2
1998	3,3	883	1158	5,6	1,7	1,6	5,3	2,8	7,91	7,91	2,4
1999	4,2	883	1142	6,6	1,6	1,3	6,4	4,0	13,43	13,43	3,2
1999 rem	4,3	867	1125	6,7	1,6		6,5	3,9	13,41	13,43	3,2
2000	5,3	867	1125	7,7	1,5	1,0	6,6	5,2	18,14	18,17	3,5
2000 rem	5,3	746	958	7,9	1,5		6,8	4,7	16,69	18,17	3,4
2001	6,4	746	958	9,0	1,4	1,1	7,1	6,1	23,16	24,64	3,8
2001 rem	6,5	608	800	9,5	1,5		7,5	5,5	21,18	24,64	3,8
2002	7,3	608	800	10,6	1,4	1,2	9,2	6,8	31,97	35,43	4,8
2002 rem	7,4	596	783	10,6	1,4		9,2	6,7	31,71	35,43	4,8
2004	8,7	596	783	11,6	1,3	0,8	9,8	8,1	40,56	44,28	5,1
2004 rem	8,8	579	754	11,7	1,3		9,8	7,9	39,84	44,28	5,1
2005	9,9	579	754	12,6	1,3	0,8	8,2	9,3	38,72	43,16	4,4
2005 rem	10,0	575	717	12,7	1,3		8,2	9,1	38,04	43,16	4,3
2006	10,8	575	717	13,2	1,2	0,7	10,7	9,9	55,75	60,88	5,7
2006 rem	10,8	446	579	13,9	1,3		11,0	8,8	49,85	60,88	5,6
2007	12,0	446	579	14,8	1,2	0,8	11,3	9,9	57,58	68,61	5,7
2008	12,6	446	579	15,2	1,2	0,7	11,8	10,5	64,35	75,37	6,0
2009	13,5	446	579	15,8	1,2	0,7	12,4	11,4	73,91	84,93	6,3
2009 rem	13,6	433	563	15,9	1,2		12,4	11,1	72,09	84,93	6,3
2010	14,6	433	563	16,3	1,1	0,4	13,0	11,8	81,28	94,12	6,4
2011	15,6	433	563	16,7	1,1	0,4	12,2	12,3	78,06	90,89	5,8
2012	16,6	433	563	16,9	1,0	0,3	12,8	12,7	85,74	98,58	5,9

**Notas:** IMA: Incremento medio anual; ICA: Incremento corriente anual

Rem: representa los resultados de los arboles remanentes al raleo o a la pérdida de algunos individuos.

Vol. Acu.: volumen acumulado

A los 16,6 años el volumen acumulado es de 98,58 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, el cual presenta un incremento de 5,9 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>; además el incremento medio anual del diámetro es de 1 cm año<sup>-1</sup>, valor similar al reportado por CATIE 2000 para la zona del Pacífico Seco de Costa Rica. El incremento corriente anual a los 16,6 años es de 0,3 cm año<sup>-1</sup>.

En estos rodales se aplicaron raleos en los años 2000, 2001 y 2006; con intensidades de 14%, 18% y 22% de la densidad respectivamente. Estos raleos produjeron leves aumentos en el ICA del diámetro un año después de su ejecución, no obstante el crecimiento en diámetro ha continuado disminuyendo después el último raleo aplicado en 2006. Dentro del Cuadro 5 se muestra también la pérdida de árboles debido a la competencia por el espacio; donde normalmente los árboles y ejes que mueren han quedado suprimidos al darse el cierre del dosel.

#### 4.1.2. Finca Las Lomitas

La evaluación de las parcelas de cocobolo de la finca Las Lomitas se realizó en enero del 2012 cuando la plantación contaba con 15,5 años, lo cual se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Resultados de la evaluación de las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la finca Las Lomitas en 1996 a la edad de 15,5 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Parcela	Densidad (árbha <sup>-1</sup> )	Cantidad de ejes (ejesha <sup>-1</sup> )	Diámetro (cm)	IMA diámetro (cmaño <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /ha <sup>-1</sup> )
LL P1	275	500	17,5	1,1	12,0	13,44	90,56
LL P2	800	975	14,7	0,9	11,4	17,55	104,73
LL P3	675	800	13,6	0,9	12,3	12,54	84,80
<b>Promedio</b>	<b>583</b>	<b>758</b>	<b>15,3</b>	<b>1,0</b>	<b>11,9</b>	<b>14,51</b>	<b>93,36</b>
<b>Error de muestreo (%)</b>	<b>116%</b>	<b>78%</b>	<b>32%</b>		<b>10%</b>	<b>45%</b>	<b>27%</b>

Notas: IMA: Incremento medio anual.

Como se observa en el cuadro 6, la densidad presenta mucha variación entre las parcelas, siendo la parcela 2 la que presenta la mayor cantidad de árboles por hectárea; mientras que el menor diámetro lo presenta la parcela 3. Los mayores porcentajes de error se presentan en la densidad de árboles y ejes, debido a la variación en el manejo entre parcelas, esta situación indica la necesidad de estratificar la finca para un mejor análisis, no obstante al ser solo tres parcelas se decidió no estratificar las áreas.

En promedio estos rodales tienen 583 árb ha<sup>-1</sup> y 758 ejes ha<sup>-1</sup>, lo cual significa una relación de 1,3 ejes árb<sup>-1</sup>, los cuales tienen un diámetro de 15,3 cm y un IMA del diámetro de 1,0 cm año<sup>-1</sup>. En promedio la altura es de 11,9 m, el área basal de 14,51 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y el volumen en pie de 93,36 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

En el Cuadro 7 se presenta un resumen histórico de las evaluaciones realizadas a las plantaciones de cocobolo de la finca Las Lomitas; al compararlas con lo presentado en el Cuadro 5 se observa que estas plantaciones presentan un menor desarrollo en diámetro que las plantaciones de la finca Monte Fresco, no obstante en el último periodo de evaluación hay un ICA del diámetro mayor en la finca Las Lomitas (0,7 cm año<sup>-1</sup> finca las Lomitas y 0,3 cm año<sup>-1</sup> finca Monte Fresco).

**Cuadro 7.** Resumen histórico de la evaluación de las parcelas permanentes en las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la finca Las Lomitas hasta los 15,5 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Año de evaluación	Edad (años)	Densidad (árb ha <sup>-1</sup> )	Cantidad de ejes (ejes ha <sup>-1</sup> )	Diámetro (cm)	IMA diámetro (cm año <sup>-1</sup> )	ICA diámetro (cm año <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Vol. Acu. (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA Vol. acu (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
1997	1,17	967	1250	1,2	1,1		2,0	0,18	0,26	0,26	0,2
1998	2,17	967	1267	3,4	1,6	2,1	3,5	1,31	2,64	2,64	1,2
1999	3,17	967	1258	4,9	1,6	1,2	4,5	2,62	6,66	6,66	2,1
2000	4,17	967	1250	5,9	1,4	0,9	5,8	3,63	11,52	11,52	2,8
2000 rem	4,23	742	1017	6,1	1,5		6,0	3,23	10,43	11,52	2,7
2001	5,33	742	1017	7,1	1,3	0,9	5,9	4,34	13,81	14,90	2,8
2002	6,25	742	1017	8,0	1,3	1,0	7,0	5,51	20,82	21,90	3,5
2004	7,58	742	1017	9,1	1,2	0,8	7,9	7,00	29,42	30,51	4,0
2005	8,83	742	1008	9,9	1,1	0,6	7,1	8,22	30,71	31,80	3,6
2006	9,67	742	1008	10,5	1,1	0,7	8,6	9,24	43,40	44,48	4,6
2006 rem	9,75	617	808	11,2	1,2		9,1	8,30	39,86	44,48	4,6
2007	10,92	617	808	12,2	1,1	0,8	10,7	9,68	55,60	60,22	5,5
2008	11,50	617	808	12,7	1,1	0,9	11,5	10,50	63,92	68,53	6,0
2009	12,65	617	800	13,2	1,0	0,5	11,4	11,49	70,89	75,51	6,0
2009 rem	12,73	608	792	13,2	1,0		11,4	11,40	70,43	75,51	5,9
2010	13,59	608	792	14,0	1,0	0,9	11,8	12,77	80,29	85,36	6,3
2011	14,50	608	775	14,6	1,0	0,6	10,9	13,42	77,49	82,56	5,7
2011 rem	14,58	583	758	14,7	1,0		11,0	13,30	76,97	82,56	5,7
2012	15,50	583	758	15,3	1,0	0,7	11,9	14,51	93,37	98,96	6,386

