

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
LINDEROS MADERABLES EN COSTA RICA Y PANAMÁ.

ROCÍO ALEXANDRA ORTIZ PAZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA
2008

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
LINDEROS MADERABLES EN COSTA RICA Y PANAMÁ.

ROCÍO ALEXANDRA ORTIZ PAZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Agroforestal

PRESIDENTE
EDUARDO SOMARRIBA Ph. D.

CO-PRESIDENTE
LUZ AMALIA FORERO M. Sc.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA
2008

Nota de aceptación:

Diego Muñoz Guerrero M. Sc
Jurado delegado

Javier León Guevara M. Sc
Jurado

Hector Ordoñez Jurado M. Sc
Jurado

San Juan de Pasto, 7 de febrero de 2008

Dedico este trabajo a:

Dios y a La Virgen,

por darme la dicha de haber nacido y crecido en Colombia, junto a mi familia. Por la temporada de experiencias inolvidables en Costa Rica y Panamá y por darle felicidad a los días de mi vida.

Mis padres Anita y Bolivar,

por el amor, la dedicación, el apoyo, la fortaleza, la constancia, la paciencia y los valores humanos que me otorgan.

Mis hermanos Jaison, Lynn y Flor,

por el apoyo y la motivación que me dan para realizar mis sueños.

La memoria de mi abuela Reinelda,

por ser mi inspiración para tener paciencia, voluntad y constancia en el alcance de mis metas.

Mi abuelo Felipe,

por sus palabras que dan alegría y me inculcan aprecio y valor a los recursos naturales como el agua, la tierra y el paisaje.

Richi,

por el amor, el apoyo y el ánimo que le da a los días de mi vida.

Las personas,

que me regalaron sus mejores deseos y forman parte de este logro.

ROCIO

AGRADECIMIENTOS

A Eduardo Somarriba Chávez Ph. D., líder del Proyecto Captura de Carbono, por darme la oportunidad de realizar mi pasantía y tesis. Por sus consejos y asesoría.

A Marilyn Villalobos M. Sc., Coordinadora del Proyecto Captura de Carbono, por su paciencia, su apoyo y sus gratas experiencias en campo.

A Luz Amalia Forero Peña M. Sc., por sus clases en la universidad, su dedicación en la asesoría de mi tesis, sus valiosas palabras y su trabajo en Agroforestería.

A Diego Muñoz Guerrero M. Sc., por sus clases en la universidad, por sus sugerencias y recomendaciones en el proyecto de tesis.

A Javier León Guevara M. Sc., por sus recomendaciones, sugerencias y su colaboración en el proceso de elaboración de tesis.

A Alberto Meza Guerrero M. Sc., por su apoyo en la parte estadística de la tesis.

A la comunidad indígena Bribri-Cabecar en Talamanca, Costa Rica por compartirme de su cultura.

A las familias Rojas, Richard, Smith, Bissinger y García en Talamanca, C.R., y las familias Guerra y Herrera en Panamá por su colaboración en los linderos.

A Vilmar Sánchez, promotor del Proyecto Captura de Carbono, por su apoyo en las labores de campo.

A Gerardo Taylor Heberth, por su colaboración en la remediación de los linderos.

A todo el personal del departamento de agroforestería en CATIE, por su cooperación, paciencia y buena atención.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 24 |
| 1. REVISIÓN DE LITERATURA | 26 |
| 1.1 AGROFORESTERÍA | 26 |
| 1.1.1 Definición. | 26 |
| 1.1.2 Concepto. | 26 |
| 1.1.3 Clasificación agroforestal. | 26 |
| 1.1.3.1. Sistema agroforestal. | 26 |
| 1.1.3.1.1. Sistemas agroforestales secuenciales. | 27 |
| 1.1.3.1.2. Sistemas agroforestales simultáneos. | 27 |
| 1.1.3.1.3. Sistemas agroforestales de cercas vivas y cortinas rompevientos. | 27 |
| 1.1.3.2. Práctica agroforestal. | 27 |
| 1.1.3.3. Tecnología agroforestal. | 27 |
| 1.1.3.3.1. Árboles en linderos. | 29 |

