

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

OCT 1999

RECIBIDO

Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea Roxb.*), teca (*Tectona grandis L.f.*) y pochote (*Bombacopsis quinata Jacq.*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.

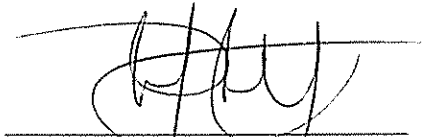
TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIADOS EN CIENCIAS FORESTALES CON ENFASIS EN DESARROLLO FORESTAL

ELABORADO POR:

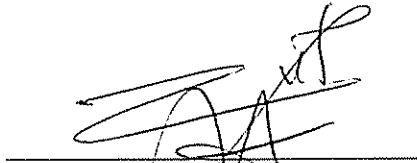
**José Alberto Cubero Moya
Susana Raquel Rojas Piedra**

**HEREDIA, COSTA RICA.
1999.**

TRIBUNAL EXAMINADOR LICENCIATURA EN CIENCIAS FORESTALES



M.Sc. Marielos Alfaro.
Directora de Tesis.



M.Sc. Eduardo Eduarte
Miembro Comité Asesor



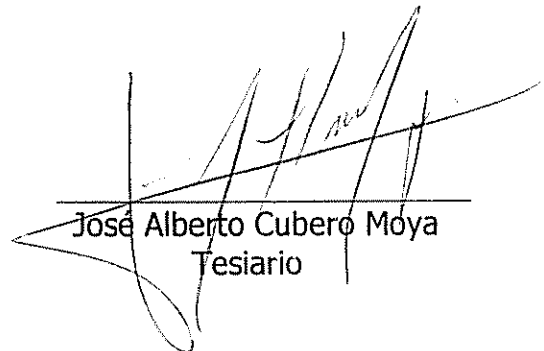
Ing. For. Edwin Alpizar
Miembro Comité Asesor



M.Sc. Eladio Chaves
Representante del Director.
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar



Susana Raquel Rojas Piedra
Tesiaria



José Alberto Cubero Moya
Tesiario

DEDICATORIA

A Dios por ser mi amigo fiel y
compañero en todo momento.

A mis padres y hermana por su
paciencia y comprensión.

Susana Raquel.

A mi Señor mi Dios por todas sus
bendiciones, estar siempre a mi lado
y mostrarme el camino.

A mi Madre por su cariño y aliento
durante mis años de estudio, a mi
Padre por darme la oportunidad de
crecer y aprender, a mis hermanas
Kissmeth, Vielka y Balkis por su
apoyo, cariño y por ser las fans
número 1.

Con mucho amor, José.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos manifestar nuestro agradecimiento a las siguientes personas e instituciones por su valiosa colaboración en la elaboración de esta investigación.

A M.Sc. Marielos Alfaro quien fue la directora de esta investigación, por sus consejos, ayuda y por darnos la oportunidad de ser sus tesarios.

A M.Sc. Eduardo Eduarte por sus consejos, disponibilidad y guía en el análisis de laboratorio para la determinación de carbono.

A Ing. Edwin Alpizar por sus consejos y sus valiosos comentarios para el desarrollo del documento y por su disponibilidad en todo momento.

Al Proyecto Mejoramiento de la Capacidad Nacional para la Reducción de las Emisiones de Gases con Efecto Invernadero, Instituto Meteorológico Nacional, M.Sc. Patricia Ramírez e Ing. Ana Rita Chacón por el apoyo económico recibido.

Al Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Ing. Jorge Mario Rodríguez, Ing. Arturo Venegas y Ing. Oscar Sánchez por el apoyo recibido.

Al Ing. Ronald Guerrero de Maderas Preciosas de Costa Rica por su disposición y colaboración. A Norman Matamoros y Alexis Matamoros personal de la empresa por la ayuda brindada en el trabajo de campo.

A Erick Espinoza por su ayuda en la elaboración del mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo en Garza.

Al Ing. Didier Acuña de Bosque Puerto Carrillo por el apoyo y disposición, así como a Genaro Obando, Freddy Gómez y Ricardo Baltodano por la recolección de los datos de campo.

Al Ing. William Mejías del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha por su disposición, colaboración y Ademar Molina por la ayuda en la ubicación de las plantaciones.

A M.Sc Adelaida Chaverri y M.Sc. Paulina Montes de Oca por sus comentarios al inicio del anteproyecto.

A la Ing. Milena Segura por sus consejos y comentarios al inicio de esta investigación.

A M.Sc. Fabio Blanco por su colaboración en la interpretación de los análisis estadísticos.

A M.Sc. Alexis Vásquez por sus comentarios para la identificación de los suelos presentes en el área de estudio.

A nuestros compañeros Ernesto, Karol, Javier, Marco, Laura, Carlos, Isabel, Alex, Gilmar y Rodolfo por los momentos compartidos durante esta faceta.

Al personal administrativo de la Escuela de Ciencias Ambientales; Ledita, Nidia, Cecilia, Nuria, Mario y Gerardo (carguita) por su amable colaboración en todo momento durante esta investigación.

A Don Eduardo Eduarte, Marco Tulio López y Arturo Sibaja por hacer del trabajo de laboratorio algo más que un trabajo.

A Laura Vásquez y su familia por recibirnos en su casa durante la fase de trabajo de campo.

A Gilmar Navarrete Chacón por su colaboración en la elaboración de los mapas.

A mis amigas Mildred y Silvia por su ayuda desinteresada en el préstamo de la computadora y los libros de la biblioteca.

A nuestras respectivas familias por permitirnos entrar en sus hogares, paciencia, comprensión, apoyo y amor en todo momento durante el proceso de esta tesis.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este documento, muchas gracias.

Con cariño,

Susana y José

Cubero, J.; Rojas, S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea Roxb.*), teca (*Tectona grandis L.f.*) y pochote (*Bombacopsis quinata Jacq.*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Licenciatura en Ciencias Forestales con Concentración en Manejo Forestal. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 95 p.

RESUMEN

Los ecosistemas forestales ya sean bosques o plantaciones a través de los procesos de la fotosíntesis y respiración toman el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, incorporando el carbono (C) a su estructura y liberan oxígeno (O_2), convirtiéndose en medidas de mitigación para disminuir o mantener los niveles actuales de CO_2 .

El objetivo de esta investigación fue evaluar en términos ambientales y económicos la fijación y almacenamiento de carbono en plantaciones forestales. La investigación se desarrolló en Hojancha y Nicoya, con plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Guanacaste, Costa Rica.

Se realizó un muestreo por especie, edad y sitio para obtener la fracción de carbono en la biomasa seca. Se tomaron 162 muestras en el campo, 54 por especie para realizar la determinación de la fracción de carbono, mediante el método de calorimetría, el cual permite obtener de cada muestra la cantidad de

energía total en kcal/kg, transformadas a moles de carbono potencial fijado mediante la relación de moles (g/peso molecular).

Para *Gmelina arborea* a la edad de 4 años en el sitio A la fracción de carbono fue de 0.36 y en el sitio B 0.32, para los 8 años el sitio A presentó una fracción de 0.40 y el sitio B de 0.36, a la edad de 10-12 años el sitio B presentó 0.35.

Para *Tectona grandis* a la edad de 5 años en el sitio A la fracción de carbono fue de 0.33 y en el sitio B 0.32, para los 8 años el sitio A presentó una fracción de 0.34 y el sitio B de 0.33, a la edad de 12 años el sitio A presentó una fracción de 0.38 y el sitio B 0.36.

Para *Bombacopsis quinata* a la edad de 5 años el sitio A presentó una fracción de carbono de 0.33, para los 8 años el sitio A presentó una fracción de 0.36, para estas edades no se encontraron sitios B, a la edad de 15 años no se ubicaron plantaciones de sitios clasificados como A y B, siendo esta especie una excepción, debido a que sólo se obtuvo información de sitios de bajo rendimiento (C) por lo que se decidió incluir esta clasificación.

La fracción de carbono determinada en la investigación demostró que los sitios de alta productividad (A) presentaron fracciones más altas con respecto a los sitios medios (B), así mismo se encontraron variaciones en las diferentes edades por especie.

El análisis financiero se hizo por especie, estudiando dos indicadores financieros el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) incluyendo y excluyendo el pago por el servicio de fijación de carbono para cinco diferentes escenarios, la inclusión por este pago es un aporte en el flujo de caja del reforestador que va de \$4.15 a \$45.7 dependiendo de la especie y del precio de la tonelada de carbono, convirtiéndose este pago en un complemento para el

mantenimiento de la plantación durante los años previos al período de turno o corta final.

El uso de la madera proveniente de plantaciones forestales debe ser destinada a productos duraderos, de largo plazo con el fin de retener más carbono durante períodos más prolongados, convirtiéndose estos ecosistemas forestales en sistemas de fijación y almacenamiento continuos.

El Estado debe de incrementar el área anual a establecer en plantaciones forestales con el fin de mantener un stock disponible de carbono para las negociaciones internacionales de comercialización por el servicio de fijación de carbono.

Indice

	N° de página
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	v
Indice	viii
Lista de cuadros	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Anexos	xiv
I Introducción	1
II Revisión de Literatura	6
2.1 El efecto invernadero	6
2.2 Opciones de mitigación para las emisiones el dióxido de carbono	8
2.2.1 Las plantaciones forestales	10
2.2.2 Algunas experiencias de fijación de carbono a nivel mundial	12
♦ Dinámica de carbono en plantaciones de <i>Pinus caribaea</i> en Brasil y Venezuela	14
♦ Dinámica de carbono en plantaciones de <i>Pinus ellioti</i> en Brasil	15
2.3 Las plantaciones forestales en Costa Rica	15
III Metodología	20
3.1 Criterios para la selección de las especies	20
3.2 Criterios para la selección de la zona de estudio	21
3.3 Criterios para la selección de las plantaciones	21
A) Manejo	21
B) Calidades de sitio	21
C) Edades	23
3.4 Variables a medir	24
3.5 Caracterización del área de estudio	25
3.6 Plantaciones forestales elegidas	27

3.7 Selección de árboles y toma de muestras	29
3.8 Estimación del volumen	29
3.8.1 Estimación del volumen por árbol	29
3.8.2 Estimación del volumen por hectárea	30
3.8.3 Estimación del Incremento Medio Anual	30
3.9 Análisis de Laboratorio	31
3.9.1 Determinación del porcentaje de humedad	31
3.9.2 Porcentaje de materia seca	31
3.9.3 Método para determinar la fracción de carbono	32
3.10 Análisis estadístico	33
3.10.1 Aplicación de modelos	34
3.11 Estimación del carbono	34
3.11.1 Estimación del carbono almacenado y fijado en plantaciones evaluadas	34
3.11.2 Estimación del carbono almacenado y fijado en plantaciones forestales	35
3.12 Análisis Financiero	36
IV Resultados	38
4.1 Caracterización dasométrica de las plantaciones evaluadas	38
4.1.1 Determinación de la calidad de sitio	38
4.1.2 Caracterización dasométrica de <i>Gmelina arborea</i>	41
4.1.3 Caracterización dasométrica de <i>Tectona grandis</i>	42
4.1.4 Caracterización dasométrica de <i>Bombacopsis quinata</i>	42
4.2 Análisis de laboratorio	43
4.2.1 Porcentaje de humedad y materia seca	43
4.2.2 Fracción de carbono en la biomasa seca	44
4.3 Análisis estadístico	47
4.3.1 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de <i>Gmelina arborea</i>	47

4.3.2 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de <i>Tectona grandis</i>	48
5.3.3 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de <i>Bombacopsis quinata</i>	49
4.4 Modelos para la proyección de carbono	50
4.5 Determinación del carbono almacenado en las plantaciones evaluadas	52
4.5.1 Determinación del carbono fijado en las plantaciones evaluadas	53
4.6 Carbono fijado en plantaciones forestales de acuerdo a las tablas preliminares de rendimiento para cada especie	55
4.7 Análisis Financiero	56
V Discusión	60
VI Conclusiones y Recomendaciones	65
VII Bibliografía	69
VIII Anexos	75

Lista de cuadros

Cuadro 1	Incremento Promedio Anual de materia seca en la biomasa en plantaciones forestales.	12
Cuadro 2	Almacenamiento de carbono en 16 tipos de bosque en el mundo, Fundación FACE (Instituto para la Silvicultura e Investigación Natural).	13
Cuadro 3	Área (ha) plantada por especie en Costa Rica durante el período 1979 – 1997.	16
Cuadro 4	Absorción de CO ₂ en plantaciones forestales, San José, 1995.	17
Cuadro 5	Estimación puntual del acumulado de la cantidad de carbono fijado en las plantaciones forestales incentivadas por el Estado entre 1979-1995. San José, 1996.	18
Cuadro 6	Estimación de carbono fijado por <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> para el área incentivada por el Estado durante el período 1979-1995.	19
Cuadro 7	Clasificación de las parcelas de medición por Índice de Sitio para <i>Gmelina arborea</i> en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998	38
Cuadro 8	Clasificación de las parcelas de medición por Índice de Sitio para <i>Tectona grandis</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	39
Cuadro 9	Clasificación de las parcelas de medición por Índice de Sitio para <i>Bombacopsis quinata</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	40
Cuadro 10	Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de <i>Gmelina arborea</i> en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998	41
Cuadro 11	Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de <i>Tectona grandis</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998	42
Cuadro 12	Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de <i>Bombacopsis quinata</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	42
Cuadro 13	Porcentaje de humedad y materia seca promedio por rango de edad y sitio para <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	43
Cuadro 14	Análisis de varianza (ANDEVA) para <i>Gmelina arborea</i> por rango de edad y sitio en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998.	48
Cuadro 15	Medias y error estándar de la fracción de carbono para <i>Gmelina arborea</i> por rango de edad y sitio en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998.	48
Cuadro 16	Análisis de varianza (ANDEVA) para <i>Tectona grandis</i> por rango de edad y sitio en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	49
Cuadro 17	Medias y error estándar de la fracción de carbono para <i>Tectona grandis</i> por rango de edad y sitio en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	49

Cuadro 18	Medias y error estándar de la fracción de carbono para <i>Bombacopsis quinata</i> por rango de edad y sitio en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	50
Cuadro 19	Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea para <i>Gmelina arborea</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en el cantón Hojancha, Guanacaste, 1998.	52
Cuadro 20	Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea para <i>Tectona grandis</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	52
Cuadro 21	Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea para <i>Bombacopsis quinata</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	53
Cuadro 22	Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Gmelina arborea</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998.	53
Cuadro 23	Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Tectona grandis</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	54
Cuadro 24	Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Bombacopsis quinata</i> en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	54
Cuadro 25	Contribución a la mitigación de CO ₂ de la atmósfera mediante el área plantada en el período 79-97, de <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> en Costa Rica, 1999.	54
Cuadro 26	Costos de establecimiento y manejo para plantaciones en (\$/ha) de <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> para el año de establecimiento y los cinco primeros años de mantenimiento para el año 1999.	57
Cuadro 27	Precios (\$/ m ³) de madera en pie para <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> , 1999.	58
Cuadro 28	Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VAN) para plantaciones forestales con <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> , en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.	58

Lista de figuras

Figura 1	Fracción de carbono para <i>Gmelina arborea</i> en dos calidades de sitio y tres rangos de edad en el cantón de Hojancha Guanacaste, 1998.	45
Figura 2	Fracción de carbono para <i>Tectona grandis</i> en dos calidades de sitio y tres rangos de edad en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998	46
Figura 3	Fracción de carbono para <i>Bombacopsis quinata</i> en dos calidades de sitio y tres rangos de edad en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998	47
Figura 4	Proyección de la fracción de carbono a la edad de corta para <i>Gmelina arborea</i> en el cantón de Hojancha Guanacaste, 1998.	50
Figura 5	Proyección de la fracción de carbono a la edad de corta para <i>Tectona grandis</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998	51
Figura 6	Proyección de la fracción de carbono a la edad de corta para <i>Bombacopsis quinata</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	51
Figura 7	Fijación de carbono (tm/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Gmelina arborea</i> con base a la tabla preliminar de rendimiento de la Guía Silvicultural (1991), 1999	55
Figura 8	Fijación de carbono (tm/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Tectona grandis</i> con base a la tabla preliminar de rendimiento de la Guía Silvicultural (1991), 1999.	55
Figura 9	Fijación de carbono (tm/ha/año) en fustes y biomasa aérea para <i>Bombacopsis quinata</i> con base a la tabla preliminar de rendimiento de la Guía Silvicultural (1991), 1999.	56

Lista de Anexos

Anexo 1	Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo, Bosques Puerto Carrillo, Península de Nicoya Guanacaste, 1998.	76
Anexo 2	Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo, Garza Península de Nicoya Guanacaste, 1998.	77
Anexo 3	Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo de Hojancha, Península de Nicoya Guanacaste, 1998.	78
Anexo 4	Curvas de crecimiento en altura total dominante, de plantaciones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb; para tres índices de sitio en América Central (Murillo, 1991).	79
Anexo 5	Tabla preliminar de rendimiento para <i>Tectona grandis</i> L.f; en Trinidad (Chaves, 1991).	80
Anexo 6	Curvas de crecimiento en altura dominante de varios índices de sitio para <i>Bombacopsis quinata</i> (Jacq) Dugand en Costa Rica (Navarro, 1989).	81
Anexo 7	Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para <i>Gmelina arborea</i> en el cantón de Hojancha Guanacaste, 1998.	82
Anexo 8	Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para <i>Tectona grandis</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	83
Anexo 9	Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para <i>Bombacopsis quinata</i> en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	84
Anexo 10	Contenido de carbono en un a unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de <i>Gmelina arborea</i> , en el cantón de Hojancha Guanacaste, 1998.	85
Anexo 11	Contenido de carbono en un a unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de <i>Tectona grandis</i> , en el cantón de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	86
Anexo 12	Contenido de carbono en un a unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de <i>Bombacopsis quinata</i> , en el cantón de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	87
Anexo 13	Estadísticos básicos para las tres especies por edad y sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste, 1998.	88
Anexo 14	Lista de precios de madera en pie, en patio de industria y aserrada para <i>Gmelina arborea</i> , <i>Tectona grandis</i> y <i>Bombacopsis quinata</i> , utilizados para el análisis financiero, 1999.	89
Anexo 15	Estructura de costos de establecimiento y manejo para <i>Gmelina arborea</i> , incluyendo y excluyendo el pago por el servicio de fijación de carbono.	90

Anexo 16	Estructura de costos de establecimiento y manejo para <i>Tectona grandis</i> , incluyendo y excluyendo el pago por el servicio de fijación carbono.	91
Anexo 17	Estructura de costos de establecimiento y manejo para <i>Bombacopsis quinata</i> , incluyendo y excluyendo el pago por el servicio de fijación de carbono	93

I. Introducción

En los últimos años el incremento de las diferentes actividades humanas, tales como la agricultura, los cambios en el uso de la tierra, la deforestación, el aumento de las actividades industriales, la producción de energía y el uso de compuestos químicos ha provocado un aumento en la producción de gases con efecto invernadero. Estos gases son: metano (CH_4), hidrofluorocarburos (HFC_s), hexafluoruros de azufre (SF_6), perfluorocarburos (PFC_s), óxido nitroso (N_2O) y principalmente dióxido de carbono (CO_2). La acumulación de este conjunto de gases ocasiona problemas como el calentamiento de la atmósfera inferior y de la superficie de la tierra y un enfriamiento compensatorio de la alta estratósfera, fenómeno conocido como efecto invernadero (Fernández, 1991).

El interés por conocer más sobre los impactos del cambio climático sobre el planeta ha aumentado rápidamente en los últimos años, llegando a situarse en las agendas de muchas reuniones internacionales, en donde se discuten iniciativas orientadas a desacelerar el aumento en la concentración de gases con efecto invernadero.

Con el propósito de mitigar la emisión de CO_2 , el cual ha sido clasificado como el gas con efecto invernadero más abundante en el planeta, se ha considerado a la cobertura vegetal como una forma viable de compensación de los daños provocados por la acumulación de este gas, debido a la capacidad de las plantas de capturar el dióxido de carbono y fijarlo, mediante sus procesos fisiológicos naturales, fotosíntesis y respiración.

La reunión Cumbre de la ONU sobre el Cambio Climático celebrada en Kyoto, Japón, en Diciembre de 1997 establece en su Protocolo, Artículo 2 inciso a (ii), algunas de las políticas o medidas para lograr una reducción cuantificada de las

emisiones y cita la "Protección y mejoramiento de sumideros y reservorios de gases de invernadero bajo promoción de prácticas de administración forestal sostenible, aforestación y reforestación"; como medidas válidas a nivel internacional para mitigar las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El inventario de fuentes y sumideros de gases con efecto invernadero, realizado en Costa Rica, por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), para el período 1989 – 1990, establece tres fuentes principales de gases de efecto invernadero: el sector energía (60.5%), uso de la tierra (27.5%) y procesos industriales (8.4%). El uso de la tierra ocupa el segundo lugar como emisor a nivel nacional de gases con efecto invernadero, debido al cambio y conversión de los bosques en áreas de cultivo, ganadería y desarrollo urbano (MIRENEN – IMN, 1995). Al mismo tiempo otras actividades forestales como reforestación y manejo de bosques, que por su naturaleza son actividades de producción de bienes y servicios representan opciones de mitigación

En Costa Rica la Ley Forestal 7575, además de establecer los lineamientos o directrices para la protección, conservación y administración del recurso forestal, reconoce la importancia de los servicios ambientales que brindan los bosques y las plantaciones forestales (fijación y almacenamiento de carbono, agua, biodiversidad, belleza escénica). Con esto se procura el desarrollo de proyectos de reforestación, manejo y preservación de los bosques, no sólo con el fin de producir bienes sino también como medida de mitigación de CO₂.

El Estado costarricense en las últimas dos décadas, por medio de incentivos ha promovido la reforestación con el apoyo del sector privado y organismos internacionales como parte de una estrategia para incrementar la cobertura forestal del país. El país cuenta con aproximadamente 139 000 ha en plantaciones hasta 1997, de las cuales un 65% fueron establecidas con melina

(*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*), y pochote (*Bombacopsis quinata*), siendo estas las especies más utilizadas en proyectos de reforestación.

Para determinar la cantidad de carbono que fijan las plantaciones forestales es importante contar con información sobre el crecimiento anual de la plantación, el volumen por unidad de área y la proporción de carbono en la biomasa seca de cada una de las especies.

La tasa anual de fijación de carbono en las plantaciones forestales está en relación directa con las especies y su crecimiento. Este carbono lo van acumulando los árboles desde su establecimiento hasta la corta final. La estimación de cuánto carbono fija una plantación se debe realizar considerando los flujos de carbono en el ecosistema. Lo usual es hacer el cálculo solo considerando los fustes pues cuando se alcanza la edad de corta de la plantación, las ramas pequeñas y el follaje se dejan en el sitio, con el fin de que se incorporen en el ciclo de nutrientes mediante el reciclaje natural mientras que los fustes son aprovechables industrialmente para la fabricación de muebles, construcciones y artesanías

Dada la importancia de las plantaciones forestales en la fijación y almacenamiento de carbono es necesario evaluar física y monetariamente los flujos para cada especie considerando el impacto que tendría sobre el flujo de caja el ingreso por la venta de este servicio.

La investigación va orientada a cuantificar en forma física la fijación de carbono en plantaciones forestales. Para tal fin se seleccionaron tres especies, melina (*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*), y pochote (*Bombacopsis quinata*).