**Notas:** IMA: Incremento medio anual; ICA: Incremento corriente anual

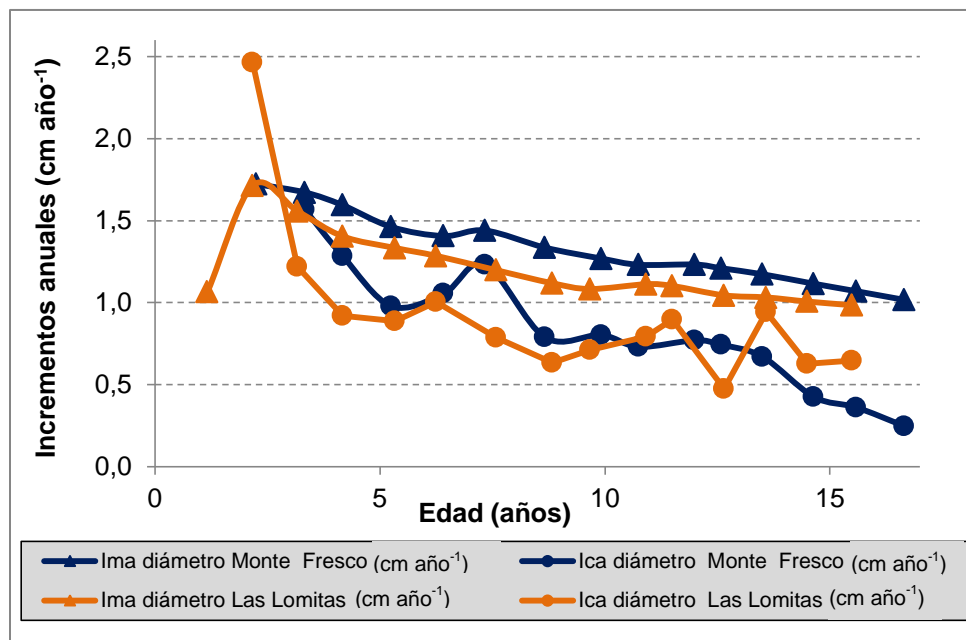
Rem: representa los resultados de los arboles remanentes al raleo o a la pérdida de algunos individuos.

Vol. Acu.: volumen acumulado

En estas plantaciones se aplicaron dos raleos los cuales tuvieron una intensidad de 20% de densidad y un 19% de los ejes. Se observa un leve incremento en el ICA del diámetro dos años después de cada raleo y vuelva a reducirse al tercer año. Las demás pérdidas reportadas se deben a árboles y ejes suprimidos que tuvieron poco desarrollo y se secaron al darse el cierre del dosel.

#### 4.1.3. Comparación de los incrementos anuales en diámetro

En la Figura 5 se muestra la relación del IMA e ICA del diámetro para cocobolo en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas.



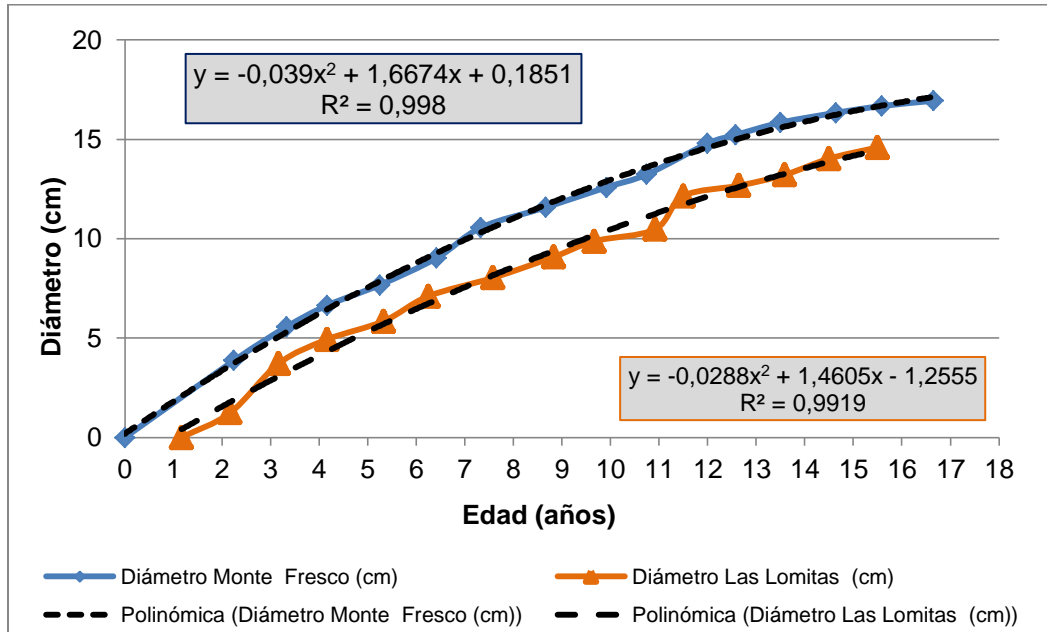
**Figura 5.** Comportamiento de los incrementos corriente y medio anual del diámetro para *Dalbergia retusa* en las finca Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Nótese que los valores de ICA de diámetro para ambas fincas han venido disminuyendo paulatinamente, siendo los valores más bajos los reportados en la finca Monte Fresco.



## 4.2. Comportamiento del diámetro

En la Figura 6 se presenta una representación gráfica del comportamiento promedio del diámetro para la especie cocobolo en ambas plantaciones.



**Figura 6.** Comportamiento del diámetro de *Dalbergia retusa* en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Como se muestra en la figura anterior el crecimiento promedio del diámetro en ambas fincas presenta una forma de curva que han iniciado a estabilizarse, principalmente en la finca Monte Fresco, lo cual hace suponer que el crecimiento se puede explicar mediante ecuaciones polinómicas.

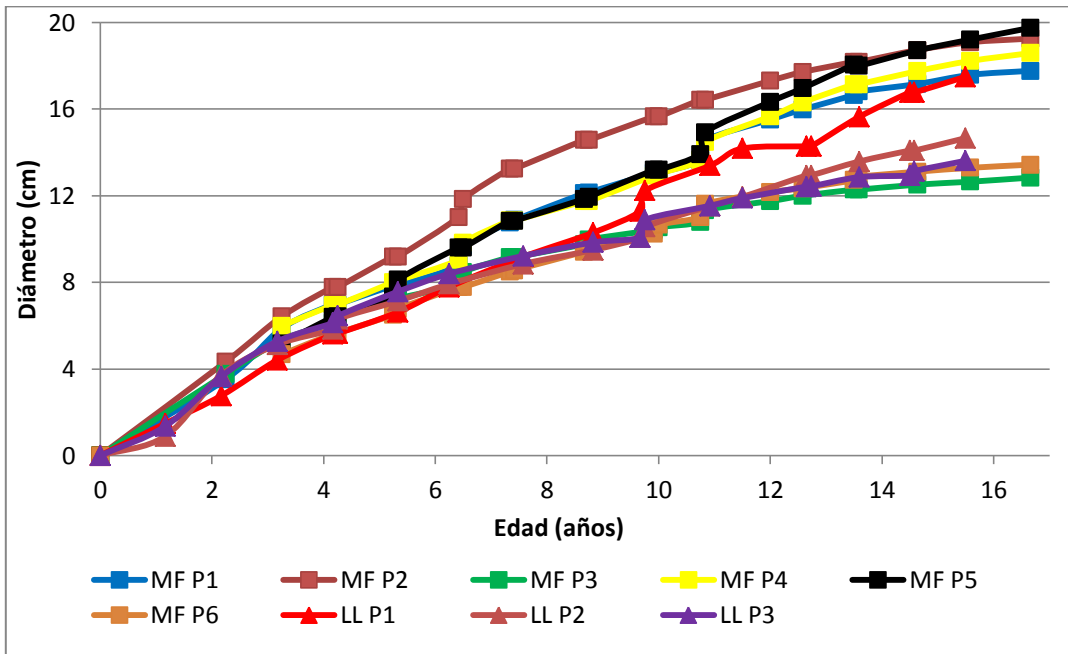
Las ecuaciones para cada finca serían de la siguiente forma:

$$\text{Finca Monte Fresco } y = -0,039 * (x)^2 + 1,6674 * (x) + 0,1851$$

$$\text{Finca Las Lomitas } y = -0,028 * (x)^2 + 1,4605 * (x) - 1,2555$$

Donde:  $y$  = diámetro (cm)  
 $x$  = edad (años)

Dado que las parcelas de las fincas Monte Fresco y Las Lomitas presentan errores de muestreo de 18% y 32% para el diámetro respectivamente, debido a diferencias en el distanciamiento de siembra y labores silviculturales aplicadas, se presenta en la Figura 7 el desarrollo del diámetro para cada parcelas.