| | |
|---|----|
| 1.1.3.3.1.1. Motivos para plantar árboles en linderos. | 29 |
| 1.1.3.3.1.2. Cómo escoger la clase de árboles a plantar en linderos. | 30 |
| 1.1.3.3.1.3. Criterios par seleccionar sitios para establecer linderos. | 30 |
| 1.1.3.3.1.4. Derechos y deberes en los linderos. | 31 |
| 1.2 ACACIA | 32 |
| 1.2.1 Clasificación taxonómica. | 32 |
| 1.2.2 Características ecológicas y climáticas. | 33 |
| 1.3 TECA | 34 |
| 1.3.1 Clasificación taxonómica. | 35 |
| 1.3.2 Características ecológicas y climáticas. | 35 |
| 1. 4 CALIDAD DE SITIO E ÍNDICE DE SITIO | 37 |
| 1.4.1 Importancia de la calidad del sitio en el manejo forestal. | 37 |
| 1.4.2 Principales objetivos de evaluar la calidad del sitio. | 37 |
| 1.4.3 Métodos de evaluación de la calidad de sitio. | 38 |
| 1.4.3.1. Métodos directos. | 39 |

| | |
|--|----|
| 1.4.3.2. Métodos indirectos. | 39 |
| 1.4.4 Determinación de la edad base. | 40 |
| 1.4.5 La altura como indicador de la calidad de sitio. | 41 |
| 1.4.6 Curvas de índice de sitio. | 41 |
| 1.4.7 Clasificación del sitio. | 42 |
| 1.5 CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO | 43 |
| 1.5.1 Tipos de crecimiento. | 43 |
| 1.5.2 Modelos de crecimiento y rendimiento. | 44 |
| 1.5.2.1. Modelo de crecimiento de Shumacher. | 45 |
| 1.6 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO | 46 |
| 1.7 CAMBIO CLIMATICO | 47 |
| 1.7.1 Causas del cambio climático: gases de efecto invernadero y fuentes de emisión. | 48 |
| 1.7.2 IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). | 48 |
| 1.7.3 La Convención sobre el Cambio Climático. | 49 |
| 1.7.4 Protocolo de Kyoto. | 49 |

| | |
|---|----|
| 1.7.5 Mecanismos de la Convención Marco del Cambio Climático (CMCC). | 49 |
| 1.7.5.1. Mecanismo de desarrollo limpio (MDL). | 50 |
| 1.7.5.1.1. Importancia del MDL para el sector del uso de la tierra. | 50 |
| 1.8 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES | 51 |
| 1.9 FINANCIACIÓN DE LA ACCIÓN EMPRENDIDA EN VIRTUD DE LA CONVENCIÓN | 51 |
| 1.10 FUNDAMENTO LEGAL PARA EL PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES EN COSTA RICA | 52 |
| 1.11 CONTABILIDAD DE CARBONO | 53 |
| 1.12 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA | 54 |
| 1.13 CARBONO ALMACENADO Y FIJADO | 55 |
| 1.14 ANTECEDENTES DEL PROYECTO CATIE/GTZ ÁRBOLES MADERABLES EN LINDEROS | 56 |
| 1.14.1 Tipo de ensayo, mediciones y espaciamiento. | 56 |
| 1.14.2 Establecimiento. | 56 |
| 1.14.3 Resiembras y mortalidad. | 56 |
| 1.14.4 Desechijas y podas. | 57 |

| | |
|---|----|
| 1.14.5 Estudio de suelos. | 57 |
| 1.14.2 Descripción de los sitios de estudio. | 57 |
| 2. METODOLOGÍA | 60 |
| 2.1 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO | 60 |
| 2.1.1 Ubicación geográfica y condiciones climáticas. | 60 |
| 2.2 MÉTODOS | 69 |
| 2.2.1 Recolección de información. | 69 |
| 2.2.2 Remedición de los linderos en campo. | 69 |
| 2.2.3 Labores de oficina. | 70 |
| 2.2.3.2. Análisis de la información. | 70 |
| 2.2.3.2.1. Cálculo de la altura dominante. | 71 |
| 2.2.3.2.2. Estimación directa del Índice de sitio por el método de la curva guía. | 72 |
| 2.2.3.2.2. Estimación de carbono almacenado y fijado en <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> en linderos. | 74 |
| 2.2.3.2.4. Modelos de rendimiento y crecimiento. | 75 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 77 |