El principal criterio para su selección fue el área plantada hasta 1997. Según la información del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), de las

138 182.3 ha plantadas en el período 1979 - 1997, 49 274.9 ha son de melina (35.7 %), 23 475.4 ha han sido plantadas con teca (17.0 %) y 17 020.7 ha son de pochote (12.3 %), representando estas tres especies el 65% del área total plantada en el país (Alfaro y Reiche 1998).

Un segundo criterio de selección de las especies es la experiencia que se tiene en el país en el manejo de éstas y la información existente en el campo de la reforestación que se ha generado a través de investigación básica aplicada y participativa por diferentes entes como: el Estado, la empresa privada, universidades y Organizaciones no Gubernamentales (ONG) entre otros.

Las especies escogidas para la investigación presentan suficiente información sobre productividad, clasificación de sitios, costos de establecimiento y manejo silvicultural de las plantaciones entre otros. Se han utilizado las tablas preliminares de rendimiento para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en América Central para diversos índices de sitio y densidades de plantación información.

Dado lo anterior, este estudio tiene los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar en términos ambientales y económicos la fijación y el almacenamiento de carbono en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, como medida de mitigación de las emisiones de dióxido de carbono producto de las actividades antropogénicas.

Objetivos específicos

Determinar la fracción de carbono a través de análisis de laboratorio para cada una de las especies.

Determinar las unidades (tm/ha/año) de carbono fijado en la biomasa aérea (fustes) en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*.

Realizar un Análisis financiero de las plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, incluyendo y excluyendo el ingreso por la venta del servicio fijación de carbono.

II. Revisión de literatura

2.1 El efecto invernadero.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta. Es causado por la presencia de gases en la atmósfera, principalmente vapor de agua y gas carbónico, permitiendo la retención de parte de la energía calórica que recibe del sol, y el mantenimiento de una temperatura dentro de límites que han permitido el desarrollo de la vida como la conocemos. Sin la concentración natural de estos gases en la atmósfera, la temperatura promedio en la superficie de la tierra sería similar a la de la luna, unos 18°C bajo cero. Los gases del efecto invernadero permiten el paso de las radiaciones solares de onda corta, calentando la superficie de la tierra. A la vez, absorben parte del calor que emana de la superficie de la tierra, en forma de radiaciones infrarrojas, de mayor longitud de onda, manteniendo una temperatura en la superficie del planeta de aproximadamente 15°C (Centeno, 1992).

El efecto invernadero no es, por sí mismo, una amenaza a la vida en la tierra. El problema actual radica en que la actividad humana ha aumentado la concentración de CO_2 y otros gases en la atmósfera. Una mayor cantidad de energía calórica solar tiende así a permanecer atrapada en la atmósfera, elevando la temperatura promedio del planeta (Centeno, 1992; Houghton y Woodwell, 1989; Fernández, 1991).

Los principales gases producto de la actividad humana, que contribuyen a la amplificación del efecto invernadero, son el dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), el metano (CH_4), los óxidos nitrosos (N_2O), los cloro- fluro- carbonados (CFCS), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O_3) (Centeno, 1992; Andrasko, 1990; PNUD 1997).

Las principales fuentes de emisión de estos gases de efecto invernadero son el consumo de energía (la quema de combustibles fósiles) y la deforestación para aumentar la cantidad de tierra disponible para la agricultura y el pastoreo y la quema de madera asociada. Aproximadamente 7 Gt (giga toneladas, Gt = tm) de CO₂ fueron desprendidas a la atmósfera anualmente durante los años 80 por fuentes humanas (Ciesla, 1996).

Una de las actividades humanas que más contribuyen a agravar el efecto invernadero es el consumo de energía. No sólo representa el 65% de las emisiones de (CO₂), sino parte importante de las emisiones de metano (en las explotaciones de gas natural y carbón) y de las emisiones de óxidos nitrosos, principalmente por las centrales energéticas que utilizan carbón. Como ejemplo, los países industrializados, con sólo algo más del 20% de la población mundial, consumen el 70% de la energía que se utiliza en el mundo. América Latina, con 420 millones de habitantes en 1988, el 8% de la población mundial, consumió ese mismo año sólo el 5% de la energía global (Centeno 1992).

Cantidades enormes de CO₂ entran cada año a la atmósfera como consecuencia de la quema generalizada de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural). Debido al constante intercambio de dióxido de carbono entre la atmósfera y el océano (el cual puede absorber una gran cantidad de dióxido de carbono), solamente parte del dióxido de carbono antropogénico permanece en la atmósfera. Sin embargo, no hay duda alguna de que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha estado aumentando de año en año. Por ejemplo las emisiones de este gas crecieron a una tasa de 4.3 % anual desde 1860 a 1970 y una tasa de 2.8 % entre 1970 a 1979 (Fernández, 1991).

De acuerdo a Centeno (1992), la deforestación en el trópico es otra fuente importante de emisiones directas de carbono a la atmósfera. Los bosques húmedos tropicales contienen aproximadamente 100 toneladas de carbono por

hectárea, y los bosques abiertos aproximadamente 30 toneladas por hectárea. La deforestación se estima en 17 millones de hectáreas anuales. Los estimados más confiables sobre la contribución de la deforestación en el trópico a la inyección de carbono a la atmósfera oscilan alrededor de los 1500 millones de toneladas por año, lo que representa aproximadamente el 18% de las emisiones totales de carbono a la atmósfera. La contribución total de la deforestación en el trópico al efecto invernadero, incluyendo el consumo de leña y las emisiones de metano y óxidos nitrosos, es de aproximadamente 2000 millones de toneladas equivalentes de carbono anuales, 12% del efecto total.

2.2. Opciones de mitigación para las emisiones de dióxido de carbono.

Una de las medidas de mitigación para disminuir o mantener los niveles actuales de CO₂ es la conservación y el manejo de los ecosistemas forestales. Lo anterior, basado en que las plantas a través del proceso de fotosíntesis toman el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, incorporan el carbono (C) a su estructura y liberan oxígeno (O₂).

La zona tropical tiene potencial para conservar y fijar carbono. Más de la mitad de ese potencial lo provee la regeneración natural y asistida, seguida por la protección forestal y la disminución de la deforestación. La reforestación y la agrosilvicultura contribuirían con al menos la mitad de la cantidad conservada por los trópicos, los ahorros de carbono procedentes de la disminución de la deforestación y de la regeneración serían inicialmente los más elevados pero a partir del año 2025 cuando las plantaciones alcanzarían su máxima tasa de aumento de carbono, captarían prácticamente cantidades idénticas a las correspondientes a la disminución de la deforestación y a la regeneración. Hacia el año 2030 aproximadamente, los trópicos se convertirían en un potencial sumidero de carbono (Brown,1996).

La contaminación de la atmósfera es un problema de orden mundial y el sector forestal tiene la posibilidad de contribuir a mitigarlo, no sólo por la conservación de sumideros de carbono ya existentes (bosques primarios), sino por el incremento de nuevas áreas forestales, sean bosques secundarios o plantaciones forestales (PNUD, 1997). Los bosques, naturales o plantados, son sumideros de carbono que tienen la capacidad de fijar en forma continua carbono. Si la madera de éstos es utilizada para la construcción de muebles y casas, ese carbono fijado queda en las estructuras por largo plazo (Alfaro, 1997 a).

El bosque primario natural una vez maduro mantiene anualmente fijada una cantidad de carbono igual a $\frac{1}{2}$ de su biomasa total o igual a $\frac{1}{2}$ por peso de la productividad primaria neta (PPN), en toneladas de biomasa seca/ha/año. El número de toneladas de carbono fijado depende de las condiciones de la zona de vida tales como tipo de suelo, cantidad de agua y temperatura entre otros (Carranza et al, 1996).

Se encuentran capacidades de fijación que van desde menos de 1 tonelada por ha/ año en bosques de Canadá hasta 17 a 20 toneladas ha/año en bosques amazónicos. En Costa Rica se han hecho mediciones que han arrojado las siguientes capacidades de fijación de carbono, en toneladas de carbono /ha/año: desde 5.1 en bosque húmedo premontano hasta 16.7 en bosque tropical húmedo (Tosi,1995, citado por Carranza et al 1996). En bosques de altura la cantidad de carbono almacenada para el *Quercus costarricensis* con manejo silvicultural es de 56.26 tmC/ha y la tasa de fijación anual para todo el bosque considerando todas las especies es de 1.87 tmC (Segura, 1997).

Un bosque secundario tiene una capacidad de fijación que varía con los años de desarrollo. Aunque esta capacidad es muy pequeña durante los primeros 5 años del ciclo sucesional, aumenta hasta fijar 100% del crecimiento de su biomasa alrededor del año 25, declina posteriormente de manera estable hasta alcanzar

las mismas características del bosques primario maduro alrededor del año 100 (Tosi,1995 citado por Carranza, 1996).

Estudios recientes indican que la ordenación local de los bosques con miras a la fijación del carbono podrían reducir las emisiones de CO₂ en una proporción equivalente al 11-15 % de las emisiones producidas por la quema de combustible fósil durante el mismo período (Brown, 1996).

Las plantaciones forestales, ya sean para la producción de madera industrial, producción de leña, protección de áreas seleccionadas, recuperación de tierras degradadas, o el fortalecimiento de prácticas agroforestales, contribuye a contrarrestar el efecto invernadero, sirven como mecanismos de captación de CO₂ y alivian la presión sobre los bosques naturales, preservándolos como depósitos de carbono (Centeno, 1992).

2.2.1. Las plantaciones forestales.

Las plantaciones forestales han sido sugeridas como alternativas para la fijación de carbono por ser ecosistemas cuyo manejo se orienta a maximizar el volumen en madera por unidad de área, lo que da como resultado una fijación de carbono elevada.

Si las tendencias actuales de las emisiones continúan, la repoblación de árboles para mitigar el impacto causado por las mismas, debe considerarse como una medida complementaria a la transformación tecnológica del sector energía.

Los ecosistemas forestales atrapan CO₂ de la atmósfera mientras ellos van adquiriendo masa. Una vez alcanzada su madurez, ellos aproximadamente están en balance con respecto al carbono, pues la tasa que han acumulado es la misma que liberan. Las prácticas silviculturales pueden por lo tanto ofrecer una solución temporal, las cuales quizás podrían extenderse a través de 30 a 100

años (Andrasko, 1990^a, citado por Sawyer, 1993). La reforestación puede sin embargo reducir las emisiones de CO₂ en forma importante si los combustibles de madera se usan para remplazar a los combustibles fósiles (Houghton, 1990^a, citado por Sawyer, 1993).

La fijación de carbono en plantaciones a gran escala depende del uso que se le pueda dar a los productos provenientes de las mismas, por ejemplo, si los árboles son convertidos en productos que no tienen una larga duración en cuanto a su uso. Tal es el caso del papel utilizado para la impresión de periódicos, ya que una vez que el papel es destruido, en el proceso de descomposición se libera el CO₂ y éste retorna a la atmósfera. El carbono podría localizarse por un tiempo considerable si la madera producida a través de plantaciones se usa para la fabricación de muebles o para construcción.

Los cálculos de los beneficios que ofrece una plantación para aliviar el cambio climático deben ser considerados como un promedio de la biomasa a través de su ciclo de rotación y no sólo en la biomasa que existe en el tiempo de cosecha.

La cantidad de carbono acumulado en las plantaciones forestales está directamente relacionada con el Incremento Medio Anual (IMA) en biomasa de fustes, de ramas y en follaje. Por ejemplo una plantación de *Gmelina arborea*, cuyos fustes crecen a una tasa de 40 m³/ha /año, obviamente acumula más carbono en los fustes por unidad de área y de tiempo que una plantación de melina, en un sitio de bajo rendimiento en el cual rinde 15 m³/ha/año (Alfaro, 1997 b).

La tasa de fijación de carbono está en función de la especie, el índice de sitio, el turno, etc. El índice anual de fijación de carbono es más alto en las plantaciones jóvenes, o sea, las que se encuentran en pleno crecimiento (Ciesla, 1996).

Distintas especies forestales tienen distintas tasas anuales de acumulación de biomasa seca por hectárea como lo muestra el Cuadro 1. Considerando la fracción de carbono en biomasa del IPCC, o sea 0.5, se puede afirmar que la tasa anual de carbono fijado oscila entre 4 y 15 tm/ha/año.

Cuadro 1. Incremento Promedio Anual de materia seca acumulada en la biomasa en plantaciones forestales

Tipos de Bosque		Incremento Promedio Anual en biomasa seca (tm/ha/año)
Tropical	<i>Acacia sp</i>	15.0
	<i>Eucalyptus sp</i>	14.5
	<i>Tectona grandis</i>	8.0
	<i>Pinus sp</i>	11.5
	<i>Pinus caribaea</i>	10.0
	Maderas duras	6.8
	Maderas de crecimiento rápido	12.5
Templado	Maderas blandas	14.5
	<i>Douglas Fir</i>	6.0
	<i>Pino Lobolly</i>	4.0

*Fuente: IPCC. 1996

Nota: Promedio en un rango de edad de una plantación, estos dependen de la edad de la plantación.

2.2.2 Algunas experiencias de fijación de carbono.

La Fundación FACE (Instituto para la Silvicultura e Investigación Natural) de los Países Bajos realizó un estudio sobre la fijación potencial de carbono en diferentes tipos de bosques seleccionados, donde se presentan resultados en cuanto a la capacidad de almacenamiento de carbono en 16 tipos de bosque en el mundo. La escogencia de estos bosques se estableció de acuerdo a la capacidad de secuestro de carbono y la posibilidad de acceso a los bosques (Nabuurs et al, 1993).

El cuadro 2 presenta el secuestro potencial de carbono en los diferentes tipos de bosque seleccionados, basados en el principal criterio de evaluación (niveles de producción moderados).

Cuadro 2. Almacenamiento de carbono en 16 tipos de bosque en el mundo, Fundación FACE (Instituto para la Silvicultura e Investigación Natural).

Tipos de bosque	Categoría			
	1	2	3	4
1. Bosque lluvioso siempre verde	144	2.40	92	5.0
2. Bosque lluvioso siempre verde	207	2.85	102	2.0
3. Bosque lluvioso semi – verde	76	1.07	76	5.0
4. Bosque lluvioso semi – verde	151	2.03	98	2.0
5. Repoblación forestal en tierras desoladas	121	1.69	67	30.0
6. Bosques lluviosos con vigoroso crecimiento de lianas	125	0.79	92	20.0
7. <i>Picea abies</i> en Europa Central	137	0.02	117	0.3
8. <i>Quercus robur</i> mixtos en Europa Central	110	1.35	105	0.2
9. <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el noroeste de Estados Unidos	196	3.43	143	0.1
10. <i>Picea abies</i> en la zona boreal de Rusia	53	1.03	139	30.0
11. Alamos en tierras utilizadas con anterioridad para la agricultura	62	2.23	75	0.2
12. Robinia pseudoacacia en tierras utilizadas para la agricultura	111	3.35	84	0.1
13. <i>Pinus radiata</i> en Nueva Zelandia y Australia	126	4.54	97	0.3
14. <i>Pinus caribaea</i> en Brasil y Venezuela	89	5.12	90	0.5
15. <i>Pinus elliotii</i> en Brasil	111	3.88	80	0.3
16. <i>Pinus tadea</i> en el sureste de Estados Unidos	59	3.21	81	0.2

1: Cantidad de carbono promedio en períodos largos (después de 300 años) en la biomasa viva y los productos del bosque (tronco, ramas, follaje, raíces, maleza y productos) (tn C/ ha).

2: Flujo neto anual de carbono encima de la primera rotación (tn C/ha/año), acumulado a través de la fotosíntesis y la descomposición del humus, madera muerta y productos.

3: Cantidad de carbono promedio en períodos largos (después de 300 años), en suelos de materia orgánica (madera muerta y el humus estable del suelo) (tn C/ha).

4: Áreas técnicamente satisfactorias y socialmente disponibles para los tipos de bosques, basados en estimaciones de Winjum et. al (1992), después Howlett y Sargent (1991), Brown et. al (1992) y Birdsey (1990) en 10⁶.

Fuente: Fundación FACE, 1993.

A continuación se presentan en detalle las experiencias en plantaciones industriales de *Pinus caribaea* en tres clases de sitio en Brasil y Venezuela con rotaciones de 25 años y *Pinus elliotii* en tres clases de sitio en Brasil, con rotaciones de 30 años.

♦ Dinámica de carbono en plantaciones de *Pinus caribaea* en Brasil y Venezuela

El modelo que se utilizó para estas plantaciones se manejó en rotaciones de 20 a 25 años en 3 clases de sitio en el centro y en el norte de Sur América. Sitios que pueden determinar situaciones particulares en el campo, permitiendo de esta manera estimar el potencial de almacenamiento de carbono (Nabuurs et al, 1993).

Schroeder (1992), citado por Nabuurs et al (1993) menciona una existencia principal de carbono de 59 tmC/ha en árboles de plantaciones de *Pinus caribaea* en sitios promedios, asumiendo una rotación de 15 años con un incremento medio anual en volumen de 20 m³/ha/año.

Dixon et al (1991) citado por Nabuurs et al (1993) menciona varios proyectos de reforestación de *Pinus caribaea* en Brasil. En rotaciones de 16 años con un incremento principal de 18 m³/ha/año, sugieren un flujo neto anual de 7.2 tmC/ha/año con 61 tmC/ha, almacenada en 50 años, lo que se logra solamente en espacios limitados con altos incrementos en edades jóvenes, la cantidad almacenada después de esta edad podría ser (142 tmC/ha) porque los criterios del estudio coinciden con el fin de la segunda rotación. Para proyectos con rotaciones cortas y altos incrementos, Dixon et al (1991) menciona un porcentaje neto anual de almacenamiento superior a 10 tmC/ha/año durante la primera rotación. Este sistema tiene una disminución del carbono almacenado en el segundo período como resultado de la disminución de la productividad de los sitios.

Se puede concluir que las plantaciones de *Pinus caribaea* en el centro y norte de Suramérica almacenan carbono en un porcentaje alto durante la primera rotación, pero con limitados promedios en la biomasa y los productos. En un sitio

moderado esta especie almacena 5.12 tmC/ha/año durante la primera rotación con un promedio de existencias de 89 tmC/ha en la biomasa y los productos (Nabuurs et al, 1993).

♦ Dinámica de carbono en plantaciones de *Pinus elliottii* en Brasil

La dinámica del carbono para *Pinus elliottii* en Brasil fue modelada para rotaciones consecutivas de 30 años en sitios buenos, moderados y limitantes en cuanto a su fertilidad. Estas plantaciones almacenan en la biomasa y los productos, cantidades considerables de carbono durante la primera rotación, asumiendo que la fertilidad del suelo se mantiene. En un sitio moderado el flujo neto de carbono durante la primera rotación fue de 3.88 tmC/ha/año y para las rotaciones siguientes el promedio de existencias de carbono en la biomasa y los productos fue de 111 tmC/ha (Nabuurs et al, 1993).

Dixon et al (1991) citado por Nabuurs et al (1993) presenta un porcentaje de almacenamiento anual neto de 13.7 tmC/ha/año durante la primera rotación de 10 años de *Pinus elliottii* en Brasil con un incremento principal en volumen de 29 m³/ha/año. Esto se logra durante períodos cortos donde la densidad de las plantaciones es alta, lo que da como resultado un alto porcentaje de crecimiento juvenil.

2.3 Las plantaciones forestales en Costa Rica.

En Costa Rica se empezó con el fomento para la reforestación a partir de 1979 con la puesta en marcha del programa de Incentivos Fiscales del Estado y posteriormente con el apoyo de la cooperación de organismos internacionales (III Congreso Forestal Nacional, 1997).

A través del tiempo, el Estado experimentó con varios sistemas de incentivos:

- Deducción del impuesto sobre la renta (1979 – 1994).
- Certificado de Abono Forestal (CAF) (1988 – 1995). Orientado al desarrollo de plantaciones forestales con fines comerciales.
- Certificado de Abono Forestal por Adelantado (CAFA) (1988 – 1995). Dirigido a promover la reforestación con pequeños y medianos propietarios agrupados en organizaciones como Centros Agrícolas y Asociaciones de Desarrollo, Cooperativas y otros.
- Fondos de Desarrollo Forestal (FDF) (1985 – 1995). Mecanismo desarrollado con financiamiento de los organismos donantes los cuales exigían cubrir parcialmente con los costos de establecimiento y mantenimiento de plantaciones y además eran dirigidos a sistemas agroforestales.
- El pago de los servicios ambientales (PSA) (1996 y vigente). Se crea como un mecanismo de compensación a los beneficios ambientales que brindan los ecosistemas forestales. Este mecanismo financiero es visto como una alternativa para darle mayor dinamismo al sector forestal del país, apoyar la conservación y manejar e incrementar la cobertura forestal.

En Costa Rica, hasta 1997 se había establecido un área aproximada de 139 000 hectáreas de plantaciones (Cuadro 3).

Cuadro 3. Área (ha) plantada por especie en Costa Rica durante el período 1979 – 1997.

Especie	Area total	Area %
Melina	49274.9	35.7
Teca	23475.4	16.9
Laurel	18373.8	13.2
Pochote	17020.7	12.2
<i>Eucalytus deglupta</i>	12855.5	9.2
Otras especies	17999.7	12.9
Total	139000.0	100

Fuente: SINAC 1997, modificado por Alfaro y Reiche (1998).

Las principales especies con las que se ha reforestado en los últimos 15 años en Costa Rica son: teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), laurel (*Cordia alliodora*) y pochote (*Bombacopsis quinata*), las cuales constituyen el 78.3 % del área total plantada. Se ha plantado además eucalyptos (*Eucalyptus deglupta*, *grandis*, *saligna*), pino (*Pinus caribaea*), ciprés (*Cupressus lusitanica*) jaúl (*Alnus acuminata*) y a nivel experimental en pequeña escala una cantidad importante de especies nativas tales como: caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro (*Cedrela odorata*), ron ron (*Astronium graveolens*), cocobolo (*Dalbergia retusa*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), cebo (*Vochysia guatemalensis*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*), botarrama (*Vochysia ferruginea*) y entre otras.

Para el año de 1995 en el Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de gases con efecto invernadero en Costa Rica, se estimó la cantidad CO₂ absorbido por las plantaciones forestales en el período 1980-1990, para la cual se utilizó un valor de 0.45 para la fracción de carbono (IPCC/OECD, 1995). En el Cuadro 4 se presenta el área de plantación en miles de hectáreas (ha), las tasas de crecimiento anual para cada especie en toneladas de biomasa por hectárea y la fijación de CO₂, en gigagramos. La absorción total por plantaciones se estimó en 883 Gg.

Cuadro 4 Absorción de CO₂ en plantaciones forestales. San José 1995.

Especie	Area Plantada (ha)	Tasa de crecimiento en biomasa Ton/ha/año	Absorción de CO ₂ Gg
Eucalipto	3.800	14.5	90.7
Teca	3.300	8.0	44.0
Pino	1.300	10.0	22.1
Ciprés	0.900	10.0	14.5
Melina	21.600	14.5	516.0
Laurel, Pochote y otras	17.500	6.8	195.9
Total	48.400		883.2

*Fuente: Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases con efecto invernadero en Costa Rica 1995. Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas, Instituto Meteorológico Nacional.