**Figura 7.** Comportamiento del diámetro de *Dalbergia retusa* por parcela en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

En la figura anterior se muestra que al aumentar la edad el crecimiento en diámetro se ha diferenciado entre las parcelas, siendo las parcelas de 5, 2, 4 y 1 de la finca Monte Fresco, así como la parcela 1 de Las Lomitas las que presentan los mayores valores, mientras que los menores diámetros se dan en las parcelas 3 y 6 de Monte Fresco y en las parcelas 2 y 3 de Las Lomitas.

Para cada una de las parcelas de la Figura 7 se creó una ecuación:

$$\text{MF P1 } y = -0,0374 * (x)^2 + 1,70834 * (x) + 0,111$$

$$\text{MF P2 } y = -0,0640 * (x)^2 + 2,2415 * (x) - 0,323$$

$$\text{MF P3 } y = -0,045 * (x)^2 + 1,4723 * (x) + 0,5895$$

$$\text{MF P4 } y = -0,0288 * (x)^2 + 1,5912 * (x) + 0,4685$$

$$\text{MF P5 } y = -0,0234 * (x)^2 + 1,6061 * (x) + 0,0255$$

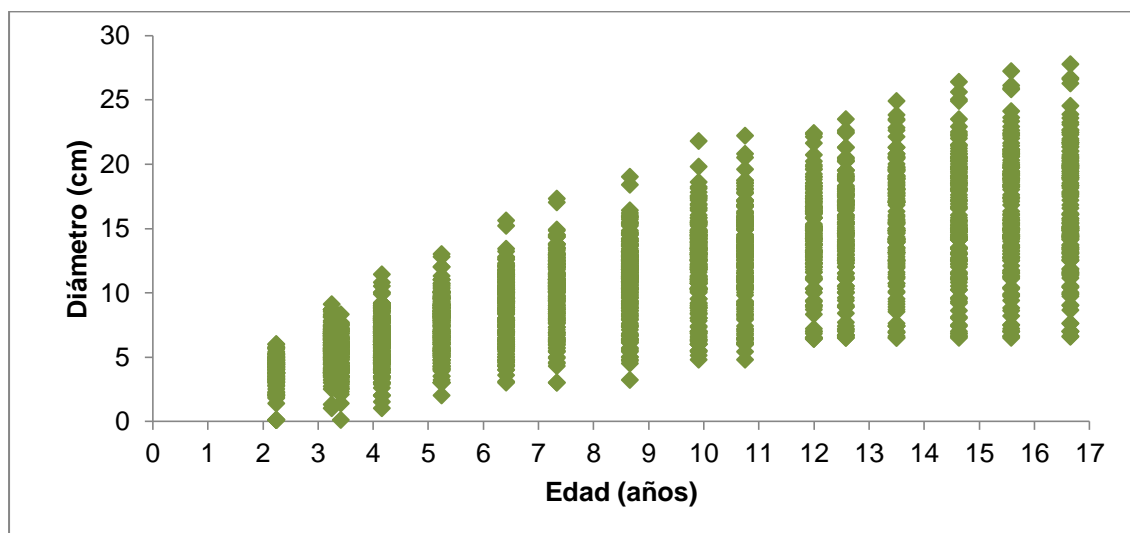
$$\text{MF P6 } y = -0,0365 * (x)^2 + 1,4147 * (x) + 0,1733$$

$$\text{LL P1 } y = -0,0127 * (x)^2 + 1,3215 * (x) + 0,0709$$

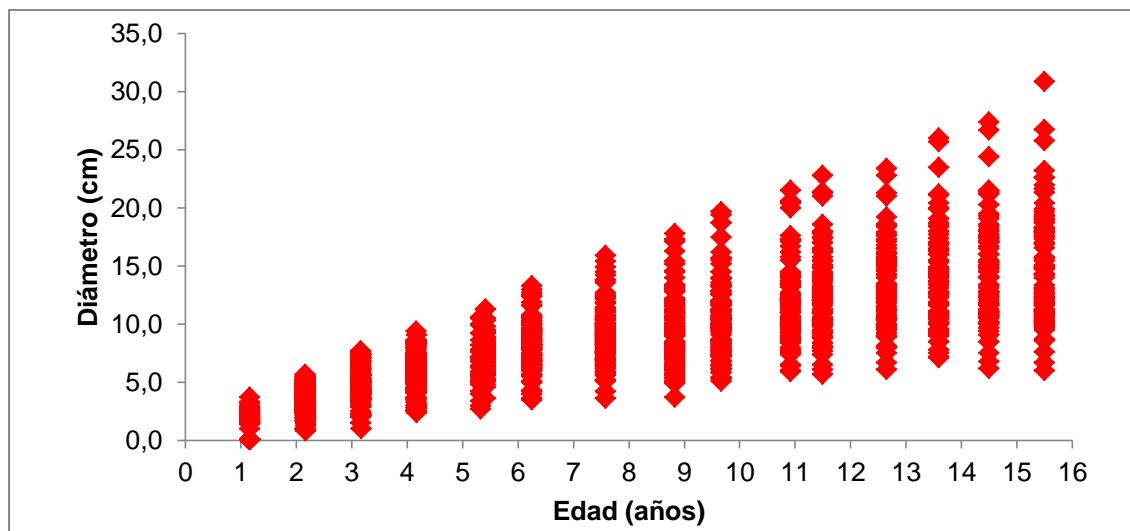
$$\text{LL P2 } y = -0,0285 * (x)^2 + 1,3471 * (x) + 0,4069$$

$$\text{LL P3 } y = -0,0445 * (x)^2 + 1,5214 * (x) + 0,3309$$

La proyección de diámetro a partir de las ecuaciones polinomiales presenta la limitante de la dispersión de los datos originales, en donde la variación de los valores de diámetro aumenta conforme aumenta la edad de las plantaciones. En las Figuras 8 y 9 se presenta el comportamiento de los diámetros para cada edad evaluada.

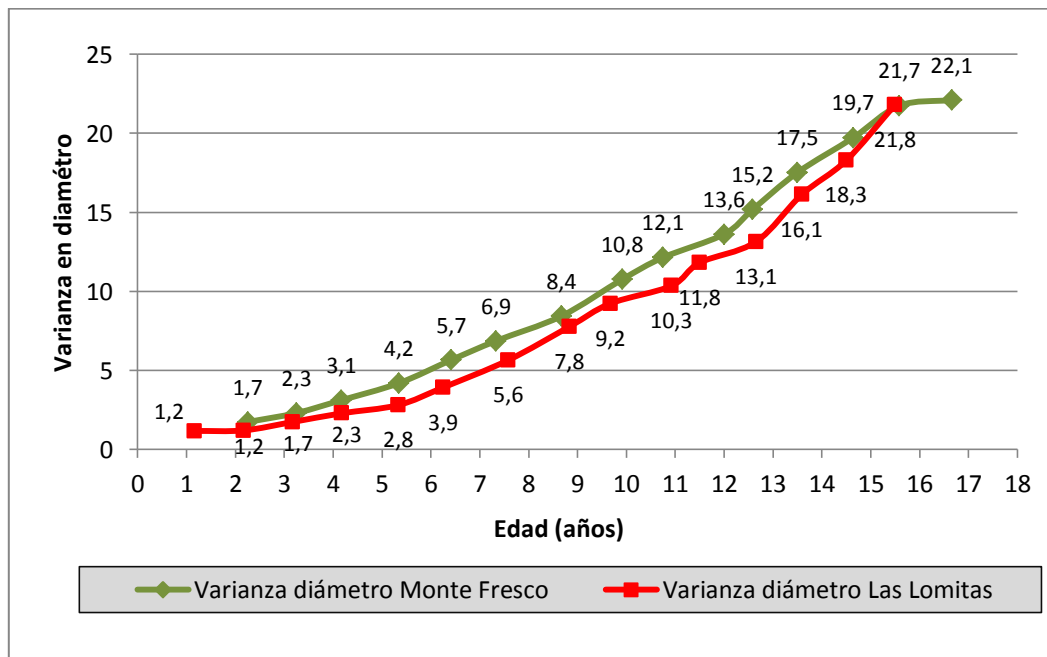


**Figura 8.** Variación del diámetro de *Dalbergia retusa* en la finca Monte Fresco desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.