| | |
|--|-----|
| 3.1 REMEDICIÓN DE LOS LINDEROS DE <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> , A LOS 17 AÑOS DE EDAD | 77 |
| 3.2 INDICE DE SITIO A UNA EDAD BASE DE CINCO AÑOS PARA <i>Acacia mangium</i> Y, DE DIEZ AÑOS DE EDAD PARA <i>Tectona grandis</i> | 80 |
| 3.3 RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN ALTURA DE <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> , EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO | 87 |
| 3.3.1 Rendimiento y crecimiento en altura de <i>Acacia mangium</i> . | 87 |
| 3.3.2 Rendimiento y crecimiento en altura de <i>Tectona grandis</i> . | 90 |
| 3.4 RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN DIÁMETRO DE <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> , EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO | 93 |
| 3.4.1 Rendimiento y crecimiento en diámetro de <i>Acacia mangium</i> . | 93 |
| 3.4.2 Rendimiento y crecimiento en diámetro de <i>Tectona grandis</i> . | 97 |
| 3.5 CRECIMIENTO EN VOLUMEN DE <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> , en las cuatro calidades de sitio | 101 |
| 3.5.1 Rendimiento y crecimiento en volumen de <i>Acacia mangium</i> . | 101 |
| 3.5.2 Rendimiento y crecimiento en volumen de <i>Tectona grandis</i> . | 104 |
| 3.6 CARBONO ALMACENADO Y FIJADO POR <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> , EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO. | 108 |