Una segunda estimación del carbono fijado hasta 1995 por las plantaciones forestales establecidas en el país fue realizada por MINAE en 1996. Esta

evaluación muestra el valor promedio de 6.07 tmC/ha/año, considerando solamente el carbono acumulado en fustes. Para su determinación se utilizó el valor de 0.45 como fracción de carbono en la biomasa seca. El uso de 6.07 tnC/ha/año para todos los años y todas las especies representa un criterio general, pues las tasas de crecimiento de las diferentes especies varía entre sí y a través del tiempo. La fijación de carbono en las plantaciones forestales incentivadas por el Estado entre 1979 y 1995 se estimó en 844 288.1 toneladas por año (Cuadro 5).

Las estimaciones del Cuadro 5 han sido realizadas utilizando la ecuación $Cf = IMA * d * fc^2$ que permite determinar la cantidad de carbono fijado por hectárea.

Cuadro 5. Estimación puntual del acumulado de la cantidad de carbono fijado en las plantaciones forestales incentivada por el Estado entre 1979 – 1995. San José, 1996.

Año	Area total reforestada (ha)	Carbono fijado (tm/año)
1979	632.6	3837.9
1980	1073.8	6514.4
1981	1402.4	8507.7
1982	877.3	5322.5
1983	1747.9	10603.8
1984	1194.1	7244.3
1985	3027.0	18363.7
1986	3796.1	23030.0
1987	55039.8	30575.2
1988	8051.2	48844.8
1989	10757.4	65262.3
1990	13851.9	84036.4
1991	15783.7	95766.6
1992	15241.7	92467.4
1993	16080.9	97558.6
1994	14627.8	88743.3
1995	25981.0	157 620.2
Total	139 166.6	844 288.1

*Fuente: Ministerio de Ambiente y Energía. Información Estadística Relevante sobre el Sector Forestal 1972 – 1995. Sistema Nacional de Areas de Conservación. Area de Fomento. Con datos del Inventario y Estudio preliminar Sobre Captura de CO₂ por parte de seis empresas miembros de CONASE. (Consulta a Ing. Forestal M. Alfaro) San José, 1996.

² $Cf = IMA * d * fc$, Cf = Carbono fijado, IMA = Incremento Medio Anual (m³/ha/año) en fustes, d= densidad de la madera, fc= fracción de carbono.

Con base en los datos de MINAE y CONASE (1996) se estimó la cantidad de carbono fijado de las especies *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* para el área incentivada por el Estado esto se muestra en Cuadro 6.

Cuadro 6. Estimación de carbono fijado por *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* para el área incentivada por el Estado durante el período 1979 – 1995.

Especie	Área total (ha)	Carbono fijado (tm/ha/año)	Carbono total fijado (tm/año)
<i>Gmelina arborea</i>	49 274.9	8.2	387 604.0
<i>Tectona grandis</i>	14 622.9	4.9	71 798.2
<i>Bombacopsis quinata</i>	20 328.1	3.3	67 286.1

*Fuente: Elaboración propia. Se utilizó de base la información del Ministerio de Ambiente y Energía. Información Estadística Relevante sobre el Sector Forestal 1972 – 1995. Sistema Nacional de Áreas de Conservación. Área de Fomento. Con datos del Inventario y Estudio preliminar Sobre Captura de CO₂ por parte de seis empresas miembros de CONASE. (Consulta a Ing. Forestal M. Alfaro) San José, 1996.

Ambos esfuerzos reflejan el interés que existe en el país por determinar la capacidad de fijación de carbono en estos ecosistemas.

III Metodología

3.1 Criterios para la selección de las especies.

Como primer criterio para la selección de las especies se estableció trabajar con aquellas que presentaron una mayor área plantada en el país. Según información del Sistema de Áreas de Conservación (SINAC), de las 138 182.3 ha plantadas bajo el sistema de incentivos a la reforestación en el período 1979 – 1997, las especies que presentan mayor área son: *Gmelina arborea* con 49 274.9 ha (35.7 %), *Tectona grandis* con 23 475.4 ha (17.0 %), *Cordia alliodora* con 18 373.8 ha (13.2%) y *Bombacopsis quinata* con 17 020.7 ha (12.3 %). Aunque laurel es la tercera especie plantada según las estadísticas del (SINAC), por la inadecuada selección de sitios, para plantar esta especie se estima que un tercio del área reportada como reforestada se perdió o está en malas condiciones por falta de manejo oportuno (Alfaro,1999). Por ello se decidió descartar laurel.

Un segundo criterio de selección de las especies, es la experiencia que se tiene en el país en el manejo de las mismas y la información existente en el campo de la reforestación, generado a través de investigación básica aplicada y participativa por diferentes entes como el Estado, la empresa privada, universidades y Organizaciones no Gubernamentales (ONG).

Dado lo anterior las especies elegidas para la investigación fueron: *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, especies que representan el 65 % del área total plantada del territorio nacional (Alfaro y Reiche , 1998).

Así mismo estas especies presentaban suficiente información sobre productividad, clasificación de sitios, costos de establecimiento y manejo silvicultural de las plantaciones.

3.2 Criterios para la selección de la zona de estudio.

La presente investigación se realizó en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, debido a que la zona presentó las condiciones ideales para el estudio; a) plantaciones de las tres especies seleccionadas, b) existencia de plantaciones que han recibido algún nivel de manejo silvicultural, c) diferentes calidades de sitio para las especies, d) un rango amplio de edades.

3.3 Criterios para la selección de las plantaciones.

A) Manejo

Las plantaciones seleccionadas debían tener alguna intensidad de manejo silvicultural, principalmente en cuanto al manejo de la densidad de las mismas, mediante un programa de raleos a fin de optimizar el incremento diamétrico y en consecuencia el volumen aprovechable de la masa arbórea, concentrando el potencial de crecimiento sólo en los mejores árboles.

Se dió preferencia a las plantaciones donde se ha establecido una red de parcelas permanentes de crecimiento (ppc) que abarca las diferentes fases y clases de edad de las plantaciones, generando tablas de crecimiento para proyectar la producción de los raleos y corta final, mediante la determinación de los incrementos anuales en diámetro, altura y volumen en los distintos rodales. Para determinar el manejo en las plantaciones se utilizó la información obtenida en el campo, con la cual se determinó el área basal (G) y el número de árboles por hectárea, elementos que reflejan las condiciones del manejo.

B) Calidades de sitio

Para la investigación se decidió trabajar con sitios de productividad promedio y alta según los rangos de rendimiento de las especies a nivel nacional que

representaran calidades buenas y promedio, excluyendo los sitios de baja productividad.

La calidad de sitio se conoce como la capacidad productiva de un determinado lugar, donde el sitio está definido por factores bióticos y abióticos y su calidad por la interacción de los factores ambientales y la vegetación existente.

Para determinar la calidad o índice del sitio de las plantaciones, se utilizó la altura dominante o promedio, proveniente de la información tomada en el campo, comparada con las tablas o modelos aplicados en el país para cada una de las especies seleccionadas.

En *Gmelina arborea* se utilizó el modelo propuesto por Hughell (1991) citado por Murillo (1991) desarrollado para América Central:

$$\text{Ln (IS)} = a + (\text{Ln (hd)} - a) * (E/Eb)^k$$

Donde:

Ln = Logaritmo natural

hd = Altura dominante

a = 4.4277

k = 0.3277

E = Edad de la plantación

Eb = Edad base de 10 años

Al sustituir estos valores en la ecuación anterior se despeja el Índice de Sitio, los valores de 28, 21 y 14, representan Indicadores de Sitios buenos, regulares y de bajo rendimiento respectivamente (Murillo, 1991). En adelante esta clasificación se denominó A, B y C respectivamente.

Para *Tectona grandis* se utilizó la tabla preliminar de rendimiento para esta especie, propuesta por Miller (1969), citado por Chaves (1991), que establece

tres clases de rendimiento (Clase I, Clase II, Clase III), las cuales se denominaron A, B y C.

Comparando la altura promedio y el diámetro obtenidos en el campo, con la información de la tabla preliminar, se sitúa la clase correspondiente.

En *Bombacopsis quinata* se utilizó el modelo desarrollado por Navarro (1987) para Costa Rica.

$$\text{Ln (IS)} = a + (\text{Ln (hd)} - a) * (E/E_b)^k$$

Donde:

Ln = Logaritmo natural

hd = Altura dominante

a = 6.1292

k = 0.199

E = Edad de la plantación

E_b = Edad base de 10 años

Al sustituir estos valores en la ecuación anterior se despeja el Índice de Sitio, de tal forma que los mayores índices representan los mejores sitios, agrupados de la siguiente forma: IS 18 a 20 o superior, alto, IS de 14 a 17.9, medio y un IS de 10 a 13.9, bajo rendimiento, denominadas A, B y C.

Basados en estos modelos se establecieron las calidades de sitio, para realizar una comparación entre calidades por edad y especie.

C) Edades

Las edades a evaluar en las plantaciones se establecieron de acuerdo al turno (corta final) de la especie. Se eligieron tres rangos de edad a fin de determinar si existe diferencia en la fracción de carbono en la biomasa seca a diferentes edades y, por ende, si hay diferencias significativas en la cantidad de carbono fijado por ha y año.

Gmelina arborea

El turno de corta para *Gmelina arborea* se estimó en 12 y los tres rangos de edad seleccionados fueron 2-4, 6-8 y superior a 10 años, donde en los dos primeros rangos usualmente se han efectuado el primero, segundo y hasta un tercer raleo, el tercer rango se estableció a los 10 años por estar alcanzando el momento de la cosecha final.

Tectona grandis

El turno de corta para *Tectona grandis* se estimó en 24 años. Sin embargo, no existen plantaciones manejadas con edad superior a los 15 años, por lo que los tres rangos seleccionados fueron 4-6, 8-10 y superior a los 12 años, donde en los primeros rangos se han efectuado el primero y segundo raleo.

Bombacopsis quinata

El turno de corta para *Bombacopsis quinata* se estimó en 30 años y dado que no se registran plantaciones manejadas técnicamente con edades superiores a los 20 años los tres rangos seleccionados fueron 4-6, 8-10 y superior a 15 años, donde en los primeros rangos se han efectuado el primero y segundo raleo.

3.4 Variables a medir

Las variables medidas fueron diámetro (cm), altura comercial y altura total (m) para calcular el incremento en volumen (IMA).

3.5 Caracterización del área de estudio.

Las condiciones biofísicas predominantes en la zona se describen a continuación:

∞ Geología y suelos

La zona de estudio está constituida geológicamente por materiales de los períodos Cretácico y Cuaternario, siendo las rocas volcánicas del Cretácico las que predominan en la región. Del período Cretácico se encuentran rocas de origen volcánico, sedimentario e intrusivo. Las volcánicas están agrupadas bajo el nombre del complejo de Nicoya, el cual está compuesto de grauwacas macizas, compactas, de color gris oscuro, ftanitas, lutitas ftaníticas, calizas silíceas afaníticas, lavas con almohadillas y aglomerados de basaltos e intrusiones de gabros, diabasas y dioritas.

Presenta dos unidades geomórficas, denominadas forma de Denudación y de Sedimentación Aluvial, la unidad de Denudación se clasifica según su origen en rocas ígneas y rocas sedimentarias; las formas originadas en rocas ígneas están representadas por las serranías y valles profundos del Complejo de Nicoya, y los Cerros Testigos del Complejo de Nicoya (Chinchilla, 1987).

Vásquez (1989), identificó para el área de estudio los siguientes órdenes de suelo:

- Orden Inceptisoles, gran grupo Ustropept

Suelos de formación recientes, con un epipedón úmbrico u ócrico sobre un horizonte cámbrico, con régimen de humedad ústico, formados a partir de sedimentos aluviales y coluviales, también de rocas ígneas en relieve plano a suavemente ondulado. Son profundos bien estructurados, de texturas medias a

moderadamente pesadas, permeables, fértiles, bien drenados y color parduzco. De relieve plano (0 – 2 %) a moderadamente ondulado (15 – 30 %).

- Orden Alfisoles, gran grupo Haplustalf

Suelos moderadamente profundos a profundos, bien a excesivamente drenados, porosos, permeables, de texturas moderadamente pesadas superficialmente y pesadas en el subsuelo. El subsuelo es normalmente pardo rojizo a pardo fuerte. Son moderadamente fértiles, con pedregrosidad superficial como característica común. De relieve suavemente ondulado (2 - 15 %) a escarpado (+ 60 %).

≡ Clima

En la zona la temperatura media anual fluctúa entre 26.8 y 29.9°C, a nivel provincial la máxima temperatura promedio es de 28,5°C y la mínima temperatura promedio es de 20,5°C. Según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en el cantón de Nicoya, Lat. 10° 09' N, Long. 845° 27' O, a 120 msnm (cerrada actualmente), Nosara, Lat 09° 85' N, Long 85° 40', a 15 msnm y Garza (Ferco) Lat 09° 55' N, Long 85° 37' a 10 msnm la precipitación promedio anual alcanza 2 350,7 mm, su régimen climático se caracteriza por una prolongada estación seca de casi 5 meses (IMN, 1999).

≡ Topografía

La topografía de la zona es muy variada se observan terrenos prácticamente planos (0 - 3%), lomas ligeramente onduladas (3-15%) y terrenos marcadamente inclinados, con pendientes con un ámbito entre 30 y 60%.

3.6 Plantaciones forestales elegidas

Las plantaciones forestales elegidas fueron aquellas establecidas en la zona con una área superior a 2 ha y que han recibido manejo silvicultural, principalmente en lo referente a la aplicación de raleos.

Dichas plantaciones pertenecen a: Bosques de Puerto Carrillo (BPC), Maderas de Costa Rica (MACORI) y al Centro Agrícola Cantonal de Hojanca (CACH). A continuación se detalla la localización y características del área plantada (Anexo 1, 2 y 3).

Bosques de Puerto Carrillo S.A (BPC) (Quirós, 1998).

Empresa privada que inició sus actividades de reforestación comercial en 1983 con el establecimiento de 12 ha de *Bombacopsis quinata* y en 1986 con 30 ha de teca, convirtiéndose esta última especie en la principal del proyecto.

La empresa se ha desarrollado en Puerto Carrillo y Jabillos de Nandayure, donde las plantaciones de *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* de mayor edad corresponden a las establecidas en las cercanías de Puerto Carrillo y Buenos Aires de Sámara.

El proyecto Bosques de Puerto Carrillo está ubicado en la Costa Pacífica Norte del país, hacia el extremo sur de la Península de Nicoya (Anexo 1). La zona de vida se clasifica como bosque húmedo tropical (bh-T), su régimen climático se caracteriza por una prolongada temporada seca de casi 5 meses, un período lluvioso con precipitaciones abundantes entre 2500 y 3000 mm/año y temperaturas superiores a los 30°C.

Bosque Puerto Carrillo posee un total de 3.851 ha de las cuales el 82% (3.174 ha) ha sido plantada con *Tectona grandis*, un 2.1% (82 ha) está ocupada por

rodiales de *Bombacopsis quinata* y el 15% (595 ha) restante corresponde a caminos, bosque naturales para la conservación y patios para maderero.

Maderas de Costa Rica S.A.(MACORI) (Viquez, 1998).

Esta empresa inició su proyecto de reforestación en el año 1990 y al año 1997 se han plantado 2863 ha, de las cuales *Tectona grandis* ocupa el 63% (1796 ha), *Bombacopsis quinata* el 32% (907 ha) y otras especies maderables nativas el 5% (160 ha).

Las actividades de la empresa se desarrollan en cinco fincas ubicadas en Garza y Ostional (Anexo 2), que pertenecen al cantón de Nicoya; Río Tabaco, cantón de Santa Cruz, Peñas Blancas y Santa Cecilia, cantón de La Cruz.

La finca elegida para la investigación fue Garza la cual cuenta con 868 ha reforestadas y 411 ha de bosque. Dicho proyecto abarca 214 ha de *Tectona grandis*, 621 ha de *Bombacopsis quinata* y 33 ha con otras especies nativas.

De acuerdo a la zona de vida la finca Garza se enmarca dentro del bosque húmedo tropical (bh-T), con un régimen de precipitación anual promedio alrededor 1600 – 2800 mm, con una temperatura medio anual de 27°C.

Centro Agrícola Cantonal de Hojancha (CACH).

El Centro Agrícola Cantonal de Hojancha inicia sus actividades en el año de 1978, para ofrecer alternativas de diversificación para el desarrollo sostenible. El objetivo principal de su creación es promover la participación de la población del cantón, en el planeamiento y ejecución de programas tendientes a desarrollar el sector agropecuario.

Actualmente el CACH a apoyado a medianos productores en el establecimiento de plantaciones forestales de un total de 2152 ha con varias especies, principalmente melina, teca y pochote incorporando a 458 pequeños agricultores de la zona (Anexo 3).

De acuerdo a la zona de vida las plantaciones del Centro Agrícola se enmarcan dentro del bosque húmedo tropical (bh-T) y bosque muy húmedo tropical (bmh-T).

3.7 Selección de los árboles y toma de muestras

Para la selección de los árboles de las respectivas edades, se establecieron seis Parcelas Temporales de Muestreo (PTM), de forma circular de 250 m² cada una en las edades más jóvenes y 500 m² en las más viejas. En las parcelas instaladas se midió a todos los árboles: a) el diámetro a la altura del pecho (dap) con cinta diamétrica, b) la altura comercial y altura total con el clinómetro Suunto.

Se seleccionaron tres árboles tipo, árboles que presentaban las mejores características en diámetro, altura y forma por parcela. La muestra se tomó a la altura de 1.30 metros de la base del árbol, barrenando los tres árboles tipo escogidos por parcela, una vez obtenida la muestra se procedió a sellar la herida con cera, para evitar daños posteriores al árbol.

3.8 Estimación del volumen.

3.8.1 Estimación del volumen por árbol.

Se estimó el volumen de cada árbol dentro de la parcela mediante las siguiente fórmulas:

Gmelina arborea Volumen= $e(-11.64243 + 2.24441 * \ln(dap) + 1.122492 * \ln(h))$
 h= Altura comercial o total $R^2 = 0.98$

Tectona grandis Volumen = $0.00877993 + 0.00003251 * (d^2h)$
 h= Altura comercial o altura total $R^2 = 0.97$

Bombacopsis quinata Volumen= $e(-8.0758 + 1.2678 * \ln(dap) + 0.9729 * \ln(h))$
 h= Altura comercial o altura total $R^2 = 0.97$

3.8.2 Estimación del Volumen por hectárea.

Para la estimación del volumen por hectárea se utilizó la información de las parcelas: volumen/árbol, número de árboles y tamaño de la Parcela Temporal de Muestreo, resultado que fue extrapolado a la hectárea.

3.8.3 Estimación del Incremento Medio Anual (IMA).

Una vez obtenido el volumen por hectárea se calculó el IMA ($m^3/ha/año$) por edad y sitio para cada una de las especies.

Se realizó una proyección de volumen mediante las tablas preliminares de rendimiento para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* elaboradas para diversos índices de sitio y densidades, información con la cual se han construido modelos de predicción de calidad de sitio, crecimiento y rendimiento, la cual ha sido generada por el proyecto MADELEÑA (1986-1995) del CATIE, en su Colección de Guías Silviculturales (Chaves, E.1991; Murillo, O. 1991; CATIE, 1991).

3.9 Análisis de laboratorio.

3.9.1 Determinación del porcentaje de humedad.

El porcentaje de humedad se estimó con las muestras en condición verde; donde se obtuvo el peso verde y luego se extrajo el agua libre o agua de capilaridad en un horno a 60 °C, hasta alcanzar un peso constante, la muestra fue pesada nuevamente y por medio de la siguiente fórmula se obtuvo el porcentaje de humedad.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso verde} - \text{Peso seco}}{\text{Peso verde}} * 100$$

3.9.2 Porcentaje de materia seca.

Las muestras fueron trituradas en un molino tamizado con una malla de 0.1mm. Se pesaron las cápsulas de aluminio, y luego se pesó 1 gr de muestra homogenizada. Se colocaron en un horno al vacío a 70 °C con presión de 15 atmósferas por un lapso de 24 horas, para extraer el agua ligada que se encuentra dentro de la pared celular.

Posteriormente se colocaron en un desecador hasta que estuvieran a temperatura ambiente para ser pesadas nuevamente y determinar así el porcentaje de materia seca, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MS} = \frac{\text{Dif} - \text{PC}}{\text{Pm}} * 100$$

Donde:

% MS= Porcentaje de materia seca

Dif = cápsula más muestra seca

Pc = peso cápsula

Pm = peso muestra

Ambos análisis se realizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal y Bioquímica de Forrajes de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional.

3.9.3 Método para determinar la fracción de carbono (Eduarte y Segura, 1998)

Para la determinación de la fracción de carbono en la biomasa, para cada especie forestal seleccionada, se utilizó el método de calorimetría.

Esta metodología está basada en los siguientes principios:

- Ley universal de la termodinámica, la cual afirma que cualquier proceso o trabajo que implique un cambio en los niveles de energía en la naturaleza, sucede y la energía del universo se mantiene igual (Brown y Le May, 1987; citado por Segura, 1997).
- Ley de Hess, establece que una reacción se lleva a cabo en una serie de etapas, el cambio calórico (ΔH) para la reacción es igual a la sumatoria de todos los cambios de entalpía para cada etapa en particular. Es útil para calcular los cambios de energía que son difíciles de medir en forma directa (Brown y Le May, 1987; citado por Segura, 1997).

Con la utilización de un calorímetro de Parr y siguiendo los procedimientos de la A.S.T.M (1973), para combustibles sólidos se puede obtener de cada muestra, la cantidad de energía total en kcal/kg, transformándose a moles de carbono potencial fijado utilizando la relación de moles (g/peso molecular) y con el peso de la muestra inicial se determina la fracción de carbono fijado.

Conociendo el calor de combustión y tomando la referencia de Hipkis 1984; citado por Segura (1997), con respecto a la energía requerida por las plantas en el proceso de fotosíntesis ($\Delta G = 4.8 * 10^5 \text{ J mol}^{-1}$) para poder fijar en moléculas orgánicas un mol de carbono se tiene como base la fisiología.

Para determinar la cantidad de carbono en las muestras de madera se procede primero a estandarizar la bomba calorimétrica. Se coloca una muestra con peso aproximado entre 0.70 a 0.99 g en una bomba de metal pesado en la que se introduce oxígeno puro a presión (20 – 25 atm), la bomba es sumergida en 2 litros exactos de agua y la madera se quema por el calentamiento momentáneo del hilo fino de platino (10 cm). El incremento de temperatura del agua multiplicado por la capacidad calorífica del agua y de la bomba proporciona una medida del calor producido.

Una vez determinado el calor producido de la bomba calorimétrica se realizaron los siguientes cálculos:

- a. Las calorías (una caloría es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua 1°C, Brown y LeMay, 1987) producidas se pasan a julios (J) multiplicando por 4.1868 J.
- b. Los julios por gramo se transforman en moles de carbono dividiendo por 4.8×10^5 J.
- c. Utilizando la fórmula de moles se obtiene los gramos de carbono:
$$\text{Mol} = \text{gramos} / \text{Peso molecular}$$
- d. Luego se divide entre el peso de la muestra inicial para obtener la fracción de carbono fijada.

Dicho método para la estimación de la cantidad de carbono es más directo pues no trabaja bajo ningún supuesto y el cálculo se basa en la cantidad de energía que requiere una planta para fijar un mol de carbono aproximadamente.