**Figura 9.** Variación del diámetro de *Dalbergia retusa* en la finca Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

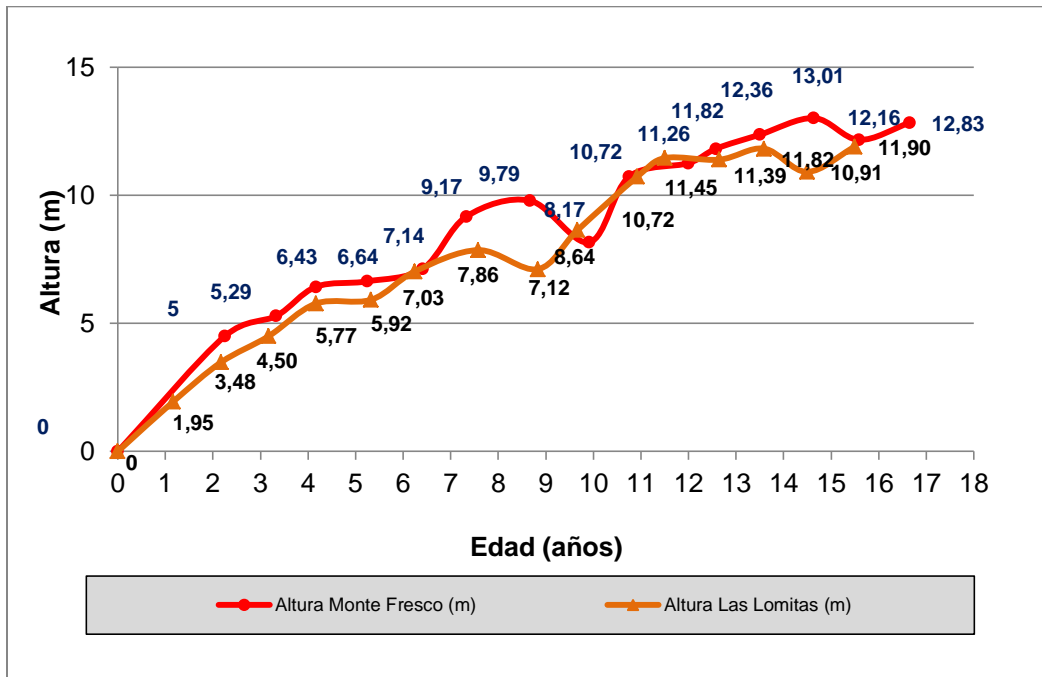
Al obtener las varianzas en el diámetro para cada finca se observa como ésta aumenta conforme aumenta la edad, esto se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Comportamiento de la varianza del diámetro para *Dalbergia retusa* en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

### 4.3. Comportamiento de la altura

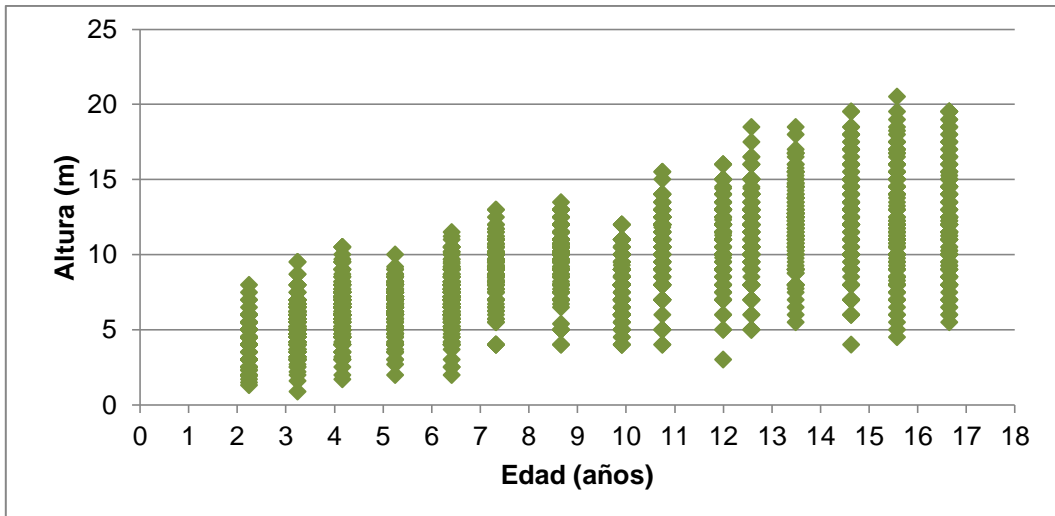
La estimación de la altura en cocobolo es afectada por la forma del árbol, el cual presenta varios ejes, los cuales en la mayoría crecen inclinados y con varias torceduras. En la Figura 11 se presenta el crecimiento promedio de la altura para cada finca.



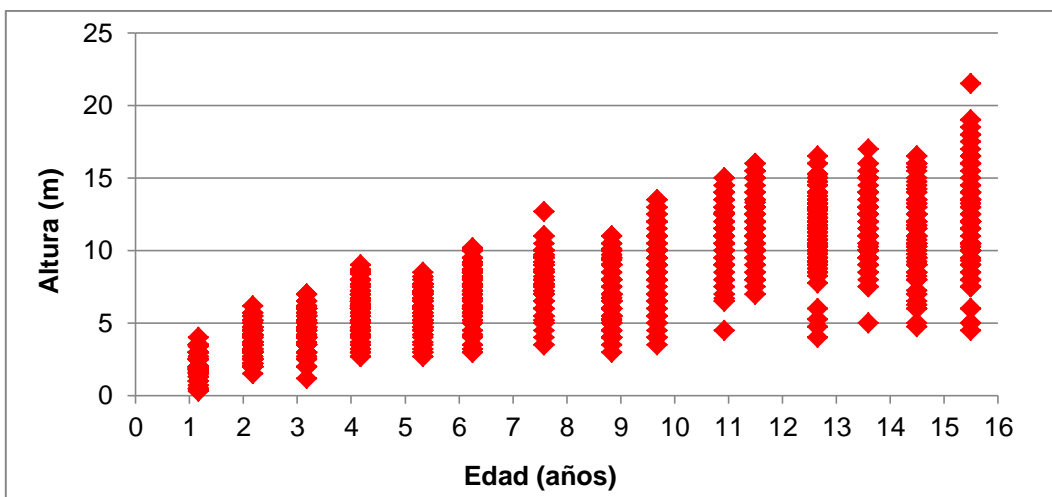
**Figura 11.** Comportamiento de la altura de *Dalbergia retusa* en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

En los últimos años, el crecimiento en altura se ha visto afectado por la presencia de un bejuco que al desarrollarse en las copas de los árboles de cocobolo ocasiona que esta se quiebre debido al peso.

Al igual que lo reportado para el diámetro la variación de los datos aumenta con la edad, esto se muestra en las Figuras 12 y 13.

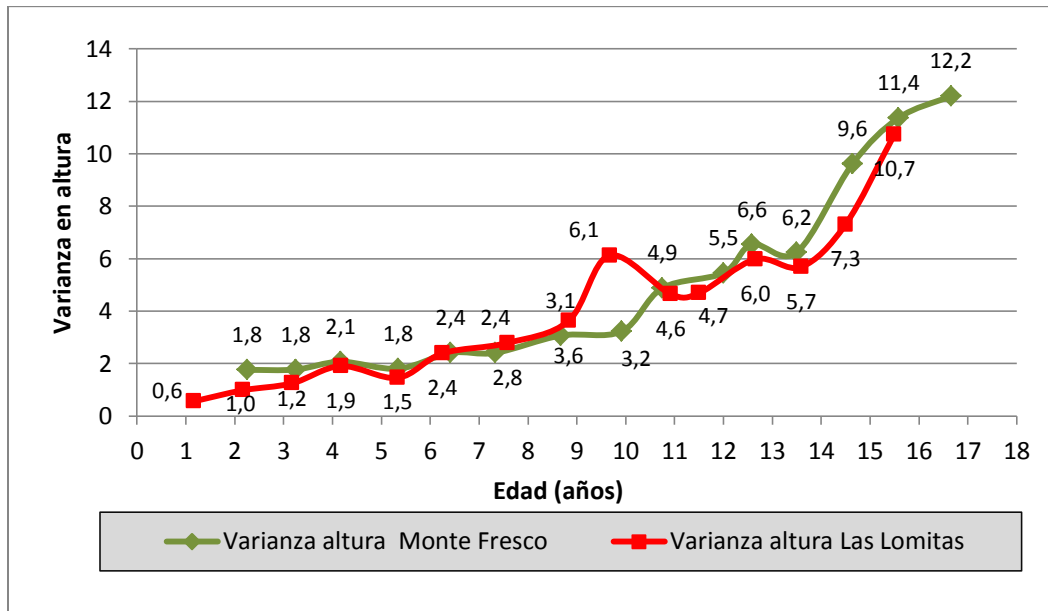


**Figura 12.** Variación de la altura de *Dalbergia retusa* en la finca Monte Fresco desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.