| | |
|---|-----|
| 3.6.1 Carbono almacenado y fijado en <i>Acacia mangium</i> . | 108 |
| 3.6.2 Carbono almacenado y fijado por <i>Tectona grandis</i> . | 111 |
| 3.7 MODELOS DE RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN ALTURA, DIÁMETRO, VOLUMEN Y CARBONO PARA <i>Acacia mangium</i> Y <i>Tectona grandis</i> . | 114 |
| 4. CONCLUSIONES | 118 |
| 5. RECOMENDACIONES | 120 |
| BIBLIOGRAFÍA | 122 |
| ANEXOS | 128 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Principales sistemas agroforestales. | 28 |
| Tabla 2. Siete linderos maderables de <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> . | 60 |
| Tabla 3. 12 diámetros y 12 alturas de <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> a los 17 años de edad. | 78 |
| Tabla 4. Análisis de la variable altura de <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> en los siete linderos. | 79 |
| Tabla 5. Resumen de la altura, el diámetro y el volumen en los linderos. | 80 |
| Tabla 6. Alturas dominantes de <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> en la edad base. | 81 |
| Tabla 7. Índices de sitio estimados para <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> , a una edad base de cinco y 10 años respectivamente. | 83 |
| Tabla 8. Calidad de sitio para los linderos de <i>Acacia mangium</i> . | 84 |
| Tabla 9. Calidad de sitio para los linderos de <i>Tectona grandis</i> . | 85 |
| Tabla 10. Rendimiento en altura de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 87 |
| Tabla 11. Crecimiento en altura (Incremento medio anual en altura) de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 88 |
| Tabla 12. Rendimiento en altura de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 90 |
| Tabla 13. Crecimiento en altura (Incremento medio anual en altura-IMAH) de <i>T. grandis</i> , según calidad de sitio. | 91 |
| Tabla 14. Rendimiento en diámetro de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 94 |
| Tabla 15. Crecimiento en diámetro (Incremento medio anual en diámetro-IMADap) de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 16. Rendimiento en diámetro de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 97 |
| Tabla 17. Crecimiento en diámetro (Incremento medio anual-IMAdap) de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 98 |
| Tabla 18. Rendimiento en volumen de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 101 |
| Tabla 19. Crecimiento en volumen (Incremento medio anual en volumen-IMAVp) de <i>A. mangium</i> , según calidad de sitio. | 102 |
| Tabla 20. Rendimiento en volumen de <i>T. grandis</i> , según calidad de sitio. | 104 |
| Tabla 21. Crecimiento en volumen (Incremento medio anual en volumen-IMAVp) de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 105 |
| Tabla 22. Carbono almacenado por <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 108 |
| Tabla 23. Carbono fijado por <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 108 |
| Tabla 24. Carbono almacenado por <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 111 |
| Tabla 25. Carbono fijado por <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 111 |
| Tabla 26. Modelos de rendimiento y crecimiento para diez años de edad de <i>A. mangium</i> y <i>T. grandis</i> en linderos de Costa Rica y Panamá. | 114 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. <i>Acacia mangium</i> en lindero Guabito1 (Panamá). | 32 |
| Figura 2. <i>Tectona grandis</i> en lindero Hone Creek (Costa Rica). | 34 |
| Figura 3. Ubicación de los linderos en Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá. | 61 |
| Figura 4. Esquema del ensayo de linderos maderables en San Rafael de Bordon (esc. 1: 2000). | 62 |
| Figura 5. Esquema del ensayo de linderos maderables en Bordon (esc. 1: 3000). | 63 |
| Figura 6. Esquema del ensayo de linderos maderables en Hone Creek (esc. 1: 2000). | 64 |
| Figura 7. Esquema del ensayo de linderos maderables en Cocles (esc. 1: 2500). | 65 |
| Figura 8. Esquema del ensayo de linderos maderables en Guabito 1 (esc. 1: 2400). | 66 |
| Figura 9. Esquema del ensayo de linderos maderables en Guabito 2 (esc. 1:3000). | 67 |
| Figura 10. Esquema del ensayo de linderos maderables en El Silencio (esc. 1: 2400). | 68 |
| Figura 11. Altura vs edad de las especies en los siete linderos. | 80 |
| Figura 12. Modelo de la curva guía y curvas polimórficas de índice de sitio de 7.85 m, 8.79 m, 9.05 m y 10.09 m, a una edad base de 5 años de edad para <i>Acacia mangium</i> , en linderos de Costa Rica y Panamá; con base en el modelo de intercepto común. | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 13. Curvas anamórficas de índice de sitio de 16.26 m, 18.0 m, 19.51 m y 20.01 m, a una edad base de 10 años para <i>Tectona grandis</i> , en linderos de Costa Rica y Panamá; con base en el modelo de pendiente común. | 86 |
| Figura 14. Rendimiento en altura de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 89 |
| Figura 15. Crecimiento en altura (Incremento Medio anual en altura –IMAH) de <i>A. mangium</i> según la calidad de sitio. | 90 |
| Figura 16. Rendimiento en altura de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 92 |
| Figura 17. Crecimiento en altura (Incremento Medio anual en altura-IMAH) de <i>T. grandis</i> , según la calidad del sitio. | 93 |
| Figura 18. Rendimiento en diámetro de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 96 |
| Figura 19. Crecimiento en diámetro (Incremento medio anual del diámetro-IMADap) de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 96 |
| Figura 20. Rendimiento en diámetro de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 100 |
| Figura 21. Crecimiento en diámetro (Incremento medio anual en diámetro-IMADap) de <i>Tectona grandis</i> , según calidad de sitio. | 100 |
| Figura 22. Crecimiento en volumen de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 102 |
| Figura 23. Rendimiento en volumen (Incremento Medio anual en volumen-MAVp) de <i>A. Mangium</i> , según la calidad de sitio. | 103 |
| Figura 24. Rendimiento en volumen de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 107 |
| Figura 25. Crecimiento en volumen (Incremento medio anual en altura -IMAH) de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 107 |
| Figura 26. Carbono almacenado por <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 110 |
| Figura 27. Carbono fijado por <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 110 |
| Figura 28. Carbono almacenado por <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 113 |
| Figura 29. Carbono fijado por <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 114 |
| Figura 30. Modelos de rendimiento y crecimiento en altura para <i>A. mangium</i> | 115 |

y *Tectona grandis*.

Figura 31. Modelos de rendimiento y crecimiento en diámetro para *A. mangium* y *T. grandis*. 116

Figura 32. Modelos de rendimiento y crecimiento en volumen para *A. mangium* y *T. grandis*. 116

Figura 33. Modelos de rendimiento y crecimiento de carbono para *A. mangium* y *T. grandis*. 117