3.10 Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los datos se hizo por especie, por sitio y edad. Se realizó un análisis de varianza, utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS), para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* que permitió mostrar

estadísticamente si existen o no diferencias significativas entre los diferentes sitios y edades por especie. Para *Bombacopsis quinata* se realizó una prueba t.

3.10.1 Aplicación de modelos.

Para detectar la tendencia en el comportamiento de la fracción de carbono con respecto a la edad se probaron ecuaciones lineales simples y ecuaciones no lineales, principalmente logarítmicas con el fin de elegir el mejor modelo.

3.11 Estimación de carbono.

3.11.1 Estimación del carbono almacenado y fijado en las plantaciones evaluadas.

Una vez calculados los volúmenes totales por edad y por sitio se procedió al cálculo del carbono almacenado y fijado; utilizando las densidades respectivas por especie, *Gmelina arborea* 0.37 (Murillo, 1991), *Tectona grandis* 0.69 (Chaves, 1991) y *Bombacopsis quinata* 0.43 (Carpio, 1992), por medio de la siguiente fórmula:

$$CA = Vt * d * fc$$

Donde:

CA = Carbono almacenado (toneladas métricas/ha)

Vt = Volumen total (m³/ha)

d = Densidad de la madera (gr/cm³)

fc = Fracción de carbono (determinada en la presente investigación)

Para el cálculo de carbono fijado la fórmula a utilizar es la siguiente:

$$Cf = IMA * d * fc$$

Donde:

Cf = Carbono fijado (toneladas métricas /ha/año)

IMA = Incremento Medio Anual (m³/ha/año) en fustes.

d= Densidad de la madera (gr/cm³)

fc= Fracción de carbono (determinada en la presente investigación)

Para el cálculo de carbono almacenado y fijado en la biomasa aérea se introduce en las fórmulas anteriores el factor de 1,1, que incluye ramas y follaje estimado en un 10% adicional (Navarro,1985).

3.11.2 Estimación del carbono almacenado y fijado en plantaciones forestales

Para realizar estimaciones a nivel general, se utilizaron las tablas de rendimiento elaboradas para las especies.

En el caso de *Gmelina arborea* se utilizó el Índice de Sitio 28 de la tabla preliminar de rendimiento con manejo en América Central, se escogió dicho Índice de Sitio por representar un sitio de promedio a bueno para Costa Rica (Alfaro, 1999).

En el caso de *Tectona grandis* se utilizó la tabla preliminar de rendimiento que se encuentra en la Guía Silvicultural, se trabajó con los datos de la clase I, que representa sitios promedio a buenos para el caso de Costa Rica, la tabla muestra el volumen sin corteza hasta 8 cm de diámetro menor, se estima que el volumen total de fuste es un 10% más que este volumen (Jiménez,1999).

Para *Bombacopsis quinata* se trabajó con la tabla preliminar de rendimiento de la Guía Silvicultural para sitios medios en Costa Rica, siendo ésta la única para esta especie.

Utilizando los volúmenes de estas tablas de rendimiento por especie, edad, y sitio se procedió al cálculo del carbono almacenado y fijado por medio de las siguientes fórmulas:

$$CA = Vt * d * fc$$

Donde:

CA = Carbono almacenado (toneladas métricas/ha)

Vt = Volumen total (m³/ha)

d = Densidad de la madera (gr/cm³)

fc = Fracción de carbono (determinada en la presente investigación)

Para el cálculo de carbono fijado la fórmula a utilizar es:

$$Cf = IMA * d * fc$$

Donde:

Cf = Carbono fijado (toneladas métricas /ha/año)

IMA = Incremento Medio Anual (m³/ha/año) en fustes.

d= Densidad de la madera (gr/cm³)

fc= Fracción de carbono (determinada en la presente investigación)

3.12 Análisis Financiero

Para el cálculo de los costos y beneficios se utilizó la información de Gómez y Reiche (1997) que incluye costos de establecimiento y manejo de las plantaciones indexando un 10 % anual por concepto de inflación promedio desde 1996 hasta 1999. Así mismo se complementó con información actualizada de las empresas y organizaciones propietarias a cargo de las plantaciones evaluadas.

Los ingresos por la venta de madera incluyen los productos de uso común: aserrío, postes y leña. Se utilizaron los precios de mercado, proveniente de la información de la Cámara Costarricense Forestal (CCF), Centros Agrícolas Cantonales (CAC) y Junta Nacional Forestal Campesina (JUNAFORCA).

Para el precio del servicio de fijación de carbono se tomaron valores de \$ 10 y \$5 tm C de las negociaciones realizadas por Costa Rica y otros países hasta hoy. Para ello se desarrollaron cinco escenarios por especie, los que se detallan a continuación:

Escenario 1.

Ingreso por la venta de la madera.

Escenario 2.

Ingreso por la venta de la madera y carbono fijado en fustes a \$5 tm C

Escenario 3.

Ingreso por la venta de la madera y carbono fijado en la biomasa total (fustes, ramas y follaje) a \$5 tm C.

Escenario 4.

Ingreso por la venta de la madera y carbono fijado en fustes a \$10 tm C.

Escenario 5.

Ingreso por la venta de la madera y carbono fijado en la biomasa total (fustes, ramas y follaje) a \$10 tm C.

IV. Resultados

4.1 Caracterización dasométrica de las plantaciones evaluadas.

4.1.1 Determinación de la calidad de sitio.

En el cuadro 7 aparece el resumen de la clasificación de sitios por edad para *Gmelina arborea*, basados en las curvas de crecimiento para tres índices de sitio en América Central (Anexo 4).

Cuadro 7. Clasificación de las parcelas de medición por índice de sitio para *Gmelina arborea* en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Parcela (Nº)	Altura dominante	Índice de Sitio	Calidad de Sitio	Clasificación
4	1	18,1	27	Bueno	A
	2	17,7	26	Bueno	A
	3	17,8	27	Bueno	A
	4	13,4	22	Regular	B
	5	12,4	20	Regular	B
	6	18,1	27	Bueno	A
8	7	32,7	35	Bueno	A
	8	31,7	34	Bueno	A
	9	22	24	Regular	B
	10	20,4	23	Regular	B
	11	16,6	19	Regular	B
	12	17,7	20	Regular	B
10	16	23,5	22	Regular	B
	17	22,8	21	Regular	B
	18	22,5	21	Regular	B
12	13	24,6	23	Regular	B
	14	19,5	18	Regular	B
	15	24	22	Regular	B

Para *Gmelina arborea* las zonas del cantón de Hojancha presentaron un Índice de sitio promedio de 27 y 21 para el primer rango de edad (4 años) clasificándose como sitios buenos y regulares (A y B) respectivamente.

Para el segundo rango de edad (8 años) los Índices de sitio promediaron más de 28 y 22, sitios clasificados como buenos y regulares (A y B). En el último rango de edad (10-12 años) el Índice de sitio promedio 21 es clasificado como regular (B).

Cuadro 8. Clasificación de las parcelas de medición por índice de sitio para *Tectona grandis* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Parcela (Nº)	Altura promedio	Calidad de sitio	Clasificación
5	1	14,09	Clase I	A
	2	12,93	Clase I	A
	3	12,69	Clase I	A
	4	7,35	Clase II	B
	5	8,59	Clase II	B
	6	10,87	Clase II	B
8	7	17,3	Clase I	A
	8	18,28	Clase I	A
	9	20,15	Clase I	A
	10	14,23	Clase II	B
	11	16,31	Clase I	A
	12	15,8	Clase II	B
12	13	20,61	Clase I	A
	14	21,68	Clase I	A
	15	20,01	Clase I	A
	16	18,75	Clase II	B
	17	15,86	Clase II	B
	18	17,74	Clase II	B

En el cuadro 8 se presentan las calidades de sitio para los tres rangos de edad en *Tectona grandis*, de acuerdo a la tabla preliminar de rendimiento en Trinidad (Anexo 5), las parcelas de los dos primeros rangos de edad (5 y 8 años) ubicados en Garza, zona perteneciente al cantón de Nicoya clasificaron como Clase I y II, las que se denominaron A y B, para el tercer rango (12 años) ubicado en Puerto Carrillo (Hojancha) responde a la misma clasificación de A y B.

Cuadro 9. Clasificación de las parcelas de medición por índice de sitio para *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Parcela (N°)	Altura dominante	Índice de Sitio	Calidad de Sitio	Clasificación
5	1	14,5	23	Alto	A
	2	15,7	24	Alto	A
	3	16,5	25	Alto	A
	4	11,3	18	Alto	A
	5	13,4	21	Alto	A
	6	9,4	16	Medio	B
8	7	18,6	21	Alto	A
	8	16,4	19	Alto	A
	9	17,7	20	Alto	A
	10	16	19	Alto	A
	11	12,5	15	Medio	B
	12	15	17	Alto	A
15	13	15,4	12	Bajo	C
	14	16,2	12	Bajo	C
	15	16,4	12	Bajo	C
	16	14,8	11	Bajo	C
	17	15,3	11	Bajo	C
	18	10,3	7	Bajo	C

El cuadro 9 muestra las clasificaciones de sitio para *Bombacopsis quinata*, basados en las curvas de crecimiento en Costa Rica (Anexo 6) es importante destacar que esta especie presenta una parcela de clasificación B, en los dos primeros rangos de edad (parcelas 6 y 11), y en el tercer rango todas las parcelas muestreadas clasificaron como sitios de bajo rendimiento (C) siendo esto una excepción.

4.1.2 Caracterización dasométrica de *Gmelina arborea*

Cuadro 10. Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de *Gmelina arborea* en el cantón de Hojancha, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Sitio	IMA Dap (cm/año)	IMA h (m/año)	N (árbo/ha)	Area basal (m ² /ha)	Vol total (m ³ /ha)	IMA Vol (m ³ / ha/año)
4	A	4,76	4,20	570	16,17	89,68	22,42
4	B	3,21	2,94	540	8,08	27,90	6,97
8	A	4,19	3,66	230	20,55	246,81	30,85
8	B	3,11	2,51	373	16,31	121,47	15,18
10	B	2,65	2,16	260	14,93	119,03	11,90
12	B	2,33	1,73	307	18,63	146,09	12,17

El cuadro 10 muestra por medio del área basal y el número de árboles por hectárea, el manejo silvicultural recibido en los diferentes rangos de edad y sitios, donde el promedio de las áreas basales en su mayoría no excede los 20 m²/ha, área basal que se considera adecuada para mantener el vigor silvicultural de la masa residual, excepto en el segundo rango en los sitios A, debido a la proximidad a ser raleados.

El cuadro presenta los resultados de los incrementos promedio en diámetro y altura, para *Gmelina arborea*, ratificando las diferencias por edad y sitio, mostrando que los sitios de clasificación A presentan los mayores incrementos, en comparación de los sitios clasificados como B.

Se observa que el promedio de IMA en volumen para sitios clasificación A es superior a los que se presentan en los sitios B, en el primero y segundo rango de edad.

4.1.3 Caracterización dasométrica de *Tectona grandis*

Cuadro 11. Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de *Tectona grandis* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Sitio	IMA Dap (cm/año)	IMA h (m/año)	N (árb/ha)	Area basal (m ² /ha)	Vol total (m ³ /ha)	IMA Vol (m ³ /ha/año)
5	A	3,24	2,65	560	11,94	72,31	14,46
5	B	2,22	1,79	640	6,61	32,45	6,49
8	A*	2,70	2,25	355	12,69	96,15	12,02
8	B	2,45	1,88	540	16,85	112,45	14,06
12	A	1,89	1,73	366	14,91	131,47	10,96
12	B	1,72	1,50	466	15,69	123,57	10,30

*Parcelas que presentaban raleo

En *Tectona grandis* se presenta un comportamiento similar al de *Gmelina arborea* en los sitios de clasificación A, con excepción del segundo rango donde el volumen promedio es menor que el sitio B (cuadro 11) esto debido a que al tiempo de medición se había efectuado un raleo y no se disponía de la información sobre el volumen extraído, por lo que este no se incluyó.

El área basal y el número de árboles por hectárea, refleja el manejo silvicultural recibido en los diferentes rangos de edad y sitios, donde se observa que el promedio de las áreas basales en la mayoría de los casos no excede los 20 m²/ha.

4.1.4 Caracterización dasométrica de *Bombacopsis quinata*

Cuadro 12. Caracterización dasométrica para las plantaciones evaluadas de *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.

Edad (años)	Sitio	IMA Dap (cm/año)	IMA h (m/año)	N (árb/ha)	Area basal (m ² /ha)	Vol total (m ³ /ha)	IMA Vol (m ³ /ha/año)
5	A	4,46	2,66	416	16,54	84,21	16,84
5	B	2,61	1,64	720	9,75	45,65	9,13
8	A	3,39	1,99	368	21,56	111,80	13,98
8	B	2,95	1,48	320	14,35	61,87	7,73
15	C	1,46	0,93	393	15,01	80,15	5,34

En el cuadro 12, *Bombacopsis quinata* muestra por medio del área basal y el número de árboles por hectárea, el manejo silvicultural recibido en los diferentes rangos de edad y sitios, presenta al igual que las otras especies volúmenes promedio en los sitios A superiores a los sitios B, en el tercer rango de edad el promedio del volúmen refleja la condición de sitio de bajo rendimiento (C).

4.2 Análisis de laboratorio

Esta sección presenta los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio; porcentaje de humedad, porcentaje de materia seca y la fracción de carbono por el método de calorimetría para las tres especies muestreadas.

4.2.1 Porcentaje de humedad y materia seca

El cuadro 13 presenta los porcentajes de humedad y materia seca promedio, para la madera de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, a los diferentes sitios (A, B y C) por especie. En los anexos 7, 8 y 9 se presentan estos porcentajes por muestra de laboratorio.

Cuadro 13. Porcentaje de humedad y materia seca promedio por rango de edad y sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste 1998.

<i>Gmelina arborea</i>						
	% de Humedad			% de Materia seca		
Edad	4	8	10 - 12	4	8	10 - 12
Sito A	55.21	61.64	-	94.15	93.25	-
Sito B	61.08	65.49	52.33	93.92	93.57	94.59
<i>Tectona grandis</i>						
	% de Humedad			% de Materia seca		
Edad	5	8	12	5	8	12
Sito A	53.55	50.97	50.92	96.46	96.84	96.99
Sito B	53.42	53.15	52.26	96.35	96.77	96.35

Continuación cuadro 13.

<i>Bombacopsis quinata</i>						
Edad	% de Humedad			% de Materia seca		
	5	8	15	5	8	15
Sito A	62.12	62.17	-	96.29	96.09	-
Sito B	-	-	-	-	-	-
Sito C	-	-	61.20	-	-	95.83

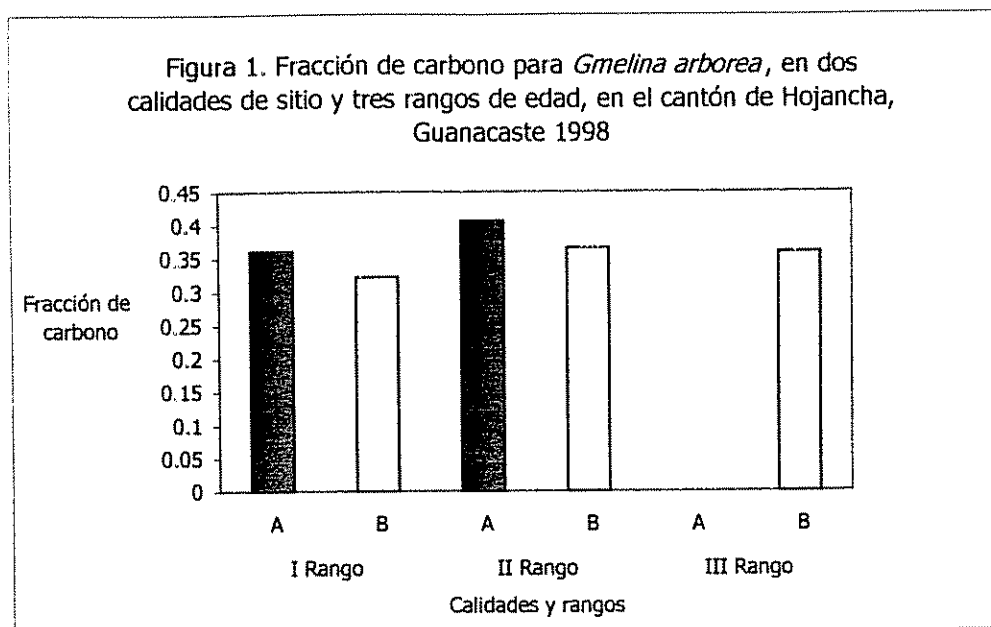
4.2.2 Fracción de carbono en la biomasa seca

Para la determinación de la fracción de carbono para las tres especies, de 162 muestras analizadas, (Anexo 10 al 12) 54 por especie, se eliminaron 16 muestras que aparecen marcadas con un asterisco(*) (Anexo 11, 12), debido a que las mismas no presentaron el peso requerido para realizar el análisis en la bomba calorimétrica para la estimación de la fracción de carbono, por lo que se decidió omitir las mismas en el estudio, manteniendo un total de 149 muestras, 54 para *Gmelina arborea*, 49 para *Tectona grandis* y 46 para *Bombacopsis quinata*. Para todos los análisis se trabajó con estas 149 muestras.

La fracción o contenido de carbono en una unidad de biomasa seca en *Gmelina arborea* estimada mediante el método de calorimetría, da los siguientes resultados:

- El primer rango de edad tiene un promedio de 0.36 para el sitio A y un promedio de 0.32 para un sitio B.
- Para el segundo rango de edad el sitio A presenta en promedio de 0.40 y el sitio B 0.36 mostrando un aumento para ambos sitios.
- En el tercer rango de edad el sitio B promedia 0.35.

En la Figura 1 se muestra el promedio de la fracción de carbono por sitio y rango, como resultado una plantación de *Gmelina arborea* en tres rangos de edad diferentes y dos calidades de sitio tiene una media de 0.36 de carbono en la biomasa seca del fuste.

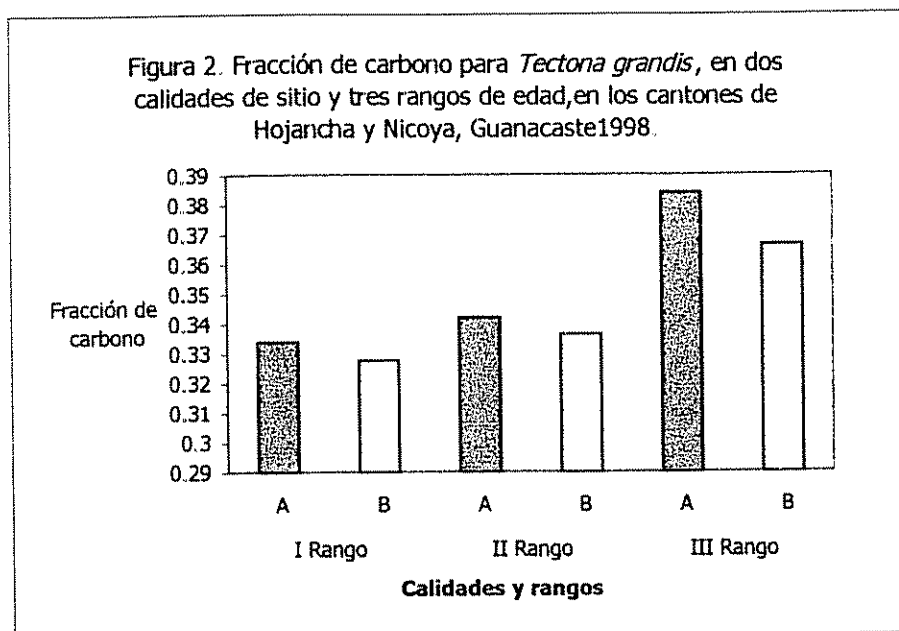


La fracción o contenido de carbono en una unidad de biomasa seca en *Tectona grandis* estimada mediante el método de calorimetría, muestra lo siguiente:

- El primer rango de edad tiene un promedio de 0.33 para un sitio A y un promedio de 0.32 para un sitio B.
- Para el segundo rango de edad el sitio A tiene un promedio de 0.34 y el sitio B 0.33.
- En el tercer rango de edad el sitio A promedia 0.38 y el sitio B 0.36.

La Figura 2 muestra el promedio de la fracción de carbono por sitio y rango de edad, como resultado una plantación de *Tectona grandis* en tres rangos de

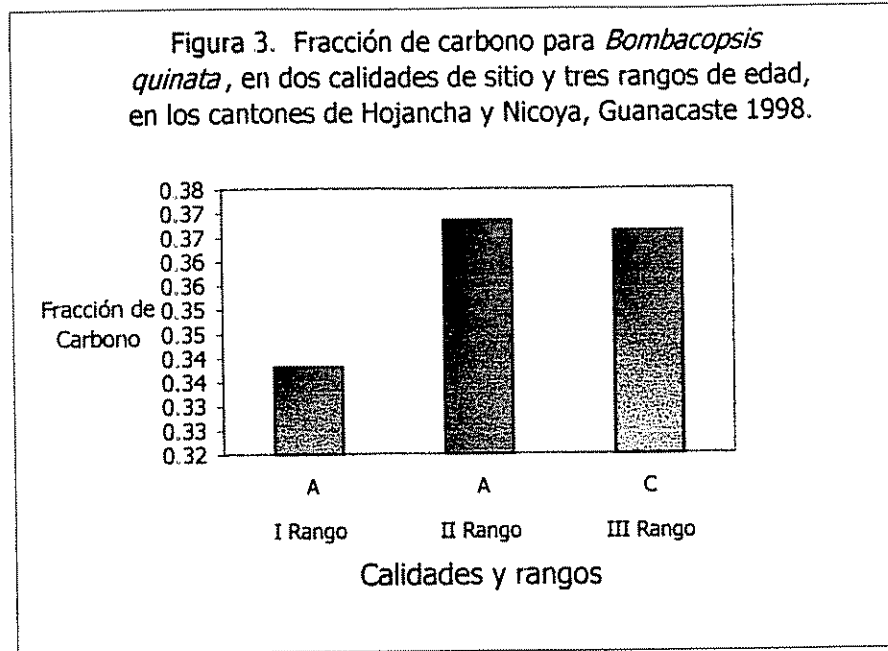
edad diferentes y dos calidades de sitio tiene una media de 0.35 de carbono en la biomasa seca del fuste.



La fracción o contenido de carbono en una unidad de biomasa seca en *Bombacopsis quinata* estimada mediante el método de calorimetría, muestra lo siguiente:

- El primer rango de edad tiene un promedio de 0.33 para un sitio A.
- Para el segundo rango de edad el sitio A promedia 0.36.
- En el tercer rango de edad el sitio C promedia 0.36.

La Figura 3 muestra el promedio de la fracción de carbono por sitio y rango de edad como resultado una plantación de *Bombacopsis quinata* en tres rangos de edad diferentes y dos calidades de sitio tiene una media de 0.35 de carbono en la biomasa seca del fuste.



4.3 Análisis estadístico

Este apartado muestra el análisis estadístico por especie, sitio y rango, basado en los resultados del análisis de varianza (ANDEVA). Los estadísticos básicos que generaron el ANDEVA para cada especie se detalla en el Anexo 13.

4.3.1 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de *Gmelina arborea*.