**Figura 13.** Variación de la altura de *Dalbergia retusa* en la finca Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

La varianza en la altura aumenta con la edad, no obstante algunos datos no siguen esa tendencia, caso de los años 10 y 14. En la Figura 14 se observa el comportamiento de la varianza de la altura.



**Figura 14.** Comportamiento de la varianza de la altura para *Dalbergia retusa* en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas desde 1997 hasta el 2012. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

#### 4.4. Pruebas de normalidad

Dado las varianzas reportadas para ambas fincas en diámetro y altura se aplicó la prueba de Shapiro–Wilk para determinar su normalidad, para lo cual se establecieron las siguientes hipótesis de prueba:

- $H_0$ : los datos de diámetro y altura tienen distribución normal
- $H_1$ : los datos de diámetro y altura no tienen distribución normal

En el Cuadro 8 se presentan los valores de W y P para el diámetro y altura de la finca Monte Fresco; para lo cual se requieren valores de W cercanos a 1, los cuales indican que la distribución normal es apropiada para los datos y valores de P mayores a 0,05 que indican que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula.

**Cuadro 8.** Valores de P y W para determinar la normalidad en diámetro y altura para las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

<b>Edad</b>	2,25	3,25	4,14	5,25	6,42	7,33	8,67	9,92	10,75	12	12,58	13,5	14,64	15,58	16,6
	<b>Valores para el diámetro</b>														
<b>W</b>	0,92	0,90	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
<b>valor P</b>	<0,0001	0,209	0,193	0,101	0,024	0,152	0,028	0,018	0,036	0,003	0,018	0,029	0,069	0,041	0,073
	<b>Valores para la altura</b>														
<b>W</b>	0,960	0,990	0,980	0,970	0,980	0,960	0,960	0,960	0,960	0,970	0,980	0,980	0,980	0,960	0,960
<b>valor P</b>	0,015	0,154	0,002	<0,0001	0,880	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001	0,092	0,224	0,642	0,208	0,004	0,002

Según los valores de la prueba de Shapiro–Wilk aplicados a los datos de diámetro y altura, el valor de W indica que para todos los años la distribución normal puede ser apropiada para los datos; sin embargo el valor P indica que para el caso del diámetro solo los datos de las evaluaciones realizadas a los 3,25; 4,14; 7,33; 14,64; 16,6 años no presentan evidencia para rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ), según la cual los datos tienen una distribución normal. En el caso de la altura son los datos de las evaluaciones de 3,25; 6,42; 12; 12,58; 13,5; 14,64 años los que no presentan evidencia para rechazar la hipótesis nula. Para las evaluaciones de diámetro y altura donde los valores de P son menores a 0,05 se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) ya que los datos no tienen una distribución normal

En la Cuadro 7 se muestran los valores de W y P obtenidos para la finca Las Lomitas.

**Cuadro 9.** Valores de P y W para determinar la normalidad en diámetro y altura para las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

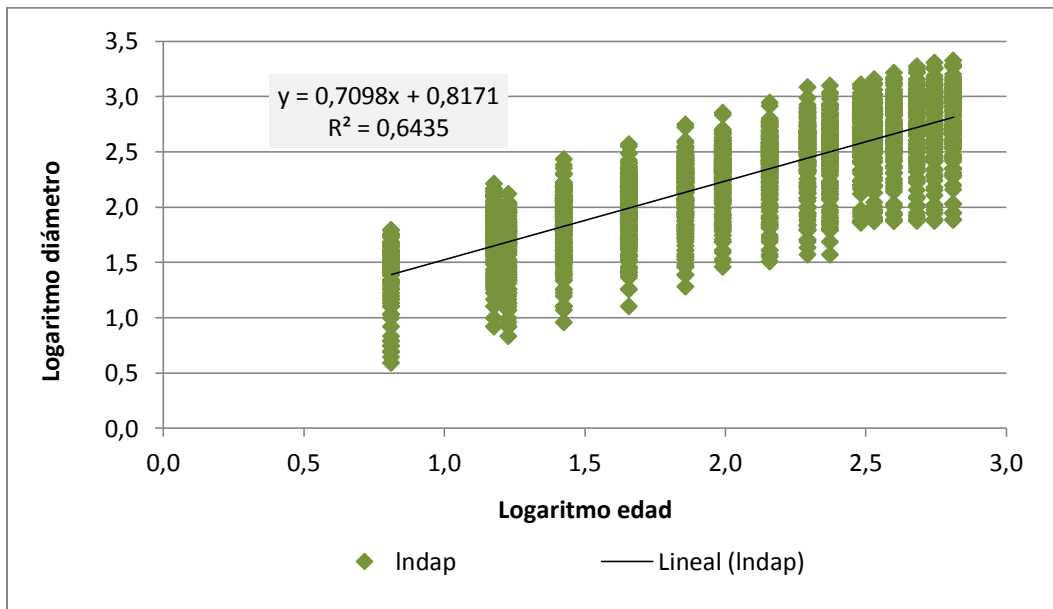
<b>Edad</b>	1,17	2,17	3,17	4,17	5,33	6,2	7,58	8,83	9,67	10,92	11,5	12,65	13,59	14,5	15,5
	<b>Valores para el diámetro</b>														
<b>W</b>	0,80	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,95	0,95	0,95	0,96	0,94	0,95	0,95
<b>valor P</b>	<0,0001	0,048	0,079	0,032	0,656	0,289	0,190	0,059	0,001	0,008	0,016	0,023	0,003	0,010	0,028
	<b>Valores para la altura</b>														
<b>W</b>	0,94	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97	0,98	0,95	0,95	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,98
<b>valor P</b>	0,000	0,003	0,013	0,002	0,014	0,682	0,321	0,001	0,004	0,163	0,022	0,104	0,096	0,262	0,487



En la finca Las Lomitas los valores de W son cercanos a 1, tanto para el diámetro como para la altura, pero solo los valores de diámetro de los años 3,17; 5,33; 6,2; 7,58 y 7,58; así como las alturas de los años 3,2; 7,58; 10,92; 12,65; 13,59; 14,5 y 15,5 son mayores a 0,05, por lo cual no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula, según la cual los datos tienen una distribución normal. Para las evaluaciones de diámetro y altura donde los valores de P son menores a 0,05 se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) ya que los datos no tienen una distribución normal

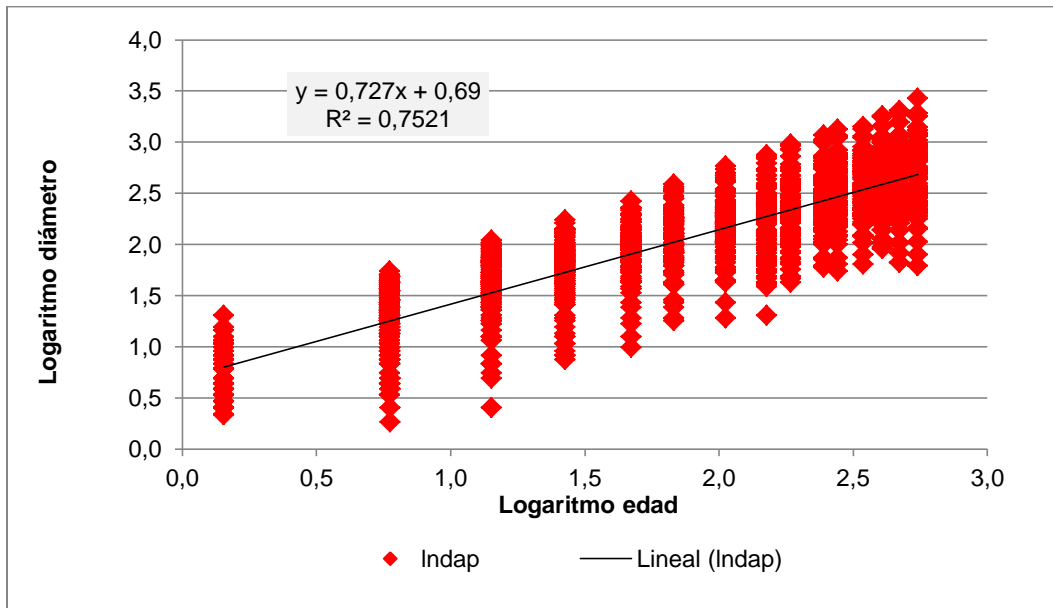
Dado que las evaluaciones anuales de diámetro y altura en ambas fincas son no-lineales, se emplean logarítmicos para linealizar los datos y obtener una ecuación a partir de una regresión lineal a los datos de ambas variables.