El cuadro 14 muestra el análisis de varianza para *Gmelina arborea*, donde los resultados indican que existen diferencias significativas entre sitio y rango de edad en la fracción de carbono para una probabilidad de 0.0075 y 0.0115 respectivamente a una probabilidad igual al alfa de 0.05.

Cuadro 14. Análisis de varianza (ANDEVA) de la fracción de carbono para *Gmelina arborea* por edad y sitio, en el cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

Fuente de variación (FV)	Gl	SC	CM	F	Pr >F
Sitio	1	0.01242408	0.01242408	10.01	0.0075
Rango	2	0.01595104	0.00797552	6.42	0.0115
Sitio * Rango	1	0.00000583	0.00000583	0.00	0.9464
Parcela (Sitio * Rango)	13	0.01613986	0.00124153	4.53	0.0002
Error	36	0.00986431	0.00027401		
Total	53				

El cuadro 15 muestra las medias y error estándar por sitio y rango, donde se indica que las medias difieren entre sí.

Cuadro 15. Medias y error estándar de la fracción de carbono para *Gmelina arborea* por sitio y rango de edad, en el cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

Sitio	Rangos			Medias*	Límite superior	Límite inferior
	1	2	3			
A	0.3612 ± 0.0066	0.4060 ± 0.0059		0.3761 ± 0.0069	0.3908	0.3614
B	0.3226 ± 0.0073	0.3657 ± 0.0058	0.3589 ± 0.0065	0.3551 ± 0.0046	0.3646	0.3457
Medias**	0.3483 ± 0.0066	0.3791 ± 0.0062	0.3918 ± 0.0065			
Límite superior	0.3623	0.3924	0.3727			
Límite inferior	0.3344	0.3659	0.3452			

* Medias de sitio difieren entre sí (P= 0.0075)

** Medias de rango difieren entre sí (P= 0.0115)

4.3.2 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de *Tectona grandis*.

El cuadro 16 muestra el ANDEVA para *Tectona grandis*, donde los resultados indican que existen diferencias significativas entre rangos en la fracción de carbono para una probabilidad de 0.0025, entre sitios no existen diferencias significativas a una probabilidad del 5% (P < 0.4545).

Cuadro 16. Análisis de varianza (ANDEVA) de la fracción de carbono para *Tectona grandis* por edad y sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Fuente de variación (FV)	Gl	SC	CM	F	Pr >F
Sitio	1	0.00040507	0.00040507	0.60	0.4545
Rango	2	0.01462226	0.0073113	10.85	0.0025
Sitio * Rango	2	0.00081231	0.00040615	0.60	0.5645
Parcela (Sitio * Rango)	11	0.00741329	0.00067394	1.90	0.0776
Error	32	0.01135710	0.00035491		
Total	48				

El cuadro 17 indica las medias y error estándar por sitio y rango, donde se muestra que las medias de rango difieren entre sí, caso contrario a las medias por sitio.

Cuadro 17. Medias y error estándar de la fracción de carbono para *Tectona grandis* por sitio y rango de edad, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Sitio	Rangos			Medias*	Límite superior	Límite inferior
	1	2	3			
A	0.3338 ± 0.0058	0.3420 ± 0.0059	0.3840 ± 0.0083	0.3521 ± 0.0054	0.3632	0.3411
B	0.3276 ± 0.0128	0.3362 ± 0.0065	0.3663 ± 0.0068	0.3487 ± 0.0059	0.3611	0.3362
Medias**	0.3319 ± 0.0053	0.3400 ± 0.0044	0.3751 ± 0.0056			
Límite superior	0.3436	0.3494	0.3871			
Límite inferior	0.3202	0.3306	0.3632			

* Medias de sitio no difieren entre sí (P = 0.4545)

** Medias de rango difieren entre sí (P = 0.0025)

4.3.3 Análisis estadístico para el contenido de carbono en la materia seca de *Bombacopsis quinata*.

Los estadísticos básicos que presenta *Bombacopsis quinata* en el anexo 13 no permitieron realizar un análisis de varianza (ANDEVA) como se hizo para las dos especies anteriores, debido esto a la irregularidad de los datos por sitio y rango de edad. Es por ello que para esta especie se decidió realizar una Prueba T en los dos primeros rangos que presentaban una misma calidad de sitio (A), ya que esta prueba permite la comparación entre dos grupos, con el fin de evaluar si los

grupos difieren o no, así mismo se puede estimar la media por grupo probando de esta forma si las medias son o no diferentes.

El cuadro 18 muestra el resultado del análisis estadístico para *Bombacopsis quinata* donde la prueba T señala que existen diferencias significativas entre los dos primeros rangos de edad para el sitio A en la fracción de carbono, debido a que la probabilidad de 0.0017 es menor al nivel de significancia de 0.05.

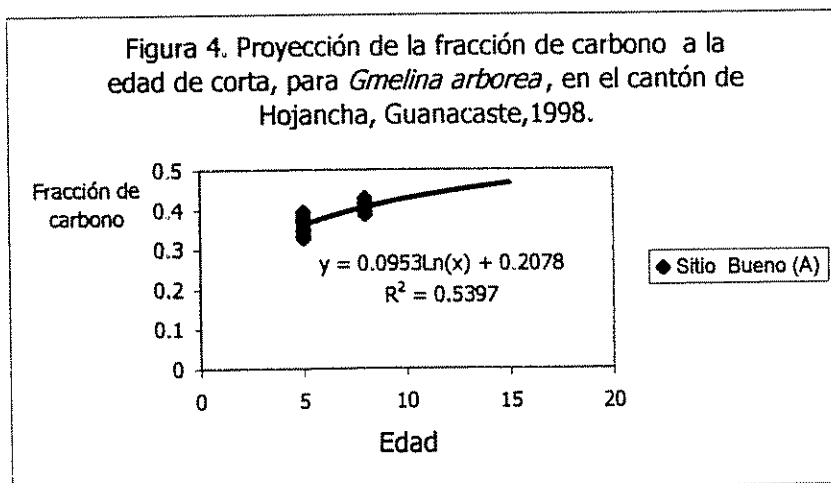
Cuadro 18. Medias y error estándar de la fracción de carbono para *Bombacopsis quinata* por sitio y rango de edad, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

	Sitio A*		Pr > F	Sitio C
	Rango I	Rango II		Rango III
Medias	0.3381 ± 0.0054	0.3684 ± 0.0065	0.0017	0.3661 ± 0.0070
Límite superior	0.3499	0.3825		0.3810
Límite inferior	0.3264	0.3544		0.3511

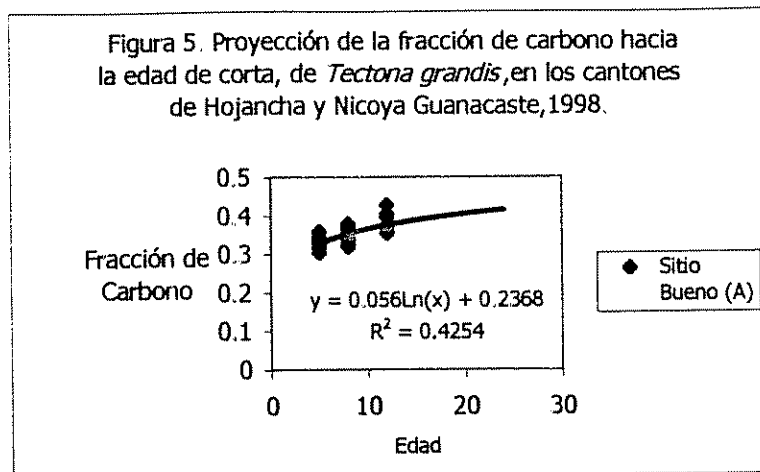
*Las medias de ambos rangos difieren entre sí (P = 0.0017)

4.4 Modelos para la proyección de carbono

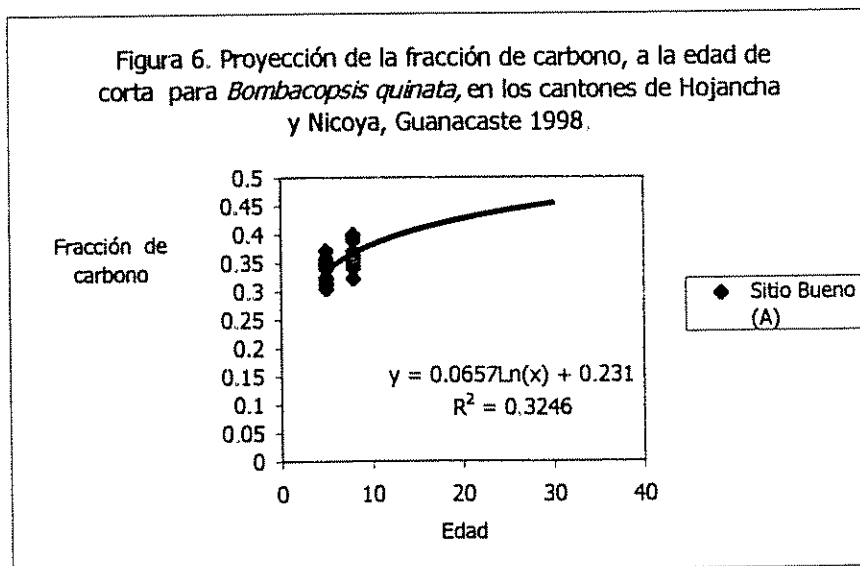
Los modelos generados, basados en regresiones logarítmicas, muestran para las tres especies una tendencia a incrementar la fracción de carbono conforme aumenta la edad de la plantación y se acerca a la edad de corta.



La Figura 4 muestra como en *Gmelina arborea*, a una edad estimada de corta de 14 años, una plantación estaría alcanzando una fracción de carbono en la biomasa de fuste de 0.46.



La Figura 5 muestra la tendencia de la fracción de carbono en la biomasa del fuste para *Tectona grandis* hacia el turno estimado de corta de 24 años, la cual podría llegar a alcanzar 0.415.



La Figura 6 muestra la tendencia de la fracción de carbono en la biomasa del fuste para *Bombacopsis quinata* a una edad estimada de corta de 30 años, la que podría llegar a alcanzar 0.454 al final de esta.

4.5 Determinación de carbono almacenado en las plantaciones evaluadas

Con el resultado de carbono presente en la biomasa seca para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* obtenidos a través del método de calorimetría, el volumen total (m^3/ha), biomasa aérea y la densidad de la madera por especie se estimó el carbono almacenado para cada una de ellas por rango de edad y calidad de sitio.

Cuadro 19. Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea (tm/ha) para *Gmelina arborea* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en el cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono almacenado en fustes (tm/ha)	Carbono almacenado en biomasa aérea (tm/ha)
4	A	11.95	13.14
	B	3.30	3.63
8	A	36.53	40.18
	B	16.18	17.80
10	B	15.86	17.44
12	B	18.92	20.81

Cuadro 20. Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea (tm/ha) para *Tectona grandis* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono almacenado en fustes (tm/ha)	Carbono almacenado en biomasa aérea (tm/ha)
5	A	16.47	18.11
	B	7.17	7.88
8	A*	22.56	24.81
	B	25.61	28.17
12	A	34.47	37.92
	B	30.70	33.77

*Parcelas que presentan raleo

Cuadro 21. Carbono almacenado en fustes y biomasa aérea (tm/ha) para *Bombacopsis quinata* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono almacenado en fustes (tm/ha)	Carbono almacenado en biomasa aérea (tm/ha)
5	A	11.95	13.15
	B	6.48	7.13
8	A	17.31	19.04
	B	9.56	10.54
15	C	12.41	13.65

*Muestra insuficiente para determinar la fracción de carbono.

4.5.1 Determinación del carbono fijado en las plantaciones evaluadas

Con el resultado del carbono presente en la biomasa seca para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* obtenidos a través del método de calorimetría, el incremento volumétrico promedio (IMA) y la densidad de fustes por especie se estimó el carbono fijado para cada una de ellas, por rango de edad y calidad de sitio.

Cuadro 22. Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para *Gmelina arborea* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en el cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono fijado en fustes (tm/ha/año)	Carbono fijado en biomasa aérea (tm/ha/año)
4	A	2.99	3.29
	B	0.83	0.91
8	A	4.57	5.02
	B	2.02	2.22
10	B	1.59	1.74
12	B	1.58	1.73

Cuadro 23. Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para *Tectona grandis* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono fijado en fustes (tm/ha/año)	Carbono fijado en biomasa aérea (tm/ha/año)
5	A	3.29	3.62
	B	1.43	1.58
8	A*	2.82	3.10
	B	3.20	3.52
12	A	2.87	3.16
	B	2.56	2.81

*Parcelas que presentan raleo

Cuadro 24. Fijación de carbono (tm C/ha/año) en fustes y biomasa aérea para *Bombacopsis quinata* en las plantaciones evaluadas por rango de edad y calidad de sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

Edad	Sitio	Carbono fijado en fustes (tm/ha/año)	Carbono fijado en biomasa (tm/ha/año)
5	A	2.39	2.63
	B	1.30	1.43
8	A	2.16	2.38
	B	1.20	1.32
15	C	0.83	0.91

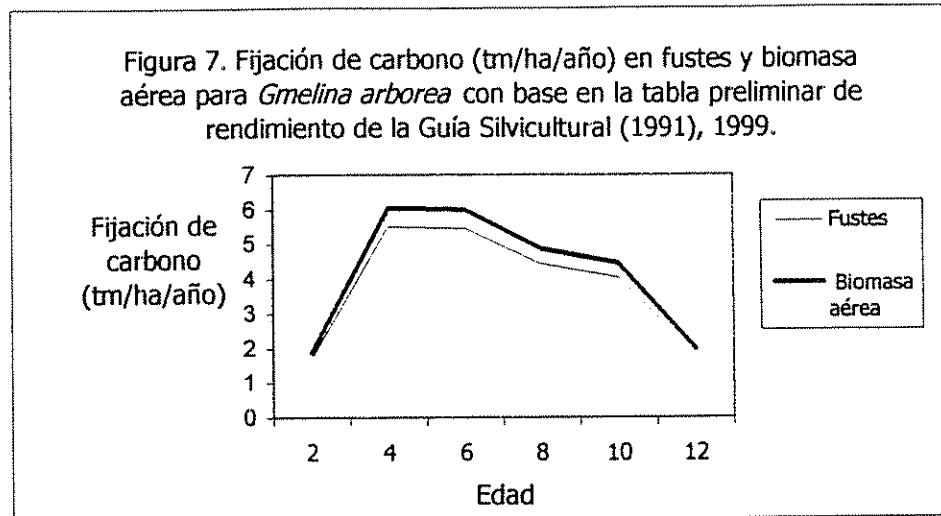
*Muestra insuficiente para determinar el carbono fijado.

Cuadro 25. Contribución a la mitigación de CO₂ de la atmósfera mediante el área plantada en el período 79-97, de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica, 1999.

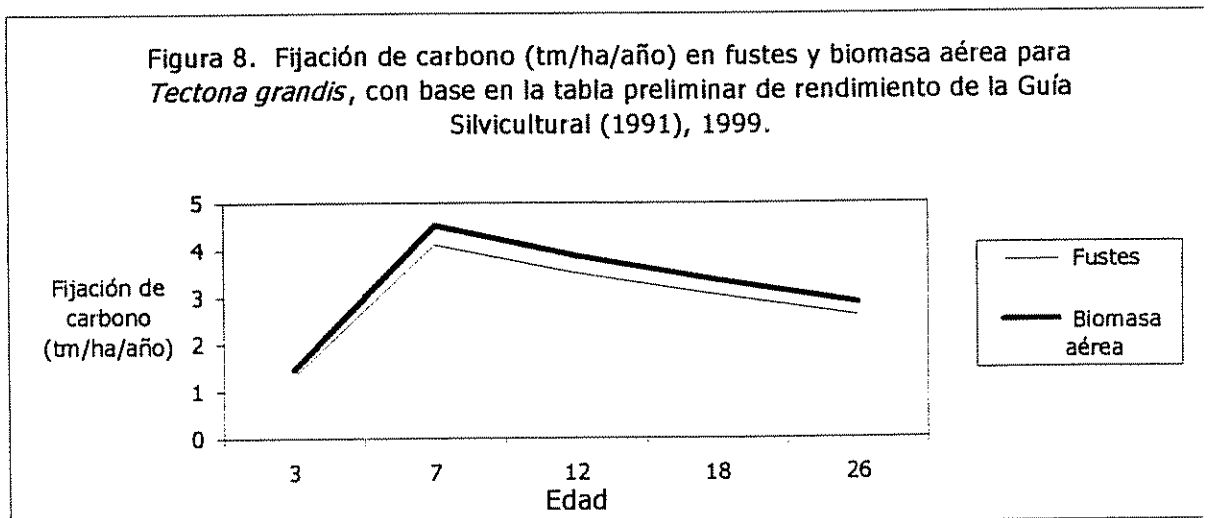
Especie	Tasa promedio de fijación (tm/ha/año)	C almacenado en fuste a la edad de corta (tm/ha)	Área total plantada (ha)	C almacenado a la edad de corta (tm C)	CO ₂ absorbido de la atmósfera (tm CO ₂)
<i>Gmelina arborea</i>	2.26	31.64	49 274.9	1 559 057.8	5 721 742.1
<i>Tectona grandis</i>	2.70	64.8	23 475.4	1 521 205.9	5 582 825.7
<i>Bombacopsis quinata</i>	1.58	47.4	17 020.7	806 781.2	2 960 887.0
TOTAL			89 771	3 387 044.9	14 265 454.8

4.6 Carbono fijado en plantaciones forestales de acuerdo a las tablas preliminares de rendimiento para cada especie.

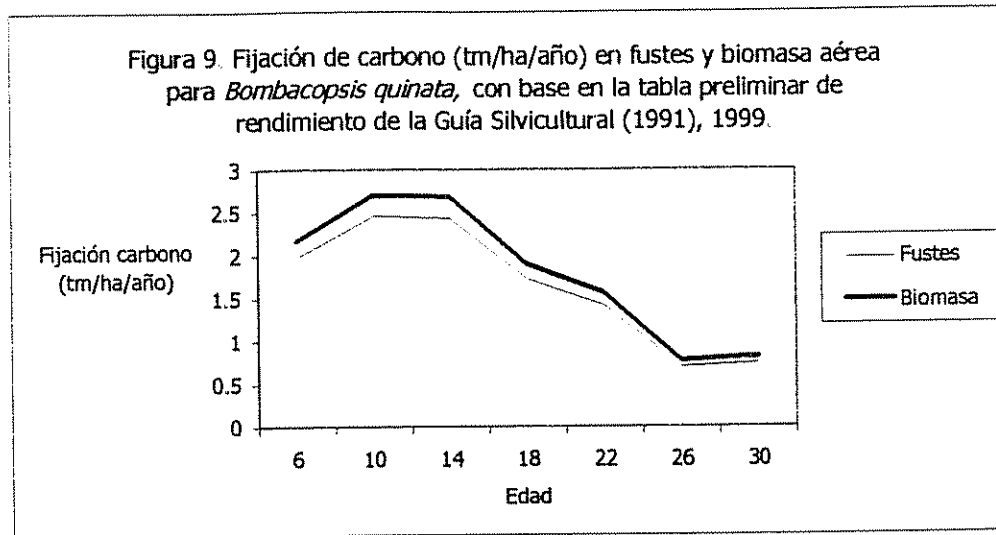
La Figura 7 muestra la fijación de carbono de una plantación forestal de *Gmelina arborea* en un sitio A (IS =28), para fustes y biomasa aérea hasta la edad de corta estimada.



La Figura 8 muestra la fijación de carbono de una plantación forestal de *Tectona grandis* en un sitio A (Clase I) para fustes y biomasa aérea hasta la edad de corta estimada.



La Figura 9 muestra la fijación de carbono de una plantación forestal de *Bombacopsis quinata* en un sitio A (IS = 18-20) para fustes y biomasa aérea hasta la edad de corta estimada.



4.7 Análisis Financiero

En el siguiente apartado se presentan los indicadores financieros para cada especie considerando los cinco escenarios evaluados, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), con una tasa de actualización de 12% para las especies del estudio.

EL cuadro 26 muestra la actualización de los datos de Gómez y Reiche (1996), indexando un 10 % anual por concepto de alza en el costo de la vida, promedio desde 1996 hasta 1999.

Cuadro 26. Costos de establecimiento y manejo para plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinata* para el año de establecimiento y los cinco primeros años de mantenimiento para el año 1999.

Costos	<i>Gmelina arborea</i> (\$/ha)	<i>Tectona grandis</i> (\$/ha)	<i>Bombacopsis quinata</i> (\$/ha)
Preparación de Terreno	98.94	102.16	111.80
Plantación	148.17	144.76	177.74
Mantenimiento	127.29	111.06	180.33
Protección	21.40	20.49	16.14
Tratamientos	36.42	36.42	30.18
Aprovechamiento	40.11	40.11	40.11
Asistencia técnica	13.59	13.59	13.59
Cargas Sociales	63.27	63.27	63.28
Administración	53.14	53.14	53.15
Mantenimiento 2	99.71	83.72	131.33
Mantenimiento 3	70.26	57.50	91.39
Mantenimiento 4	70.26	57.50	91.39
Mantenimiento 5	70.26	57.50	91.39
Poda	24.07	26.82	5.96
Raleo	27.93	20.86	24.08
Jornal	5.84	5.96	27.94

1 \$ = ₡ 274.22 al momento del cálculo

Para el cálculo de los ingresos de las plantaciones forestales, se tomó en cuenta los beneficios que provienen de la producción de madera de las plantaciones, producto de la venta de raleos y la cosecha final, a precios del mercado nacional (Cuadro 27), tomando como referencia la información del Anexo 14. Para *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* los precios de los raleos para cada especie se obtuvieron descontando un 35 % del precio de corta final (Zamora, 1999). Para *Gmelina arborea* se usó el precio del mercado actual.

La madera de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* que se comercializa en el mercado nacional proviene de los raleos comerciales. Hasta 1998 no se habían realizado cortas finales en la mayor parte de los proyectos. Para *Bombacopsis quinata* el precio en el mercado para la corta final corresponde al de la madera proveniente de bosque natural (Alfaro 1999).

Cuadro 27. Precios ($\$/m^3$) de madera en pie de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* 1999.

Especie	Primer raleo ($\$/m^3$)	Segundo raleo ($\$/m^3$)	Tercer raleo ($\$/m^3$)	Corta final ($\$/m^3$)
<i>Gmelina arborea</i>	9.24	9.24	15.84	21.12
<i>Tectona grandis</i>	48.45	74.59	114.85	114.85
<i>Bombacopsis quinata</i>	28.38	44.49	67.33	67.33

1\$= ¢ 274.22 al momento del cálculo

Fuente: Anexo 14

El ingreso por concepto de la venta del servicio de fijación de carbono a \$10 y \$5 tm C, se introduce anualmente, tomando en cuenta los incrementos medios anuales (IMA) de las plantaciones y la fracción de carbono determinada en el presente estudio, para los rangos de edad seleccionados.

En el cuadro 28 se presentan los valores actuales netos, tasa interna de retorno para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, en el anexo 15, 16 y 17 se detalla por especie

Cuadro 28. Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VAN) para plantaciones forestales con *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, para los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, 1998.

Indicadores	Escenarios	Especies		
		<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Bombacopsis quinata</i>
TIR	1. Ingresos por la venta de madera	15.4%	18%	9.2%
	2. Ingreso por venta de madera + C fijado en fustes a \$5 tm	16.7%	18.8%	9.6%
	3. Ingreso por venta de madera + C fijado en biomasa aérea a \$5 tm	16.8%	18.8%	9.7%
	4. Ingreso por venta de madera + C fijado en fustes a \$10 tm	18.1%	19.6%	10.1%
	5. Ingreso por venta de madera + C fijado en biomasa aérea a \$10 tm	18.3%	19.7%	10.2%

Continuación del cuadro 28

VAN (12%)	1. Ingresos por la venta de madera	\$363.02	\$1,345.44	(\$483.17)
	2. Ingreso por venta de madera + C fijado en fustes a \$5 tm	\$490.19	\$1,460.31	(\$396.00)
	3. Ingreso por venta de madera + C fijado en biomasa aérea a \$5 tm	\$502.75	\$1,471.80	(\$387.28)
	4. Ingreso por venta de madera + C fijado en fustes a \$10 tm	\$617.36	\$1,575.18	(\$308.83)
	5. Ingreso por venta de madera + C fijado en biomasa aérea a \$10 tm	\$642.48	\$1,598.03	(\$291.39)

Como se observa en el cuadro 28 los ingresos por carbono fijado aumentan de dos a tres puntos la TIR, para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* respectivamente, en *Bombacopsis quinata* el aumento es de un punto, para esta especie no se alcanza la rentabilidad mínima del 12%.

V Discusión

El método de calorimetría provee un valor confiable para la fracción de carbono obtenida en esta investigación para las tres especies del estudio, donde *Gmelina arborea* presentó una fracción mayor (0.36), con respecto a la obtenida en *Tectona grandis* (0.35) y *Bombacopsis quinata* (0.35).

La fracción de carbono para *Gmelina arborea* es diferente entre sitios A y B a una probabilidad de 0.0115 en las dos primeras edades, lo que indica que la fracción de carbono se ve influenciada por la calidad del sitio, en la última edad no se encontró clasificación de sitios A por lo que no se pudo realizar la comparación de la fracción de carbono obtenida para esta edad.

El análisis estadístico realizado para *Tectona grandis* demostró que no hay diferencias entre las calidades de sitio A y B a una misma edad, a una probabilidad de 0.4545. Para las tres edades, si hay diferencias a una probabilidad de 0.0025, por lo que la calidad de sitio no influye en la fracción de carbono para la misma.

Para *Bombacopsis quinata* no se pudo comparar entre sitios de diferente productividad debido a que las muestras representativas de los sitios B fueron insuficientes para el análisis de laboratorio, lo cual fue una limitante en el estudio. En el caso de esta especie se obtuvo información de sitios de bajo rendimiento, clasificados como (C) el cual se incluyó dado que para el rango de edad correspondiente no se ubicaron plantaciones de sitios clasificados como A y B.

La fracción de carbono obtenida en esta investigación para las especies *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinata*, y el resultado del estudio realizado por Segura (1997), en un Bosque de altura en la Cordillera de

Talamanca en *Quercus costaricensis*, de 0.43, difieren con el valor de 0.5 sugerido por el IPCC.

El valor de 0.5 sugerido por el IPCC no refleja las características de la gran variedad de especies que existen en el planeta, por ser este un promedio que se aplica a un conjunto de especies muy amplio. Tanto el estudio de Segura (1997) como los resultados de esta investigación presentan valores menores. Esto podría explicarse si se conociera el procedimiento para el cálculo del valor que utiliza el IPCC.

La cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones al momento de la evaluación para *Gmelina arborea* en el sitio A, a los 4 años es de 11.95 (tm C/ha), el sitio B reporta 3.30 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 13.14 (tm C/ha) y el sitio B 3.63 (tm C/ha). A los 8 años el sitio A almacena en fustes 36.53 (tm C/ha) y el sitio B 16.18 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 40.18 (tm C/ha) y el sitio B 17.8 (tm C/ha). Para la edad de 10-12 años el sitio B almacena 18.92 (tm C/ha), y en biomasa aérea 20.81 (tm C/ha).

La cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones al momento de la evaluación para *Tectona grandis* a los 5 años en el sitio A fue de 16.47 (tm C/ha), el sitio B reportó 7.17 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 18.11 (tm C/ha) y el sitio B 7.88 (tm C/ha). A la edad de 8 años el sitio A almacena en fustes 22.56 (tm C/ha) y el sitio B 25.61 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 24.81 (tm C/ha) y el sitio B 28.17 (tm C/ha). Para la edad de 12 años el sitio A almacena en fustes 34.47 (tm C/ha) y el sitio B almacena 30.70 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 37.92 (tm C/ha) y el sitio B 33.77 (tm C/ha).

La cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones al momento de la evaluación para *Bombacopsis quinata* a la edad de 5 años edad en el sitio A

fue de 11.95 (tm C/ha), en biomasa aérea el sitio A almacena 13.15 (tm C/ha). A los 8 años el sitio A almacena en fustes 17.31 (tm C/ha) en biomasa aérea el sitio A almacena 19.04 (tm C/ha). Para la edad de 15 años la clasificación de sitio C, no se determinó por ser un sitio de bajo rendimiento.

La tasa de fijación de carbono en fustes en las plantaciones evaluadas de *Gmelina arborea* a los 4 años en el sitio A fue de 2.99 (tm C/ha/año), el sitio B reporta 0.83 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 3.29 (tm C/ha/año) y el sitio B 0.91 (tm C/ha/año). A los 8 años el sitio A fija en fustes 4.57 (tm C/ha/año) y el sitio B 2.02 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 5.02 (tm C/ha/año) y el sitio B 2.22 (tm C/ha/año). Para la edad de 10-12 años el sitio B almacena 1.58 (tm C/ha/año), y en biomasa aérea 1.73 (tm C/ha/año).

La tasa de fijación de carbono en fustes en las plantaciones evaluadas de *Tectona grandis* a los 5 años en el sitio A fue de 3.29 (tm C/ha/año), el sitio B reportó 1.43 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 3.62 (tm C/ha/año) y el sitio B 1.58 (tm C/ha/año). A la edad de 8 años el sitio A fija en fustes 2.82 (tm C/ha/año) y el sitio B 3.20 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 3.10 (tm C/ha/año) y el sitio B 3.52 (tm C/ha/año). Para la edad de 12 años el sitio A fija en fustes 2.87 (tm C/ha/año) y el sitio B 2.56 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 3.16 (tm C/ha/año) y el sitio B 2.81 (tm C/ha/año).

La tasa de fijación de carbono en fustes en las plantaciones evaluadas de *Bombacopsis quinata* a los 5 años en el sitio A fue de 2.39 (tm C/ha/año), en biomasa aérea el sitio A fija 2.63 (tm C/ha/año). A los 8 años el sitio A fija en fustes 2.16 (tm C/ha/año) en biomasa aérea (fustes y follaje) el sitio A almacena 2.38 (tm C/ha/año).

El incremento en el carbono almacenado y fijado en biomasa aérea es ligeramente superior en un 10% al determinado en fustes, esto debido al factor

de expansión, el cual considera la biomasa en ramas y follaje, para plantaciones que se utilizó en esta investigación. Esto debido a que no se contó con información en biomasa que incluya ramas y follaje de las especies seleccionadas. Valor que podría variar con respecto al utilizado.

Las tasa de fijación en fustes promedio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, obtenidas en la presente investigación son en algunos casos hasta un 50 % menor que las reportadas en la literatura citada, por el Instituto para la Silvicultura e Investigación Natural (FACE), en plantaciones de *Pinus caribaea*, *Pinus elliotii* en Brasil y Venezuela las que consideran biomasa total.

La cantidad de carbono almacenado en *Gmelina arborea*, en el fuste a la edad estimada de corta de 14 años, con una tasa promedio de fijación de 2.26, es de 31.64 (tm/ha), un 47% menor que el carbono almacenado en una plantación de *Pinus caribaea* con una rotación de 15 años.

El carbono almacenado en *Tectona grandis* en el fuste con una tasa promedio de 2.70 (tm C /ha/año) a la edad estimada de corta de 24 años, es de 64.8 (tm C/ha), menor que la reportada en *Pinus caribaea* en el centro y norte de Suramérica de 89 tm C/ha a una rotación de 25 años.

En el caso de *Bombacopsis quinata* con una edad estimada de corta de 30 años la cantidad de carbono almacenado es de 47.4 tm C/ha, muy por debajo de el carbono almacenado por *Pinus elliotii* en Brasil en rotaciones de 30 años con 111 tm C/ha, aunque este valor contiene lo que esta almacenado en la biomasa total.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran como varían las cantidades de carbono fijado a lo largo del ciclo de producción para cada especie, las tasas de fijación cambian con cada especie, se comportan diferente en cada sitio según la productividad y el

sistema de manejo. El pago por el servicio de fijación de carbono en plantaciones bajo este esquema sería un sistema muy complejo y poco práctico debido a todas estas variables que habría que tomar en cuenta. Dada la complejidad de un pago diferenciado, un pago anual uniforme para todas las especies facilita la operación del sistema de pago por el servicio de fijación de carbono.

La tasa de fijación de carbono y la cantidad de carbono almacenado en una plantación esta en relación directa con el incremento en la biomasa. La aplicación de un paquete tecnológico basado en una adecuada selección de los sitios, la utilización de material de calidad (genéticamente mejorado) y un adecuado manejo silvicultural (podas y raleos), optimizan la producción logrando mayores rendimientos y por lo tanto mayores tasas de fijación y carbono almacenado.

Debido al desarrollo de estos paquetes tecnológicos en Costa Rica, las nuevas plantaciones de estas especies contarán con mejores rendimientos que las efectuadas a finales de los años 80 y principios de los 90, aumentando las estimaciones de fijación y almacenamiento previstas en la presente investigación.

En cuanto a los indicadores financieros, se obtuvo que la Tasa Interna de Retorno (TIR) para *Gmelina arborea* aumenta en tres puntos para los escenarios 4 y 5 con respecto a la obtenida en el escenario 1, en los escenarios 2 y 3 este indicador aumenta dos puntos. El Valor Actual Neto (VAN) para el escenario 1 es de \$363.02 y aumenta a \$642.48 en el escenario 5 siendo este el más favorable.

Tectona grandis mostró una Tasa Interna de Retorno (TIR) que aumenta en dos puntos para los escenarios 4 y 5 con respecto a la obtenida en el escenario 1, en los escenarios 2 y 3 este indicador aumenta un punto, manteniéndose entre 18 y 20 %. El Valor Actual Neto (VAN) varía en el escenario 1 de \$ 1345.44 hasta \$ 1598.03 en el escenario 5.

En *Bombacopsis quinata* la Tasa Interna de Retorno (TIR) varía un punto en el escenario 1 con respecto a los restantes escenarios, el Valor Actual Neto (VAN) en los 5 diferentes escenarios genera valores negativos, se nota una reducción en los valores de \$ 191.87 del escenario 1 al 5, estos resultados en el VAN obedecen a la incertidumbre en el precio del producto proveniente de plantación y lo extenso del período de corta final.

En los escenarios donde se incluye un mismo valor para la tonelada de carbono (escenarios 2 y 3, 4 y 5) la Tasa Interna de Retorno (TIR) es igual en biomasa de fustes y biomasa de fustes incluyendo ramas y follaje, las diferencias en la TIR se notan cuando se varía el valor de la tonelada de carbono.

VI Conclusiones y Recomendaciones

1. La fracción de carbono determinada en las plantaciones forestales evaluadas por rango de edad y sitio mostró que los sitios clasificados como A (buenos) reportaron fracciones más altas con respecto a los sitios B (promedio).
2. La fracción de carbono determinada por el método de calorimetría en la presente investigación varía por rango de edad, fracción que presenta una tendencia a incrementar conforme aumenta la edad para las especies.
3. El carbono almacenado y fijado en el fuste y biomasa aérea (ramas y follaje) para las tres especies evaluadas varía de acuerdo al sitio y edad de las plantaciones.
4. Las plantaciones forestales son sumideros de dióxido de carbono atmosférico debido a su capacidad de almacenar y conservar el mismo durante la longitud del período de producción, la utilización de dichos ecosistemas es más eficaz cuando su producto final, la madera es transformada en productos duraderos.
5. La inclusión del pago por el servicio de fijación de carbono en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* incrementa un 18.8 % la Tasa Interna de Retorno (TIR) con respecto al ingreso por la venta de la madera. El Valor Actual Neto (VAN) aumenta en un 77 %.
6. La inclusión del pago por el servicio de fijación de carbono en plantaciones forestales de *Tectona grandis* incrementa un 9.4 % la Tasa Interna de Retorno (TIR) con respecto al ingreso por la venta de la madera. El Valor Actual Neto (VAN) aumenta en un 18.8 %.

7. La inclusión del pago por el servicio de fijación de carbono en plantaciones forestales de *Bombacopsis quinata* incrementa un 10.9 % la Tasa Interna de Retorno (TIR) con respecto al ingreso por la venta de la madera. A pesar de ese aumento en la TIR el Valor Actual Neto (VAN) se mantiene negativo aunque la pérdida neta es menor.
8. La inclusión de la biomasa aérea (ramas y follaje) en el pago por fijación de carbono, para las tres especies no produce una diferencia económicamente significativa, con respecto a la fijación en fustes ya que en ambos se presenta la misma Tasa Interna de Retorno (TIR).
9. Los beneficios por la venta del servicio de fijación de carbono que obtiene el reforestador son un aporte al flujo de caja, que va de 4.15 \$/ha/año a 45.7 \$/ha/año, dependiendo de la especie, convirtiéndose así este pago en un complemento para el mantenimiento de la plantación durante los años previos al período de turno o corta final.
10. Se recomienda realizar estudios de biomasa en plantaciones forestales que incluya biomasa en follaje, ramas y raíces de las especies estudiadas con el propósito de obtener resultados más precisos.
11. Se recomienda evaluar plantaciones en edad de corta final para *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* con el fin de determinar el comportamiento de la fracción de carbono a mayores edades que las evaluadas.
12. Se recomienda que el uso de la madera proveniente de plantaciones forestales sea destinado a productos duraderos, de uso de largo plazo, como para la construcción y mueblería, reteniendo de esta manera el C durante períodos más prolongados después del aprovechamiento, logrando de esta

forma que estos ecosistemas forestales se conviertan en sistemas de fijación y almacenamiento continuos.

13. El gobierno costarricense debe incrementar el área anual a establecer en plantaciones forestales para mantener un stock disponible de C para la venta, si pretende ingresar y mantener un rol activo dentro de las negociaciones internacionales mediante la comercialización del servicio de fijación de carbono que brindan estos ecosistemas.

VII Bibliografía

- Alfaro, M. 1997 a. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. *Revista Forestal Centroamericana*. 19: 9-12.
- Alfaro, M. 1997 b. ¿Cómo cuantificar el carbono fijado en los proyectos de Implementación Conjunta?. *AMBIEN-TICO*. Costa Rica. 53: 5 – 10
- Alfaro, M. 1999. Comunicación Personal. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Alfaro, M; Reiche, C. 1997. Uso de la tierra en Costa Rica, El sector forestal costarricense. En: *Estado de la Nación*. San José, Costa Rica.
- Andrasko, K. 1990. El Recalentamiento del Globo Terráqueo y los Bosques: estado actual de los conocimientos. *UNASYLVA*, 41 (163): 3 – 9
- ASTM. 1973. Standard for bomb calorimetry and combustion methods. Standard K 20.19. American National Standad Institute. St, Moline Illionois. pp: 8-13
- Bonilla, L. 1999. Comunicación Personal, Centro Agrícola Cantonal de Santa Cruz.
- Bolaños, R.; Watson, V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica, según el sistema de clasificación de Zonas de Vida del Mundo de L.R. Holdridge. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica. Escala 1:200 000.
- Brown, S. 1996. Papel actual y potencial de los bosques en el debate mundial sobre el cambio climático. *UNASYLVA* 185 (47): 3 – 10.
- Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. En: *Memorias Congreso Mundial Forestal*, Antalya, Turquía. Pp 110-116

- Brown, T. Y Leway, E. 1987. Química. La Ciencia Central. Tercera edición. Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A. México. Pp 898.
- Burbano, S.s.f Manual para la estimación del volumen comercial en pie de las plantaciones de *Gmelina arborea Roxb.* COSEFORMA. Pp 3-5
- Camacho, P. 1997. Ecuaciones de volumen preliminares para *Tectona grandis*. Tercer Congreso Forestal Nacional: Unidos por el Desarrollo del Recurso Forestal: ante el próximo milenio. San José, Costa Rica. 27,28,29 de agosto de 1997. pp 131-133
- Cámara Costarricense Forestal, 1998. Desde el Bosque N° 4. Pp 30
- Carpio, M. 1992. Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales. I edición. Editorial Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. Pp 211 – 212.
- Carranza, C.; Aylward, B.; Echeverría, J.; Tosi, J.; Mejías, R. 1996. Valoración de los Servicios Ambientales de los Bosques de Costa Rica. Centro Científico Tropical. San José, Costa Rica. Pp 20-26
- CATIE, 1991. Pochote: *Bombacopsis quinatum* Jacq. Dugand, especies de árbol de uso múltiple en América Central. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica: pp 27 - 31
- Centeno, J. 1992. El efecto Invernadero. PLANIUC. 18-19: pp 75-96.
- Ciesla, W. 1996. Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. Pp 16-27
- Costa Rica, 1996. Ley Forestal. I edición. San José, Costa Rica.

- Chaves, E.; Fonseca, W. 1991. Teca (*Tectona grandis L.f.*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica. CATIE, Turrialba. Pp 1 – 38
- Chinchilla, E. 1987. Atlas Cantonal de Costa Rica. I edición. Instituto de Fomento y Asesoría Municipal. San José, Costa Rica. pp 248-251, 257-260, 295-298.
- Eduarte, E.; Segura, M. 1998. Determinación de carbono utilizando la calorimetría (Nota técnica). En: Ciencias Ambientales. 15:54-55.
- FAO. 1995. Evaluación de los recursos forestales en los países tropicales 1990. Roma, Italia. 1995. Pp 112 – 114.
- Fernández, W. 1991. Cambios climáticos: el calentamiento global. Tecnología en Marcha, 11 (2): 11 – 22.
- Gómez, M.; Reiche, C. 1996. Costos de Establecimiento y Manejo de Plantaciones Forestales y Sistemas Agroforestales en Costa Rica. CATIE, Turrialba. 50 p
- Houghton, R.; Woodwell, G. 1989. Cambio Climático Global. Investigación y Ciencia 153. Pp 8 – 17.
- Instituto Meteorológico Nacional, 1999. Gestión de información y comercialización. Promedios mensuales de datos climáticos. Estaciones Nicoya, Nosara y Garza (FERCO).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. México city, 11 – 13 september 1996. Pp 17 – 18.

- Jiménez, S. 1999. Comunicación Personal. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- MIRENEM/ IMN. 1995. Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases con efecto invernadero en Costa Rica. Proyecto GF/4102-92-42 (PP/3011). República de Costa Rica. Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. Pp 25 – 26.
- Murillo, O.; Valerio, J. 1991. Melina (*Gmelina arborea Roxb.*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Pp 1 - 64
- Ministerio de Ambiente y Energía. 1996. Información Estadística Relevante sobre el Sector Forestal 1972 – 1995. Estudio Preliminar sobre Captura de CO₂ por parte de seis empresas miembros de CONASE. SINAC, San José, 1996. Internet.
- Nabuurs, G.; Mohren, G. 1993. Carbon Fixation Through Forestation Activities. A study of the carbon sequestering potential of selected forest types, commissioned by the Foundation Face. Face /Institute for Forestry and Nature Research (IBN – DLO). Arnhem, Wageningen, The Netherlands. Pp 117 –134.
- Navarro, C. 1985. Producción de Biomasa de *Eucalyptus deglupta* en una plantación de 8 años en Turrialba, Costa Rica. Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía. CATIE – ROCAP Silvoenergía N° 8. Turrialba, Costa Rica.
- Navarro, C. 1998. El pochote (*Bombacopsis quinatum*) en Costa Rica: guía silvicultural para el establecimiento de plantaciones. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba , Costa Rica: pp 25

- PNUD. 1997. Protocolo de Kyoto para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Pp 2 – 4.
- Quirós, R. 1998. Proyecto de reforestación comercial Bosque Puerto Carrillo, Puerto Carrillo y Nandayure, Guanacaste, Costa Rica. Recursos Naturales Tropicales S.A. San José, Costa Rica. Pp 1 - 6
- Sawyer, J. 1993. Climate Change and Plantations. Plantations in The Tropics Enviromental Concerns. The IUCN Forest Conservation Programme. IUCN/UNEP/WWF. Surre, UK. Pp 47 – 53.
- Schroeder, P.; Dixon, R.; Winjum, J. 1993. Ordenación forestal y agrosilvicultura para reducir el dióxido de carbono atmosférico. UNASYLVA 44 (173): pp 52 - 60.
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis* en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Pp 55 – 56.
- Vásquez, A. 1989. Cartografía y clasificación de suelos. Informe preparado para el Gobierno de Costa Rica por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Programa de Cooperación FAO/Italia. Roma, 1989.
- Vásquez, C. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Turrialba, C.R: CATIE. Pp 2-5.

Viquez, E. 1997. Programa de mejoramiento genético de *Tectona grandis*, Precious Woods - Costa Rica. Programa de Investigación Forestal Precious Woods. III Congreso Forestal Centroamericano San José, Costa Rica. 15, 16 y 17 de setiembre de 1997. Pp 108 – 110.

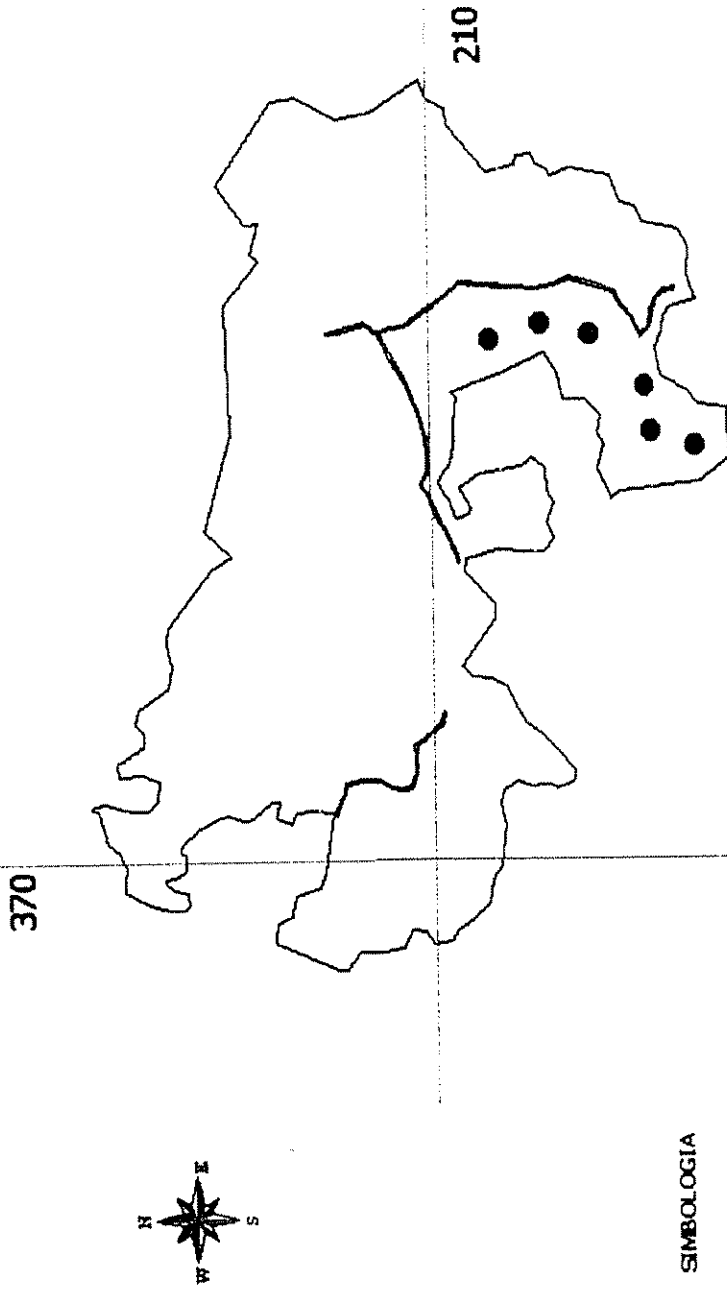
Viquez, M. 1999. Comunicación personal, Sistema de Información Forestal JUNAFORCA.