La Figura 15 muestra una relación lineal entre los logaritmos de la edad y el diámetro, además de un  $R^2$  de 0,64; el cual se considera aceptable para este tipo de población.



**Figura 15.** Relación logarítmica entre la edad y el diámetro de *Dalbergia retusa* en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

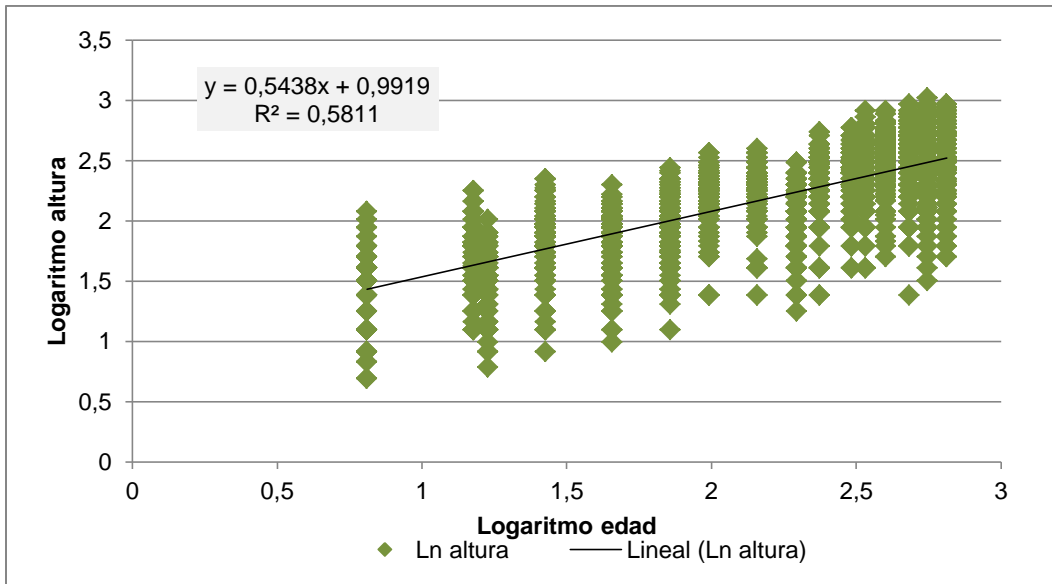
Para determinar el diámetro de cocobolo a partir de la edad en la finca Monte Fresco la ecuación es la siguiente:  $\text{Ln}(dap) = 0,7107 * \text{Ln}(edad) + 0,8149$



**Figura 16.** Relación logarítmica entre la edad y el diámetro de *Dalbergia retusa* en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

La relación lineal entre los logaritmos de la edad y el diámetro de la finca Las Lomitas presenta un  $R^2$  de 0,75; valor superior al reportado en la finca Monte Fresco. Esta regresión generó la siguiente ecuación para determinar el diámetro de cocobolo a partir de la edad:  $\text{Ln}(dap) = 0,727 * \text{Ln}(edad) + 0,69$

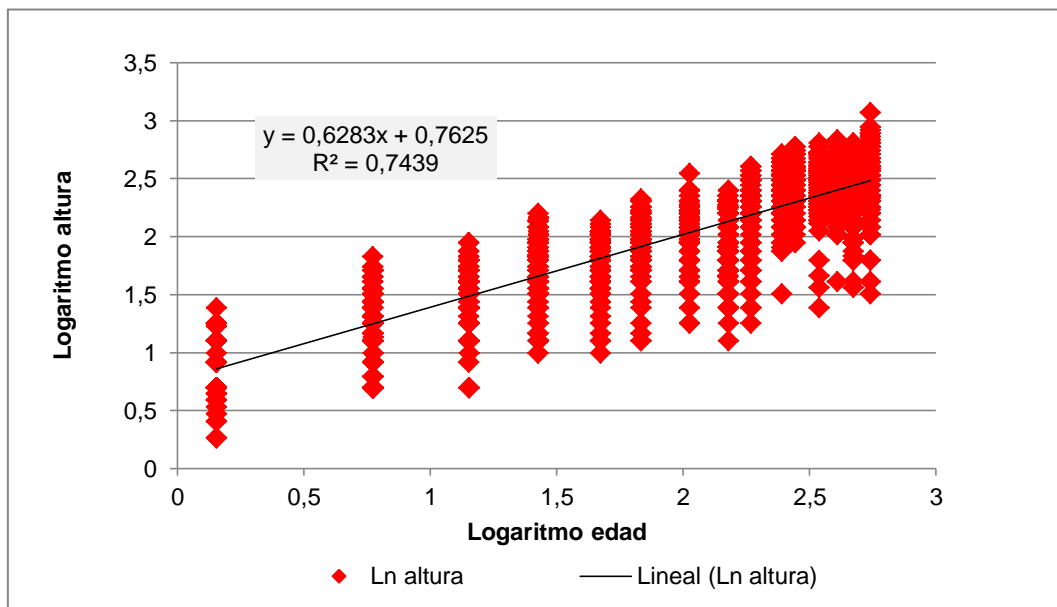
En la Figura 17 se muestra la relación lineal entre logaritmos de la edad y la altura para la finca Monte Fresco, dicha relación presenta un  $R^2$  de 0,58.



**Figura 17.** Relación logarítmica entre la edad y el altura de *Dalbergia retusa* en la finca Monte Fresco. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

La regresión para determinar la altura de cocobolo a partir de la edad generó la siguiente ecuación:  $\mathbf{Ln(h) = 0,5438 * ln(edad) + 0,9919}$

La Figura 18 muestra la relación entre los logaritmos de altura edad para la finca Las Lomitas.



**Figura 18.** Relación logarítmica entre la edad y la altura de *Dalbergia retusa* en la finca Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

En la finca Las Lomitas se presenta una mejor relación entre los logaritmos de altura y la edad; donde el  $R^2$  de 0,74 es superior al reportado en la finca Monte Fresco, esta relación generó la siguiente ecuación:

$$\ln(h) = 0,6283 * \ln(edad) + 0,7625$$

#### 4.5. Determinación del coeficiente mórfico

Basado en la evaluación de las parcelas permanentes realizada en el 2012 se cuantificó la cantidad de individuos por clase diamétrica y se decidió evaluar 5 individuos de cada clase en cada finca. En el cuadro siguiente se muestra la distribución de los individuos para cada una de las fincas.

**Cuadro 10.** Cantidad de árboles por clase diamétrica para las plantaciones de *Dalbergia retusa* establecidas en la fincas Monte Fresco y Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Clase	Rango de diámetros	Cantidad de individuos Monte Fresco	Cantidad de individuos Las Lomitas
1	5-10	130	30
2	10-15	170	285
3	15-20	100	197
4	20-25	17	55
5	25+	16	16
<b>Total</b>		<b>433</b>	<b>583</b>

En total se evaluaron 43 árboles entre las dos fincas, de los cuales se cortaron 31. Éstos se distribuyeron entre las clases diamétricas 1, 2 y 3, con 10, 11 y 10 árboles cortados respectivamente. Los restantes 12 árboles evaluados y no cortados pertenecían a las clases 4 (10 árboles) y 5 (2 árboles)

En el Cuadro 11 se presentan los resultados de los árboles evaluados.