Zamora, N. 1999. Comunicación personal. Cámara Costarricense Forestal.

VIII Anexos

Anexo 1

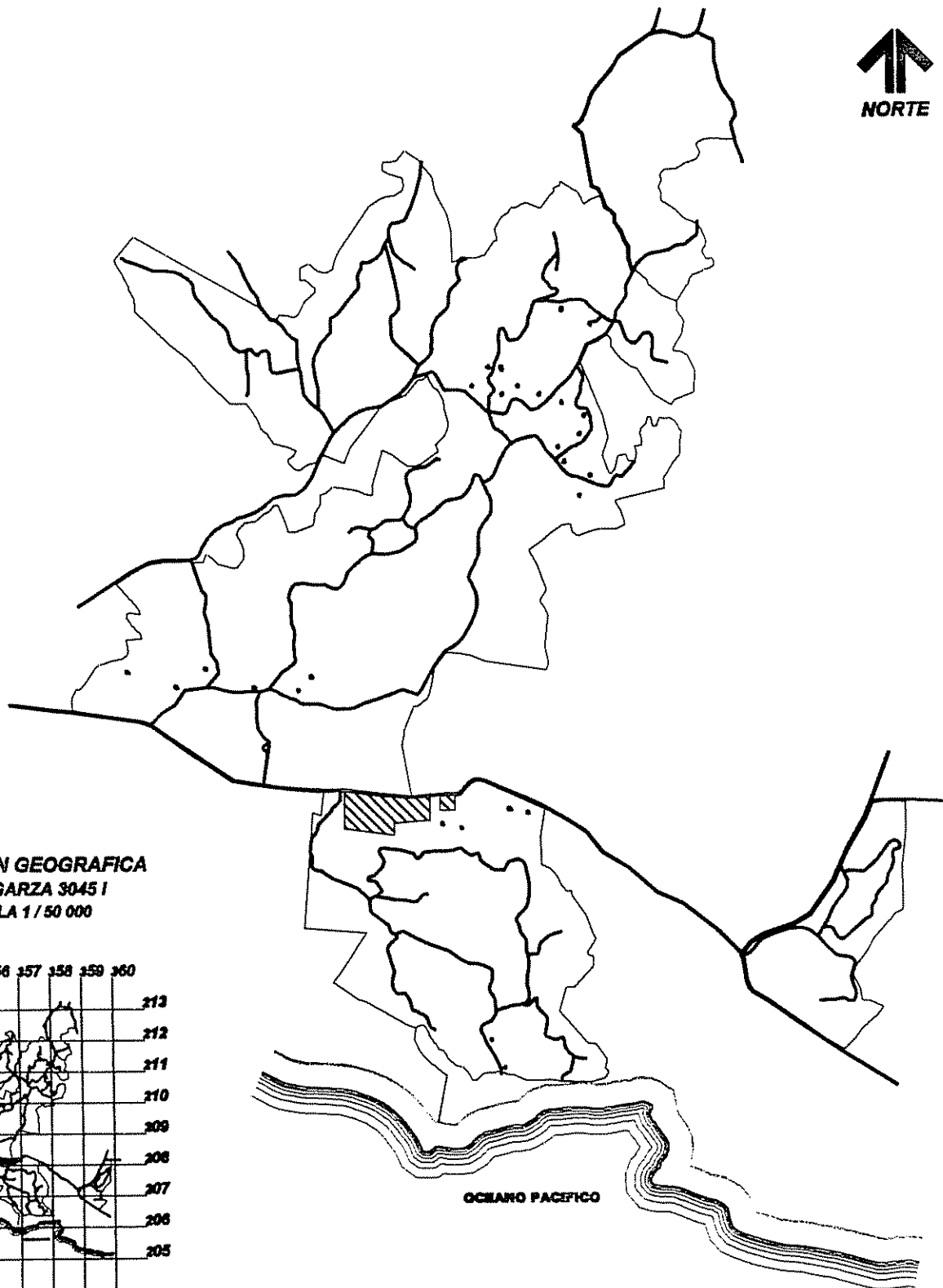
Mapa de ubicacion de parcelas temporales de muestreo, Bosques Puerto Carrillo, Peninsula de Nicoya, Guanacaste, 1998



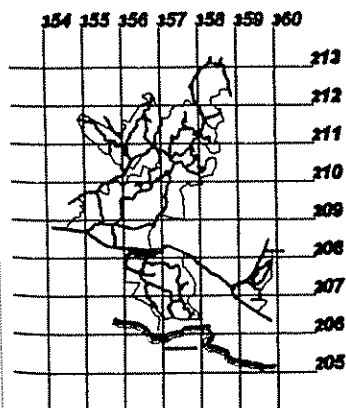
UBICACION GEOGRAFICA HOJAS: GARZA 3D45 I CERRO AZUL 3I45 IV	Proyecto Bosques Puerto Carrillo Bloque Puerto Carrillo	Elaborado e Impreso por: Ing. Gilmar Navarrete Chacon
ESCALA: 1/50 000	FECHA: SETIEMBRE 1998	

Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo.

Garza (Precious Woods S.A.)
Península de Nicoya, Guanacaste, 1998



UBICACION GEOGRAFICA
HOJA GARZA 3045 I
ESCALA 1 / 50 000



SIMBOLOGIA:

PARCELAS TEMPORALES DE MEDICION
POCHOTE
PARCELAS TEMPORALES DE MEDICION TECA

LINEA DE PLEAMAR

PARCELAS PERMANENTES DE MEDICION

DESARROLLO FORESTAL GARZA PARCELAS TEMPORALES DE MEDICION

AREA TOTAL: 1185.38 ha.

ESCALA: 1 / 48 000

FECHA: SEPTIEMBRE 1998

PREPARADO POR:

ERIC ESPINOZA G.

INFORMACION BASE:

ERIC ESPINOZA G.

LEVANTO:




ERIC ESPINOZA G.

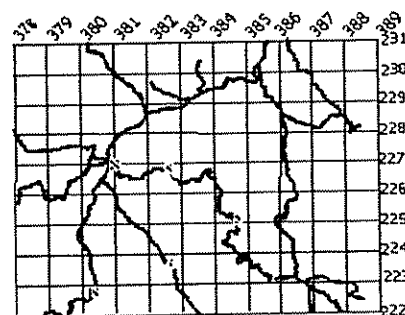
Anexo 3

Mapa de ubicacion de parcelas temporales de muestreo de Hojancha, Peninsula de Nicoya, Guanacaste, 1998.



Simbología

-  Poblaciones
-  Parcelas temporales de medición de Melina
-  Carreteras

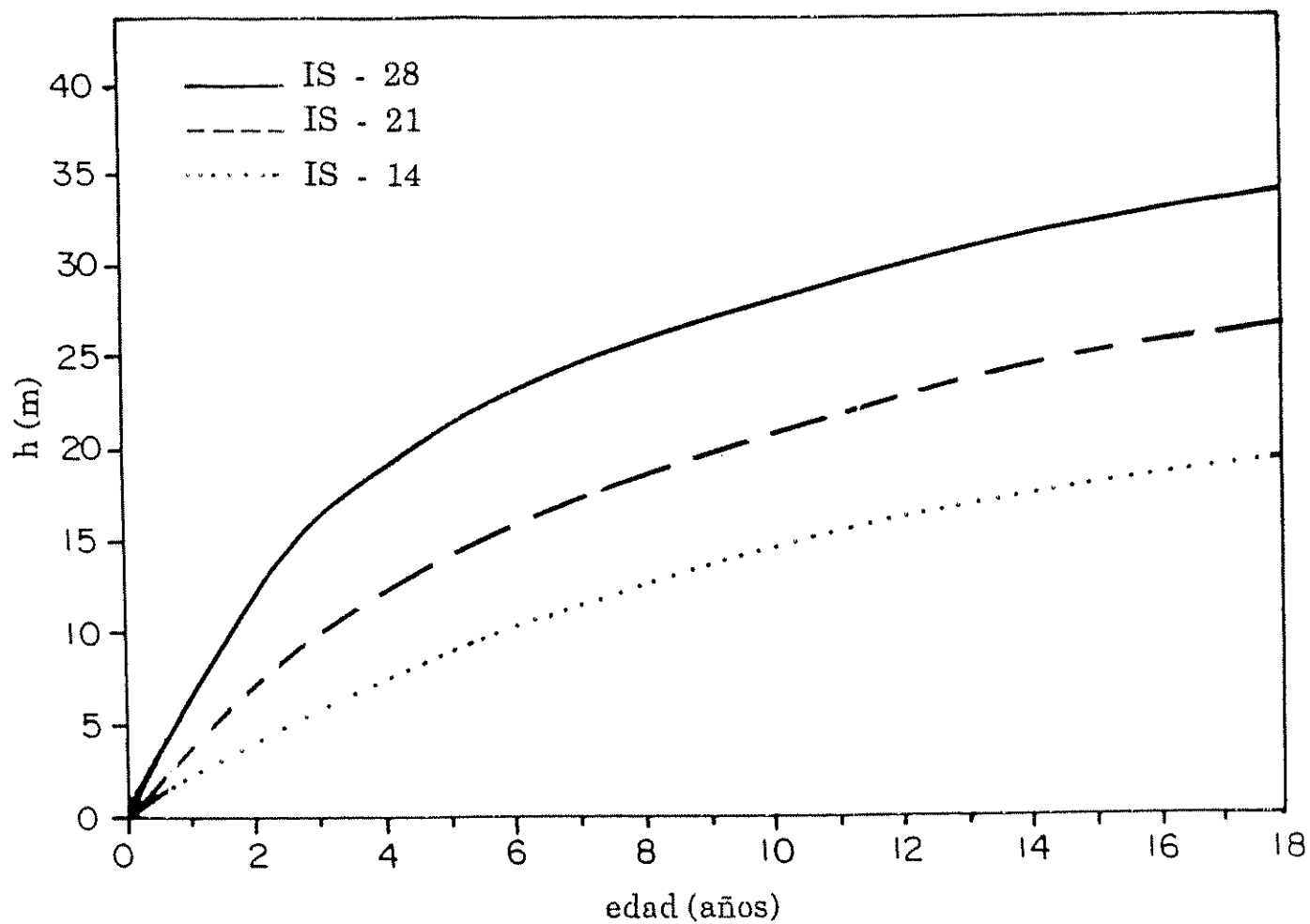


1:200000

UBICACION GEOGRAFICA HOJA MATAMBU 3146 III	Proyectos de Reforestacion del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha	Elaborado e impreso por: Ing. Gilmar Navarrete Chacon
Escala: 1/50 000	Fecha: Marzo 1999	

Anexo 4

Curvas de crecimiento en altura total dominante, de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb, para tres índices de sitio en América Central (Murillo,1991).



Anexo 5

Tabla preliminar de rendimiento para *Tectona grandis* L.f. en Trinidad (Chaves, 1991).

	Rodal principal						Raleo			Producción Total		Incremento				
	Edad	No de árboles	H (m)	DAP (cm)	AH (m ² /ha)	Vcc (m ³ /ha)		No de árboles	DAP (cm)	Vcc (m ³ /ha)		AD (m ² /ha)	Vcc B (cm)	ICA AB (m ² /ha)	ICA Vcc 8cm (m ³ /ha/año)	IMA Vcc 8cm (m ³ /ha/año)
						H (cm)	23 (cm)			H (cm)	23 (cm)					
C L A S E	0	2196	-	-	-	-	-	(1208)	6	9	-	11	18	0.6	6	6
	3	988	8	9	6	9	(1208)	6	9	-	11	18	3.2	18	13	
	7	494	16	17	12	51	-	494	14	27	-	23	1.6	13	13	
	12	269	20	24	14	85	-	198	20	35	-	32	1.6	11	12	
	15	183	22	32	14	107	47	111	26	45	9	38	2.3	9	11	
	26	118	23	40	15	126	87	67	34	57	36	44	2.9	0.8	9	11
	37	76	25	49	15	135	110	42	43	57	43	51	3.65	0.6	6	10
	49	76	26	56	19	183	159	-	-	-	-	55	4.1	0.4	4	8
	65	76	26	62	23	226	201	-	-	-	-	59	4.6	0.3	3	7
	80	76	27	65	26	249	224	-	-	-	-	62	4.79	0.2	2	6
C L A S E	0	2196	-	-	-	-	-	(1208)	6	9	-	11	22	2.7	6	6
	3.5	988	8	9	7	13	-	(1208)	6	9	-	11	2.2	6	6	
	9	494	15	17	12	51	-	494	14	29	-	23	8.9	1.1	10	
	17	296	18	24	13	83	-	198	20	35	-	32	1.6	1.0	9	
	24	183	20	31	14	99	39	111	27	41	5	38	2.1	0.8	7	
	36	118	22	39	14	113	74	67	34	49	27	44	2.76	0.6	6	
	49	118	23	45	19	159	120	-	-	-	-	49	3.2	0.3	3	
	65	118	23	49	22	191	152	-	-	-	-	53	3.5	0.2	2	
	80	118	23	51	24	211	173	-	-	-	-	55	3.74	0.1	1	
	C L A S E	0	2196	-	-	-	-	-	(1208)	7	11	-	12	27	2.6	6
4.5		988	8	10	7	16	-	(1208)	7	11	-	12	2.7	6	6	
12		494	13	17	11	46	-	494	14	28	-	23	8.5	1.5	7	
21		296	16	24	11	71	-	198	20	28	-	32	1.8	0.9	7	
31		183	18	31	14	90	39	111	27	40	4	38	1.88	0.6	5	
43		145	20	37	20	144	65	-	-	-	-	44	2.1	0.4	3	
59		145	20	40	22	165	105	-	-	-	-	47	2.72	0.1	1	
80		145	20	40	21	176	116	-	-	-	-	48	2.83	0.1	1	

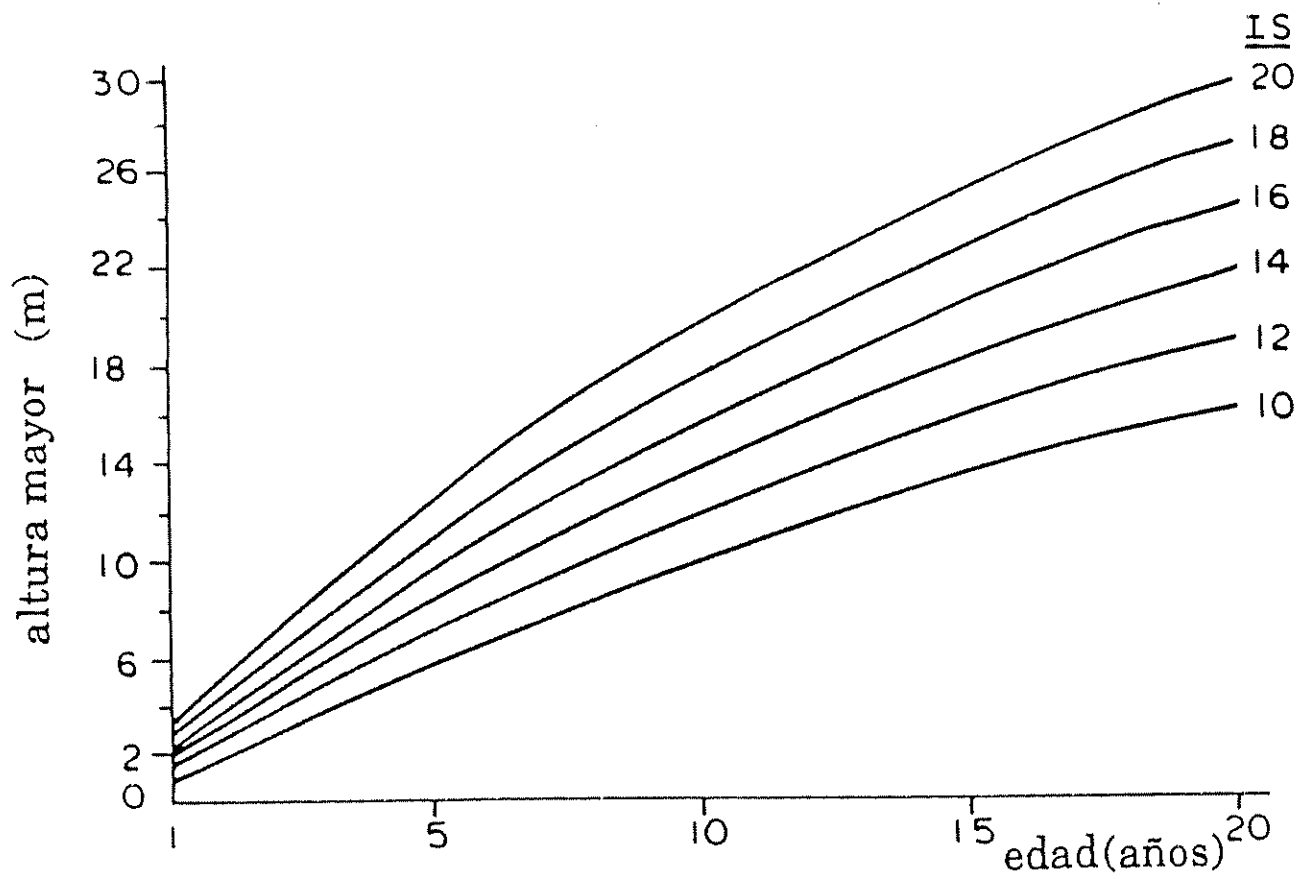
Ha: Área por medio del rodal en hectáreas
AD: Área basal en m²/ha

Vcc: Volumen sin corteza hasta 8 y 23 cm
ICA: Incremento contenido anual

IMA: Incremento medio anual
Fuente: Millic (1969); citado por Keogh (1967)

Anexo 6

Curvas de crecimiento en altura dominante de varios índices de sitio para *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand en Costa Rica. (Navarro, 1989).



Anexo 7. Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para *Gmelina arborea*, en cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

N° Muestra	Hojancha			Hojancha			Hojancha		
	Edad 4 años			Edad 8 años			Edad 10- 12 años		
	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra
M109	58.33	94.64	M127	66.67	93.58	M145	44.44	93.82	
M110	53.85	93.64	M128	57.14	92.61	M146	54.55	95	
M111	53.33	94.82	M129	57.14	92.80	M147	37.5	94.41	
M112	50	94.02	M130	70	92.85	M148	37.5	93.88	
M113	60	93.58	M131	66.67	92.55	M149	50	94.65	
M114	53.85	94.06	M132	66.67	93	M150	37.5	92.78	
M115	33.33	95.37	M133	66.67	93.12	M151	58.33	94.15	
M116	53.85	93.84	M134	55.56	94.05	M152	60	94.03	
M117	58.33	94.07	M135	66.67	93.35	M153	44.44	94.06	
M118	55.56	92.79	M136	64.29	93.78	M154	55.56	93.23	
M119	63.64	94.08	M137	64.70	94.5	M155	58.33	96.28	
M120	63.64	94.52	M138	71.42	92.8	M156	55.56	95.98	
M121	63.64	92.68	M139	66.67	94.05	M157	55.56	95.32	
M122	62.50	95	M140	58.33	93.49	M158	55.56	93.93	
M123	61.54	94.02	M141	66.67	93.33	M159	55.56	94.29	
M124	60	94.02	M142	66.67	93.33	M160	61.64	95.58	
M125	60	94.22	M143	66.67	94.85	M161	58.33	96.45	
M126	63.64	93.89	M144	57.14	94.33	M162	61.54	95.44	

Anexo 8. Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para *Tectona grandis*, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, 1998.

MACORI				MACORI				PUERTO CARRILLO			
N° Muestra	Edad 5 años			N° Muestra	Edad 8 años			N° Muestra	Edad 12 años		
	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)			Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)			Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	
T 1	53.57	95.97		T 19	50.00	96.08		T 37	52.63	95.50	
T 2	53.85	96.56		T 20	52.27	98.12		T 38	52.63	96.47	
T 3	55.17	97.38		T 21	58.06	96.67		T 39	66.67	96.06	
T 4	55.56	94.51		T 22	50.00	96.67		T 40	47.50	97.21	
T 5	58.06	95.98		T 23	50.00	96.45		T 41	54.00	97.24	
T 6	45.83	97.62		T 24	50.00	95.46		T 42	51.16	96.86	
T 7	51.52	96.86		T 25	48.39	97.75		T 43	53.13	96.13	
T 8	53.57	96.47		T 26	52.38	96.06		T 44	52.27	97.90	
T 9	54.84	96.83		T 27	51.35	96.96		T 45	52.73	97.61	
T 10	51.61	96.05		T 28	50.00	97.95		T 46	52.50	96.40	
T 11	54.84	97.35		T 29	46.88	97.10		T 47	46.51	97.50	
T 12	54.84	95.34		T 30	50.00	96.47		T 48	48.48	96.05	
T 13	61.11	96.24		T 31	51.43	96.90		T 49	48.72	97.99	
T 14	58.33	97.24		T 32	53.33	97.40		T 50	50.00	95.94	
T 15	53.85	97.15		T 33	44.44	97.50		T 51	53.33	97.56	
T 16	56.52	96.86		T 34	67.65	97.16		T 52	48.78	96.76	
T 17	55.56	96.95		T 35	55.56	95.98		T 53	51.22	96.44	
T 18	52.38	96.64		T 36	48.78	95.96		T 54	46.34	97.41	

Anexo 9. Porcentaje de humedad y materia seca en tres diferentes edades para *Bombacopsis quinatum*, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

MACORI				MACORI				PUERTO CARRILLO			
Edad 5 años		Edad 8 años		Edad 12 años		Edad 5 años		Edad 8 años		Edad 12 años	
N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)	N° Muestra	Humedad (%)	Materia seca al vacío (%)
P 55	66.67	97.17	P 73	62.03	96.94	P 91	52.08	97.66			
P 56	62.86	95.34	P 74	64.56	95.79	P 92	62.79	97.68			
P 57	60.00	97.14	P 75	67.50	96.87	P 93	58.14	98.31			
P 58	50.00	95.71	P 76	53.85	96.20	P 94	58.70	96.32			
P 59	62.16	94.92	P 77	63.16	95.06	P 95	66.67	94.07			
P 60	59.46	95.98	P 78	62.16	96.53	P 96	64.56	94.27			
P 61	56.67	95.32	P 79	67.57	97.55	P 97	58.33	95.55			
P 62	59.38	95.69	P 80	60.53	96.55	P 98	55.10	94.76			
P 63	67.57	96.74	P 81	67.44	96.21	P 99	65.91	97.98			
P 64	66.67	97.19	P 82	54.55	95.01	P 100	59.52	94.44			
P 65	65.79	96.67	P 83	67.50	97.22	P 101	65.91	97.65			
P 66	66.67	96.52	P 84	60.00	95.96	P 102	60.47	94.59			
P 67	61.76	97.54	P 85	65.71	95.79	P 103	66.67	96.40			
P 68	68.57	96.39	P 86	62.07	94.74	P 104	65.91	94.68			
P 69	62.32	98.02	P 87	53.85	94.87	P 105	54.84	95.96			
P 70	68.00	98.02	P 88	61.29	96.76	P 106	58.82	95.65			
P 71	61.90	93.57	P 89	55.56	95.67	P 107	63.83	95.35			
P 72	47.37	97.93	P 90	61.76	93.25	P 108	63.41	93.57			

Anexo 10

Contenido de carbono en una unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de *Gmelina arborea*, en el cantón de Hojancha, Guanacaste 1998.