**Cuadro 11.** Resultados de los árboles de *Dalbergia retusa* evaluados en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Árbol	Diámetro (cm)	Altura total (m)	Área basal (m <sup>2</sup> )	Volumen comercial (m <sup>3</sup> )	Volumen cilindro (m <sup>3</sup> )	Relación volumen cilindro vs volumen comercial
36	6,00	6,10	0,00	0,010	0,017	0,563
29	6,80	7,80	0,00	0,008	0,028	0,267
27	7,50	7,80	0,00	0,011	0,034	0,307
11	8,00	8,50	0,01	0,023	0,043	0,548
28	8,60	7,50	0,01	0,014	0,044	0,331
7	8,60	5,60	0,01	0,025	0,033	0,761
30	8,70	7,60	0,01	0,022	0,045	0,498
6	8,80	12,30	0,01	0,031	0,075	0,418
18	9,00	8,70	0,01	0,032	0,055	0,571
43	9,50	9,60	0,01	0,016	0,068	0,235
4	11,30	14,00	0,01	0,087	0,140	0,618
40	11,40	10,40	0,01	0,036	0,106	0,342
22	11,90	10,20	0,01	0,061	0,113	0,542
32	12,00	11,00	0,01	0,025	0,124	0,198
5	12,10	11,00	0,01	0,048	0,126	0,378
3	12,60	12,00	0,01	0,084	0,150	0,565
8	13,20	11,60	0,01	0,060	0,159	0,375
26	14,10	10,00	0,02	0,054	0,156	0,346
24	14,10	13,60	0,02	0,016	0,212	0,073
1	14,30	10,50	0,02	0,109	0,169	0,648
35	14,40	13,50	0,02	0,093	0,220	0,424
31	15,30	10,40	0,02	0,000	0,191	0,000
2	15,90	11,00	0,02	0,114	0,218	0,523
9	16,00	16,50	0,02	0,166	0,332	0,500
42	16,00	13,20	0,02	0,103	0,265	0,388
19	16,40	13,30	0,02	0,055	0,281	0,195
12	16,50	8,70	0,02	0,132	0,186	0,711
10	16,70	9,50	0,02	0,109	0,208	0,523
33	17,00	12,90	0,02	0,073	0,293	0,248
37	18,10	12,50	0,03	0,168	0,322	0,522
20	19,40	11,00	0,03	0,149	0,325	0,459
16	20,10	16,30	0,03	0,188	0,517	0,363
23	21,20	13,50	0,04	0,187	0,477	0,393
39	21,90	11,00	0,04	0,252	0,414	0,609
41	22,60	18,00	0,04	0,196	0,722	0,271
38	22,80	12,75	0,04	0,179	0,357	0,502
25	23,10	15,50	0,04	0,189	0,650	0,291
13	23,30	15,50	0,04	0,190	0,661	0,288
34	23,70	16,50	0,04	0,187	0,728	0,256
17	24,00	17,00	0,05	0,221	0,769	0,288
15	24,10	16,00	0,05	0,283	0,730	0,388
21	25,20	11,00	0,05	0,174	0,549	0,316
14	27,20	17,50	0,06	0,194	1,017	0,191
<b>Valor promedio del coeficiente de volumen comercial</b>						<b>0,401</b>

En promedio para los árboles evaluados, el coeficiente mórfico resultante de la relación entre el volumen comercial y el volumen del cilindro es de 0,401. Este factor se reduce al aumentar el diámetro promedio de los árboles tal y como se muestra en el Cuadro 12.

**Cuadro 12.** Factor de forma para el volumen comercial por clase diamétrica para la especie *Dalbergia retusa*. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Clase diamétrica	Factor de volumen comercial
5-10	0,450
10-15	0,410
15-20	0,407
20-25	0,365
25+	0,254
<b>Promedio</b>	<b>0,401</b>

A partir del coeficiente mórfico promedio y el volumen de cilindro de cada árbol evaluado, se calculó un volumen comercial, el cual se incluyó dentro de varios modelos que contemplan el diámetro; tales como diámetro cuadrado, logaritmo del diámetro, asimismo, modelos de área basal por el coeficiente de volumen y área basal por altura.

La evaluación de los árboles individuales mostró que la altura no es afectada por la inclinación de los ejes, por lo tanto se incluyó como una de las variables a considerar en las ecuaciones de volumen.

Las variables independientes de cada modelo son:

- Modelo 1 la variable independiente: diámetro.
- Modelo 2 la variable independiente: diámetro cuadrado.
- Modelo 3 la variable independiente: diámetro por altura.
- Modelo 4 la variable independiente: diámetro cuadrado por altura.
- Modelo 5 la variable independiente: área basal por coeficiente mórfico.
- Modelo 6 la variable independiente: área basal por altura.

Para estos modelos se establecieron las siguientes hipótesis de prueba:

- $H_0$ : el modelo presentan una relación lineal entre el volumen comercial y la variable independiente.
- $H_1$ : el modelo no presentan una relación lineal entre el volumen comercial y la variable independiente.

En el Cuadro 13 se presentan los resultados de las regresiones lineales aplicadas a cada modelo para predecir el volumen comercial.

**Cuadro 13.** Resultados de la regresión lineal aplicada a varios modelos para predecir el volumen comercial en la especie *Dalbergia retusa*. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Modelo	R2	Constante	Coefficiente	F	Valor p
1	0,8665	-0,1340934	0,0159935	266,02	<0,0001
2	0,9161	-0,0231696	0,0005008	477,52	<0,0001
3	0,9606	-0,0551071	0,0008584	1000,09	<0,0001
4	0,9903	0,0001654	0,0000310	4173,42	<0,0001
5	0,9144	-0,0215017	15,8501950	438,11	<0,0001
6	0,9902	0,0002106	0,3969653	4153,15	<0,0001

Los modelos presentados en el Cuadro 13 no presentan evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que hay relación lineal entre volumen y las variables independientes utilizadas, esto a un 95% de confianza.

Las ecuaciones obtenidas para estimar el volumen comercial son las siguientes:

- Modelo 1:  $Vc = -0,1340934 + 0,0159935 * d$
- Modelo 2:  $Vc = -0,0231696 + 0,0005008 * (d)^2$
- Modelo 3:  $Vc = -0,0551071 + 0,0008584 * d * h$
- Modelo 4:  $Vc = 0,0001654 + 0,0008584 * (d)^2 * h$
- Modelo 5:  $Vc = -0,0215017 + 15,8501950 * g * (0,401)$
- Modelo 6:  $Vc = 0,0002106 + 0,3969653 * g * h$

Donde:

Vc: volumen comercial (m<sup>3</sup>).

d: diámetro a la altura del pecho (cm).

h: altura (m).

g: área basal (m<sup>2</sup>).

Los modelos 4 y 6, que incluyen el diámetro y el área basal junto con la altura, presentan los valores más altos de R<sup>2</sup>, por lo cual son las ecuaciones que presentan un mejor estimado del volumen comercial.

#### 4.6. Determinación del porcentaje de duramen

De los 30 árboles que se cortaron solo 8 árboles presentaron duramen. En árboles con diámetro menor a 15 cm el duramen se ubica en el primer metro y en los dos primeros metros para los árboles con diámetros mayores a 15 cm. En el Cuadro 14 se muestran los resultados promedios para los porcentajes de duramen en los árboles de cocobolo.

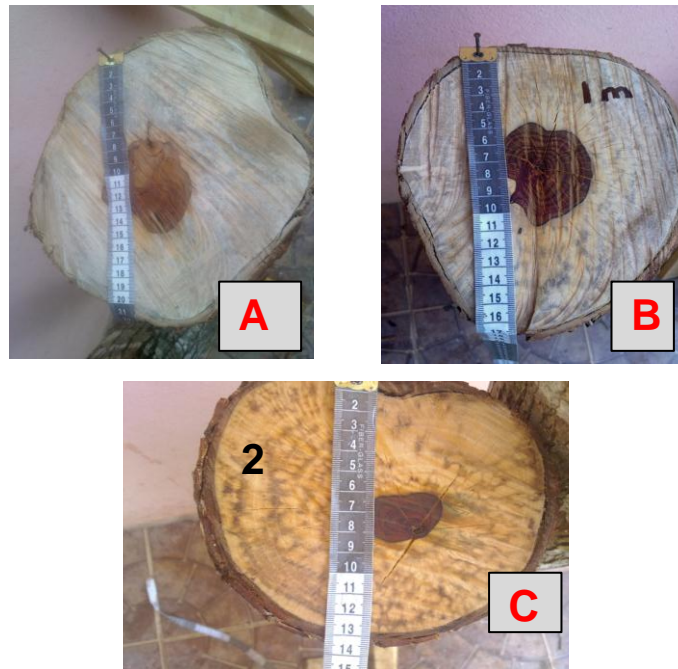
**Cuadro 14.** Resultados de la evaluación del duramen en árboles de *Dalbergia retusa* con más de 15 años. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

Clase diamétrica (cm)	Altura (m)	Diámetro (cm)	Diámetro duramen (cm)	Porcentaje de duramen	Promedio de % volumen duramen
5-10	0,0	12,50	3,50	28%	6%
	1,0	10,00	1,70	17%	
10-15	0,0	19,23	6,22	32%	7%
	1,0	13,43	1,62	12%	
	2,0	13,80	0,80	6%	
15-20	0,0	20,78	7,08	34%	14%
	1,0	16,90	3,65	21%	
	2,0	16,43	3,17	19%	

En general el diámetro de duramen se reduce en un metro en más del 50%, por lo que los árboles de cocobolo evaluados presentan un duramen de un 6 y 14% del volumen de la troza.



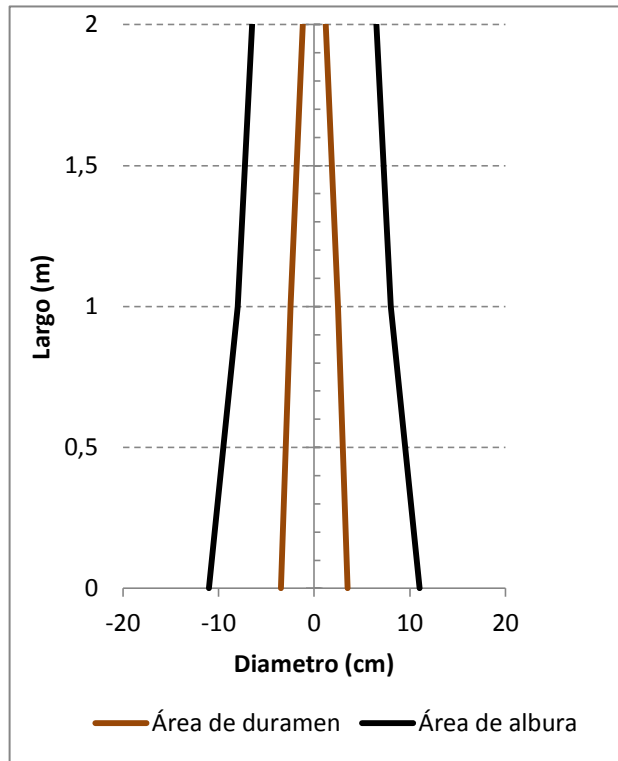
Debe considerarse que los resultados del Cuadro 14 son preliminares ya que corresponden a pocos árboles y no contemplan individuos cuyo diámetro a la altura del pecho sea mayor a 20cm; por lo cual para un mejor detalle debe aumentarse el muestreo para contar con una mayor base de información.



**Figura 19.** Detalle del duramen en un árbol de *Dalbergia retusa* a alturas de 1 m y 2 m. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

En la Figura 19 se muestra el desarrollo del duramen en un árbol de cocobolo, en este caso el duramen se desarrolló hasta los 2m, a partir de esa altura el árbol se bifurca y no produce más duramen.

El diámetro de duramen en la base de la primera troza (A) el diámetro de duramen es cercano a los 7cm, a un metro (B) el duramen es de 5cm y a 2 metros (C) el duramen es de 2,4cm. En la Figura 20 se hace una representación gráfica del desarrollo del duramen de las trozas mostradas en la Figura 19.



**Figura 20.** Estimación del desarrollo del duramen en una troza de 2 m de largo de *Dalbergia retusa*. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

No obstante, la forma estimada en la figura 20 no representan la forma comúnmente encontrada dentro de las plantaciones de cocobolo, por lo que es reducida la cantidad de trozas de 2 m de largo que se puedan obtener en un raleo a edades mayores a 15 años.

Algunas de las variaciones en el desarrollo del duramen se presentan en la siguiente figura.



**Figura 21.** Desarrollo del duramen en las dos primeras trozas de 1 m de largo de un árbol de *Dalbergia retusa*. Parrita, Puntarenas. Marzo 2012.

La figura 21A muestra el desarrollo del duramen en primer metro de un árbol de cocobolo; las tablas del centro concentran el duramen y muestran la medula como una línea mas oscura dentro del duramen.

En figura 21B se nota un desarrollo poco uniforme del duramen en la segunda troza del mismo árbol de cocobolo. Se aprecian los efectos de la poda de ramas en edades tempranas del árbol, lo cual ocasionó huecos en la madera ya que esta especie presenta poca capacidad para cerrar los cortes realizados al podar.

## 5. CONCLUSIONES

- En ambas fincas la varianza en diámetro y altura aumenta conforme aumenta la edad.
- Mediante una relación logarítmica entre edad y diámetro para ambas fincas se obtuvieron ecuaciones lineales con valores de  $R^2$  de 0,64 y 0,75.
- La relación logarítmica entre edad y la altura para ambas fincas generó ecuaciones lineales con valores de  $R^2$  de 0,58 y 0,76.
- El factor de forma del volumen comercial para *Dalbergia retusa* es de 0.401 y se reduce conforme aumenta el diámetro de los árboles.
- Las mejores ecuaciones lineales para obtener el volumen comercial son que incluye el diámetro o el área basal junto a la altura.
- En árboles con edades mayores a los 15 años y diámetros menores a 10 y 15 cm, el duramen representa el 6% y el 7% del volumen comercial.
- Este porcentaje de duramen aumenta hasta el 14% cuando el diámetro de los árboles esta en la clase diamétrica 15-20cm.

## 6. RECOMENDACIONES

- Estratificar las fincas para realizar un mayor análisis de la información.
- Continuar con las evaluaciones anuales a las parcelas permanentes establecidas.
- Probar las ecuaciones sugeridas con los datos de las nuevas evaluaciones y validar estas ecuaciones con datos provenientes de otras plantaciones de *Dalbergia retusa* en la zona.
- Al aplicar raleos evaluar una mayor cantidad de árboles para validar las ecuaciones de volumen sugeridas.
- Utilizar la altura total para las ecuaciones ya que ésta no se subestima debido a la inclinación de los ejes.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alder, D. 1980. Estimación del Volumen Forestal y Predicción del Rendimiento. Estudio FAO. Monte 22/2.80
- Carpio, M. 1995. Maderas de Costa Rica: 150 Especies Forestales. San José. CR. Editorial de la Universidad de Costa Rica.338p.
- CATIE 2000. Manual técnico No. 41. Vol. 1. Turrialba, Costa Rica. 204 p.
- CATIE 2002. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Seria técnica, n50. Turrialba, CR. 264p
- Corvalán, P; Hernández, P. 2009. Factores y coeficientes de forma. Universidad de Chile. CL.
- Cox, D. 1985. Inventory and Forest Mensuration. Inventario para Manejo de plantaciones. Actas IX Congreso Forestal Mundial. México. 17p.
- FAO 1973. Mediciones. Curso de dasometría. Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Siguatepeque. HN. 54p
- Herrera, W. 1985. Clima de Costa Rica: vegetación y clima de Costa Rica. San José. Vol 2. Editorial Universidad Estatal a Distancia 118 p.
- Holdridge, L; Poveda, L; Jiménez, Q. 1997. Árboles de Costa Rica. San José. CR. Centro Científico Tropical. 2ª ed. 522p.
- Husch, B; Miller, C; Beers, T. 1982. Forest Mensuration. USA 2 Ed. John Wiley &sons. Vol 3. 402p.
- Ladrach, W. 2010. Manejo practico de plantaciones forestales en el trópico y subtrópico. Cartago. CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 655 p.

- Mendiburú, F. 2007. Apuntes de clase. Regresión y correlación simple. Consultado 15 de marzo de 2012. Disponible en <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/index-filer/academic/Estadistica/parte6.pdf>
- Ortiz, E. 1993. Técnicas para la estimación del crecimiento y rendimiento de árboles individuales y bosques. Serie de apoyo académico N°16. ITCR. Cartago CR.71p
- Ortiz, E. 2008. Crecimiento y Rendimiento Forestal. ITCR. Cartago CR.89p
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P.1997. Mensura forestal. Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. IICA, BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 pp.
- Shapiro, S. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika 52 (3-4): pp. 591–611. Consultado el 18 de marzo de 2012. Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/Test\\_de\\_Shapiro%E2%80%93Wilk](http://es.wikipedia.org/wiki/Test_de_Shapiro%E2%80%93Wilk)
- Silva, R. 1971. Metodología para la investigación en parcelas permanentes de claros y rendimientos en plantaciones forestales. Instituto latinoamericano investigación y capacidad. Mérida, VE. 18p
- Van Laar, A; Akca, A, 1997. Forest mensuration. Cuvillier Verlag. Göttingen DE.418p.
- Walpole, R; Myers R; Myers, S; Ye, K. 2007. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson, octava Ed. Juárez, MX.816p.

# ANEXO 1. Ubicación de parcelas permanentes en las fincas Monte Fresco y Las Lomitas