	N° Muestra	Plantación	Edad	Energía Bruta (cal/gr)	Carbono en biomasa seca
MELINA I RANGO SITIO A	M109	CACH	4	4261.2144	0.3735731
	M110	CACH	4	4040.2656	0.3849984
	M111	CACH	4	4228.25	0.3880567
	M112	CACH	4	4166.3021	0.3939613
	M113	CACH	4	4010.6763	0.3650006
	M114	CACH	4	4200.4043	0.365179
	M115	CACH	4	4161.8608	0.3500721
	M116	CACH	4	4092.2648	0.374572
	M117	CACH	4	4174.744	0.3455263
	M121	CACH	4	4231.943	0.3317973
	M122	CACH	4	4129.0048	0.3277927
	M123	CACH	4	4144.0595	0.3341186
				Promedio	0.36361226
MELINA I RANGO SITIO B	M118	CACH	4	4234.2096	0.3202977
	M119	CACH	4	3894.9057	0.3243338
	M120	CACH	4	4141.6603	0.3441995
	M124	CACH	4	3984.0858	0.3015339
	M125	CACH	4	4076.6378	0.3040745
	M126	CACH	4	4268.1	0.3415584
			Promedio	0.3226663	
MELINA II RANGO SITIO A	M127	CACH	8	4298.5791	0.4014041
	M128	CACH	8	4256.3763	0.4280373
	M129	CACH	8	4244.035	0.4085937
	M133	CACH	8	4136.6162	0.3942314
	M134	CACH	8	4213.2619	0.4153689
	M135	CACH	8	4230.921	0.3885471
			Promedio	0.4060304	
MELINA II RANGO SITIO B	M130	CACH	8	4237.2018	0.3499904
	M131	CACH	8	4178.5261	0.3740474
	M132	CACH	8	4263.5173	0.3785323
	M136	CACH	8	4206.1529	0.3536549
	M137	CACH	8	4285.8158	0.3402788
	M138	CACH	8	4128.0904	0.381126
	M139	CACH	8	4177.5442	0.3314289
	M140	CACH	8	4152.801	0.374799
	M141	CACH	8	4131.9072	0.3554296
	M142	CACH	8	4211.7314	0.4023396
	M143	CACH	8	4209.99	0.3843427
	M144	CACH	8	4234.8124	0.3632498
				Promedio	0.3657682
MELINA III RANGO SITIO B	M145	CACH	12	4338.8688	0.39184756
	M146	CACH	12	4262.8443	0.3539992
	M147	CACH	12	4447.956	0.3968464
	M148	CACH	12	4220.449	0.3561751
	M149	CACH	12	4181.3064	0.4049536
	M150	CACH	12	4169.8608	0.3829397
	M151	CACH	12	4239.2667	0.3793914
	M152	CACH	12	4199.8537	0.3865269
	M153	CACH	12	4178.3986	0.373892
	M154	CACH	10	4182.4386	0.3365559
	M155	CACH	10	4168.7138	0.3180575
	M156	CACH	10	4129.4208	0.3237593
	M157	CACH	10	4123.0917	0.3228452
	M158	CACH	10	4169.0615	0.3469328
	M159	CACH	10	4201.6859	0.3352102
	M160	CACH	10	4435.6261	0.3516748
	M161	CACH	10	4282.1949	0.3315177
	M162	CACH	10	4234.8056	0.3684231
			Promedio	0.3589749	

Anexo 11

Contenido de carbono en una unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de *Tectona grandis*, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

	N° Muestra	Plantación	Edad (años)	Energía Bruta (cal/gr)	Carbono en biomasa seca
TECA I RANGO SITIO A	T1	MACORI	5	4129.3399	0.3598506
	T2	MACORI	5	4030.4953	0.3290651
	T3	MACORI	5	4145.914	0.3307244
	T4	MACORI	5	3791.0719	0.3034506
	T5	MACORI	5	4138.2414	0.334424
	T6	MACORI	5	4264.8653	0.3173652
	T7	MACORI	5	4184.8733	0.3323732
	T8	MACORI	5	4060.183	0.3426103
	T9	MACORI	5	4298.1327	0.3550232
			Promedio		0.33387629
TECA I RANGO SITIO B	T10	MACORI	5	4247.6421	0.32613334
	T11	MACORI	5	4089.6111	0.2987273
	T12	MACORI	5	3975.3181	0.3244873
	T13*	MACORI	5		
	T14*	MACORI	5		
	T15*	MACORI	5		
	T16*	MACORI	5		
	T17*	MACORI	5		
T18	MACORI	5	4137.8842	0.3612448	
			Promedio		0.3276481
TECA II RANGO SITIO A	T22	MACORI	8	4184.7222	0.3408909
	T23	MACORI	8	4113.3481	0.3673535
	T24	MACORI	8	4043.0293	0.3355917
	T25	MACORI	8	4184.263	0.3578954
	T26	MACORI	8	4327.8982	0.3307929
	T27	MACORI	8	4169.2529	0.3258628
	T19	MACORI	8	4089.0739	0.3683993
	T20	MACORI	8	4119.8252	0.3304201
	T21	MACORI	8	4056.8677	0.3787356
	T31	MACORI	8	4264.2372	0.3287619
	T32	MACORI	8	4231.7394	0.3201775
	T33	MACORI	8	4252.8421	0.31934760
				Promedio	
TECA II RANGO SITIO B	T28	MACORI	8	4106.9243	0.3461928
	T29	MACORI	8	4126.8556	0.3191179
	T30	MACORI	8	4049.5357	0.3154879
	T34	MACORI	8	4229.8076	0.3529088
	T35	MACORI	8	4181.9655	0.3491575
	T36	MACORI	8	4249.1492	0.3344812
			Promedio		0.3362243
TECA III RANGO SITIO A	T40	Pto Carrillo	12	4230.9122	0.3572656
	T41	Pto Carrillo	12	4414.0002	0.3744224
	T42	Pto Carrillo	12	4220.1228	0.370695
	T43	Pto Carrillo	12	4439.6422	0.4276524
	T44	Pto Carrillo	12	4245.5118	0.4032875
	T45	Pto Carrillo	12	4153.5883	0.3539436
	T46	Pto Carrillo	12	4214.457	0.3407545
	T47	Pto Carrillo	12	4238.1295	0.3364191
T48	Pto Carrillo	12	4316.2538	0.3934015	
			Promedio		0.38400725
TECA III RANGO SITIO B	T37	Pto Carrillo	12	4261.6935	0.396024
	T38	Pto Carrillo	12	4262.9911	0.3677935
	T39	Pto Carrillo	12	4321.8435	0.4049813
	T49	Pto Carrillo	12	4338.4718	0.3812751
	T50	Pto Carrillo	12	4138.8496	0.3938245
	T51	Pto Carrillo	12	4186.1786	0.3648038
	T52	Pto Carrillo	12	4325.4983	0.3642795
	T53	Pto Carrillo	12	4233.9244	0.368126
T54	Pto Carrillo	12	4186.0755	0.3545506	
			Promedio		0.36638162

* Muestra de campo insuficiente (MCI) para el análisis de laboratorio en la Bomba Calorimétrica

Anexo 12

Contenido de carbono en una unidad de biomasa seca por el método de calorimetría para el primero, segundo y tercer rango de edad y sitio, de *Bombacopsis quinata*, en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste 1998.

	N° Muestra	Plantación	Edad	Energía Bruta (cal/gr)	Carbono en biomasa seca
POCHOTE I RANGO SITIO A	P 55	MACORI	5	4026.9075	0.3524567
	P56	MACORI	5	3985.2485	0.3400372
	P57	MACORI	5	4087.7933	0.3481329
	P58	MACORI	5	4155.8385	0.3235967
	P59	MACORI	5	3950.3152	0.3041077
	P60	MACORI	5	3951.7258	0.3206889
	P61	MACORI	5	3892.4491	0.3438235
	P62	MACORI	5	4030.8215	0.3426787
	P63	MACORI	5	4070.7893	0.3139141
	P64	MACORI	5	3884.08	0.3227298
	P65	MACORI	5	3827.3822	0.3713828
	P66*	MACORI	5		
	P67	MACORI	5	4116.2911	0.357556
	P68	MACORI	5	4130.1687	0.3551539
	P69*	MACORI	5		
			Promedio	0.33817376	
Pochote I Rango SITIO B	P70*	MACORI	5		
	P71*	MACORI	5		
	P72*	MACORI	5		
POCHOTE II RANGO SITIO A	P73	MACORI	8	4357.549	0.3947891
	P74	MACORI	8	4323.7699	0.3998524
	P75	MACORI	8	4081.3451	0.3896792
	P76	MACORI	8	4166.0864	0.3514652
	P77	MACORI	8	3888.5496	0.3231381
	P78	MACORI	8	4021.147	0.3563608
	P79	MACORI	8	4291.7936	0.3410887
	P80	MACORI	8	4220.6383	0.3983221
	P81	MACORI	8	4034.5016	0.3431379
	P82	MACORI	8	4054.5322	0.3467302
POCHOTE II RANGO SITIO B	P83	MACORI	8	4208.7116	0.3635421
	P84	MACORI	8	4306.4854	0.356361
	P85	MACORI	8	4001.2242	0.3995041
	P86	MACORI	8	4071.6434	0.3932469
	P87	MACORI	8	3945.2255	0.3699284
				Promedio	0.3684764
	P88*	MACORI	8		
	P89*	MACORI	8		
	P90*	MACORI	8		
POCHOTE III RANGO SITIO C	P91	Pto Carrillo	15	4382.335	0.3553416
	P92	Pto Carrillo	15	4080.4462	0.3721422
	P93	Pto Carrillo	15	4143.0431	0.3383679
	P94	Pto Carrillo	15	4334.013	0.3840874
	P95	Pto Carrillo	15	4192.4193	0.3510384
	P96	Pto Carrillo	15	4122.7159	0.379329
	P97	Pto Carrillo	15	4135.2822	0.3237649
	P98	Pto Carrillo	15	4034.4116	0.398385
	P99	Pto Carrillo	15	4031.7326	0.4186522
	P100	Pto Carrillo	15	4013.5907	0.3446808
	P101	Pto Carrillo	15	4343.8231	0.3885094
	P102	Pto Carrillo	15	4165.4174	0.3170406
	P103	Pto Carrillo	15	4143.126	0.3895905
	P104	Pto Carrillo	15	3975.7517	0.3753083
	P105	Pto Carrillo	15	4143.7396	0.37786373
	P106	Pto Carrillo	15	3951.5564	0.3819531
	P107	Pto Carrillo	15	4502.6567	0.3855877
	P108	Pto Carrillo	15	4031.8197	0.3086172
			Promedio	0.3661255	

* Muestra de campo insuficiente (MCI) para el análisis de laboratorio en la Bomba Calorimétrica

Anexo 13

Estadísticos básicos para las tres especies del estudio por edad y sitio, en los cantones de Hojancha y Nicoya Guanacaste 1998.

Gmelina arborea

	I RANGO (2-4 años)		II RANGO (6-8 años)		III RANGO (≥ 10 años)	
	A	B	A	B	A*	B
Media	0,361220675	0,3226663	0,406030417	0,365768283		0,358974909
Error típico	0,006632444	0,007351223	0,005900188	0,005883439		0,006508629
Mediana	0,3650898	0,32231575	0,4049989	0,3686486		0,35508715
Desviación estándar	0,022975458	0,018006745	0,01445245	0,020380831		0,027613772
Varianza de la muestra	0,000527872	0,000324243	0,000208873	0,000415378		0,00076252
Curtosis	-1,399985566	-1,84671225	-0,546601051	-0,463386384		-1,299973355
Coefficiente de asimetría	-0,141558795	0,043933102	0,437620025	-0,020013554		0,086059117
Rango	0,0661686	0,0426656	0,0394902	0,0709107		0,0868961
Mínimo	0,3277927	0,3015339	0,3885471	0,3314289		0,3180575
Máximo	0,3939613	0,3441995	0,4280373	0,4023396		0,4049536
Suma	4,3346481	1,9359978	2,4361825	4,3892194		6,46154836
Cuenta	12	6	6	12		18
Nivel de confianza (95.0%)	0,014597917	0,018896889	0,015166891	0,012949369		0,013732025

Tectona grandis

	I RANGO (4-6 años)		II RANGO (8-10 años)		III RANGO (≥ 12 años)	
	A	B	A	B	A	B
Media	0,333876289	0,327648185	0,3420191	0,33622435	0,384007256	0,366381622
Error típico	0,005812008	0,012836913	0,005947297	0,006508141	0,008343203	0,006881363
Mediana	0,3323732	0,32531032	0,3331923	0,340337	0,3744224	0,3648038
Desviación estándar	0,017436024	0,025673826	0,020602042	0,015941623	0,025029608	0,02064409
Varianza de la muestra	0,000304015	0,000659145	0,000424444	0,000254135	0,000626481	0,000426178
Curtosis	0,044937142	1,642777684	-1,056238519	-2,067598222	-0,873478876	-1,022730992
Coefficiente de asimetría	-0,156624174	0,539572325	0,70181992	-0,453890781	0,486540721	-0,030977322
Rango	0,0564	0,0625175	0,059388	0,0374209	0,0737088	0,0574054
Mínimo	0,3034506	0,2987273	0,3193476	0,3154879	0,3539436	0,3364191
Máximo	0,3598506	0,3612448	0,3787356	0,3529088	0,4276524	0,3938245
Suma	3,0048866	1,31059274	4,1042292	2,0173461	3,4560653	3,2974346
Cuenta	9	4	12	6	9	9
Nivel de confianza (95.0%)	0,013402523	0,040852825	0,01308992	0,016729681	0,019239472	0,015868462

Bombacopsis quinata

	I RANGO (4-6 años)		II RANGO (8-10 años)		III RANGO (15 años)		
	A	B*	A	B*	A*	B*	C
Media	0,338173762		0,368476413				0,366125552
Error típico	0,00544875		0,006591273				0,007075956
Mediana	0,3426787		0,3635421				0,376586015
Desviación estándar	0,019645747		0,025527889				0,030020741
Varianza de la muestra	0,000385955		0,000651673				0,000901245
Curtosis	-0,796854829		-1,36310979				-0,469991249
Coefficiente de asimetría	-0,168287675		-0,092122378				-0,478739832
Rango	0,0672751		0,0767143				0,110035
Mínimo	0,3041077		0,3231381				0,3086172
Máximo	0,3713828		0,3998524				0,4186522
Suma	4,3962589		5,5271462				6,59025993
Cuenta	13		15				18
Nivel de confianza (95.0%)	0,011871806		0,014136886				0,014928984

*No se ubicaron parcelas en estas clasificaciones

Anexo 14

Lista de precios de madera en pie, en patio de industria y aserrada para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata*, utilizados para el Análisis Financiero, 1999.

Especie	Arbol en pie (\$/m ³)	Troza en patio (\$/m ³)	Madera Aserrada (\$/m ³)		Fuente de Información
			Cepillada	Sin cepillar	
Melina	9.24	33	168.47	151.63	JUNAFORCA
		39.6	269.56		CAC de Santa Cruz
15 a 20 cm	15.84	22.44 - 26.40		151.63	CCF
20 a 25 cm	15.84	30.36 - 36.64		151.63	CCF
25 a 30 cm	21.12	33 - 35.64		151.63 - 160.05	CCF
Mayor a 30 cm	21.12	36.96 - 44.88		151.63 - 160.05	CCF
Teca	112.21	165 - 171.60	407.7 - 426.25	370.65 - 387.49	JUNAFORCA
	72.61	125.41	673.91		CAC de Santa Cruz
	128.05	184.81			CCF
Pochote					
	33	72.21	213.96	193.75	JUNAFORCA
	33	72.21	213.96		CCF

Fuente:

Viquez, Manuel. Comunicación personal, Sistema de Información Forestal JUNAFORCA 1999.

Bonilla, Lorena. Comunicación personal, Centro Agrícola Cantonal de Santa Cruz 1999.

CCF. Cámara Costarricense Forestal 1998.

Anexo 15. Estructura de costos de establecimiento y manejo para una plantación de *Gmelina arborea*, (Escenario 1)

Ingresos	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	TOTAL
Madera (\$/ha)	0	0	0	272.23	0	0	0	283.97	0	0	0	614.01	0	5451.52	
Total Ingresos	0	0	0	272.23	0	0	0	283.97	0	0	0	614.01	0	5451.52	6621.73
Costos															
Preparación de Terreno	98.94														
Plantación	148.17														
Mantenimiento	127.29	99.71	70.26	70.26	70.26										
Protección	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	
Tratamientos	36.42	36.42	36.42	52.01				52.01				52.01			36.47
Aprovechamiento															
Asistencia técnica	13.59	13.59	13.59			13.59				13.59					13.59
Cargas Sociales	63.27	24.58	18.23	15.40	4.01	14.30	4.01	4.01	4.01	14.30	4.01	4.01	4.01	14.30	
Administración	53.14	26.57	21.26	21.26	21.26	26.57	21.26	21.26	21.26	26.57	21.26	21.26	21.26	26.57	
Total Costos	562.24	222.27	181.16	180.33	116.93	76.85	46.66	96.67	46.66	76.85	46.66	96.67	46.66	90.93	1889.56
TOTAL	-562.24	-222.27	-181.16	91.91	-116.93	-75.85	-46.66	185.30	-46.66	-75.85	-46.66	515.34	-46.66	5360.59	

VAN \$363.02
TIR 15.4%

Supuestos

- Montos en dolares
- 74.22 colones por dólar
- INC = Raleo No Comercial
- 1/c año 4, 60% del Volumen del Raleo
- 1/volumen comercial Raleo año 4 = 29.46 m3
- 1/c año 8, 70% del Volumen del raleo
- 1/volumen comercial Raleo año 8= 30.73 m3
- 1/c año 12 85 % del volumen del raleo
- 1/volumen comercial raleo año 12 = 38.73 m3
- 1/c corta final = 256.1 m3
- Precio: \$ 9.24/m3 para el primer raleo
- \$ 9.24/m3 para el segundo raleo
- \$ 15.84/m3 para el tercer raleo
- \$21.12/m3 para la corta final

Anexo 16. Estructura de costos de establecimiento y manejo para una plantación de *Tectona grandis* (Escenario 1).

Ingresos	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Total
Madera (\$/ha)										
Total Ingresos	0	0	0	0	0	0	0	0	23842.73	27368.08
Costos										
Preparación de Terreno										
Plantación										
Mantenimiento										
Protección	20.49	20.49	20.49	20.49	20.49	20.49	20.49	20.49		20.49
Tratamientos										
Aprovechamiento										40.11
Asistencia técnica										13.59
Cargas Sociales	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84		10.49
Administración	19.37	19.37	19.37	19.37	19.37	19.37	19.37	19.37		21.52
Total Costos	43.71	43.71	43.71	43.71	43.71	43.71	43.71	43.71	43.71	85.72
TOTAL	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	-43.71	23757.02
VAN										
TIR										
Supuestos										
Montos en dolares										
1\$ = 274.22 colones										
Raleo año 8 es 60% comercial										
Volumen comercial raleo año 8 = 16.92 m3										
Vc año 13, 70% del Volumen del Raleo										
Volumen comercial Raleo año 13 = 36.2 m3										
Vc corta final = 207.6 m3										
Precio madera										
Primer raleo comercial: \$ 48.45/m3										
Segundo raleo: \$ 74.59/m3										
Corta final: \$ 114.85/m3										

Anexo 17. Estructura de costos de establecimiento y manejo para una plantación de *Bombacopsis quinata*, (Escenario 1).

Ingresos	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Madera (\$/ha)															1340.21
Total Ingresos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1340.21
Costos															
Preparación de Terreno	111.80														
Plantación	177.74														
Mantenimiento	180.33	131.33	91.39	91.39	91.39	91.39									
Protección	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14
Tratamientos	30.18	30.18	30.18			53.05								53.05	
Aprovechamiento	0.00														
Asistencia técnica	13.59	13.59	13.59				13.59							13.59	
Cargas Sociales	63.28	27.80	17.31	15.34	15.34	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	11.67	5.25
Administración	53.15	26.57	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95
Total Costos	646.21	245.62	183.56	137.83	137.83	89.39	36.34	66.35	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	109.41	36.34
TOTAL	-646.21	-245.62	-183.56	-137.83	-137.83	-89.39	-36.34	-56.35	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	1230.81	-36.34

VAN (\$483.17)
TIR 9.2%

Supuestos

- Montos en dolares
- 1 \$ = 274.22 colones
- RNC = Raleo No Comercial
- Vc año 14, 60% del Volumen del Raleo
- Volumen comercial Raleo año 14 = 47.22 m3
- Vc año 22, 85 % del volumen del raleo
- Volumen comercial Raleo año 22 = 75.56 m3
- Vc corta final = 112.6 m3
- Precio de madera
- Primer raleo comercial \$28.38/m3
- Segundo raleo \$44.49/m3
- Corta final \$67.33/m3

Anexo 17. Estructura de costos de establecimiento y manejo para una plantación de *Bombacopsis quinata*, (Escenario 1).

Ingresos	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	TOTAL
Madera (\$/ha)							3361.71								7580.85	7580.85
Total Ingresos	0	0	0	0	0	0	3361.71	0	0	0	0	0	0	0	0	12282.77
Costos																
Preparación de Terreno																
Plantación																
Mantenimiento																
Protección	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14	16.14
Tratamientos																
Aprovechamiento																
Asistencia técnica																
Cargas Sociales	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	11.67	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	11.67
Administración	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95
Total Costos	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	109.41	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	36.34	2519.03
TOTAL	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	3252.30	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	-36.34	7504.78

VAN
TIR

Supuestos

- Montos en dolares
- 1 \$ = 274.22 colones
- RNC = Raleo No Comercial
- Vc año 14, 60% del Volumen del Raleo
- Volumem comercial Raleo año 14 = 47.22 m3
- Vc año 22, 85 % del volumen del raleo
- Volumem comercial Raleo año 22 = 75.56 m3
- Vc corta final = 112.6 m3
- Precio de madera
- Primer raleo comercial \$28.38/m3
- Segundo raleo \$44.49/m3
- Corta final \$67.33/m3