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--|------|
| Anexo 1. Análisis de regresión para altura dominante de <i>A. mangium</i> . | 129 |
| Anexo 2. Análisis de regresión para altura dominante de <i>T. grandis</i> . | 130 |
| Anexo 3. Coeficientes de variación (CV) de la altura promedio de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 131 |
| Anexo 4. Coeficientes de variación (CV) de la altura promedio de <i>T. grandis</i> según la calidad de sitio. | 131 |
| Anexo 5. Coeficientes de variación del diámetro promedio de <i>A. mangium</i> , según la calidad de sitio. | 132 |
| Anexo 6. Coeficientes de variación del diámetro promedio de <i>T. grandis</i> , según la calidad de sitio. | 132 |
| Anexo 7. Coeficientes de variación del volumen promedio de <i>A. mangium</i> , según calidad de sitio. | 133 |
| Anexo 8. Coeficientes de variación del volumen promedio de <i>T. grandis</i> según la calidad de sitio. | 133 |
| Anexo 9. Análisis de estadístico para el modelo de rendimiento y crecimiento en altura de <i>A. mangium</i> . | 134 |
| Anexo 10. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en altura de <i>T. grandis</i> . | 135 |
| Anexo 11. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en diámetro de <i>A. mangium</i> . | 136 |
| Anexo 12. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en diámetro de <i>T. grandis</i> . | 137 |
| Anexo 13. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en volumen de <i>A. mangium</i> . | 138 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 14. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en volumen de <i>T. grandis</i> . | 139 |
| Anexo 15. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en carbono de <i>A. mangium</i> . | 140 |
| Anexo 16. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en carbono de <i>T. grandis</i> . | 141 |

RESUMEN

El estudio se realizó en siete linderos de *Acacia mangium* y *Tectona grandis*, localizados en fincas del Cantón de Talamanca en Costa Rica (San Rafael, Bordon, Hone Creek y Cocles) y en el Distrito de Changuinola en Panamá (Guabito 1, Guabito 2 y El Silencio), con el propósito de evaluar el crecimiento y el almacenamiento de carbono en un periodo de 17 años. Para esto, inicialmente se clasificó la calidad de los sitios, recurriendo al modelo de intercepto común para *Acacia mangium* y, al modelo de pendiente común para *Tectona grandis*.

En linderos de *Acacia mangium*, la calidad de los sitios se clasificó de acuerdo al índice de sitio encontrado a una edad base de cinco años: de calidad baja a Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio con 7.85 m, de calidad media a Guabito 1 con 8.79 m, de calidad alta a San Rafael con 9.05 m y de calidad muy alta a Cocles con 10.09 m. En linderos de *Tectona grandis*, la calidad de los sitios se clasificó respecto al índice de sitio determinado a una edad base de 10 años: de calidad baja a San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2 con 16.26 m, de calidad media a Guabito 1 con 18 m, de calidad alta a Cocles con 19.51 m, y de calidad muy alta a El Silencio con 20.01 m. Se encontró que el índice de sitio influyó en el crecimiento y rendimiento de la altura, el diámetro, el volumen y el contenido de carbono; desde el año dos para *Acacia mangium* y desde el año cinco para *Tectona grandis*.

Se observó que el incremento medio anual (crecimiento) en altura de *Acacia mangium* fue más elevado durante los seis primeros años de edad, disminuyó desde el año siete hasta el 10 y mostró una tendencia a estabilizarse en el año 17. En *Tectona grandis*, el crecimiento en altura fue elevado durante los cuatro años de edad y a partir del año cinco descendió, alcanzando el menor valor en el año 17.

El mayor crecimiento en diámetro de *Acacia mangium*, se obtuvo durante los cinco primeros años de edad, disminuyó del año seis al 10 y en el año 17 fue aún menor. Para *Tectona grandis*, el mayor crecimiento se presentó durante los tres primeros años de edad y fue menor del año cuatro al siete. Desde al año ocho al diez, la especie aumentó el crecimiento respecto al obtenido en el periodo comprendido entre el año cuatro y siete. En el año 17, el crecimiento fue menor que el del obtenido en el año 10.

El incremento medio (crecimiento) en volumen y la fijación de carbono en *Acacia mangium* y *Tectona grandis* aumentó progresivamente desde el año uno hasta el 10. En el año 17 disminuyó respecto al obtenido en el año 10.

Los coeficientes de variación, mostraron baja dispersión ($CV \leq 25\%$), demostrando que los datos de altura, diámetro y volumen representan adecuadamente a las especies evaluadas en su sitio de origen.

Se estimaron modelos de crecimiento y rendimiento, los cuales se ajustaron muy bien al modelo de Shumacher. Los modelos explicaron de 81.20 a 98.80% la variabilidad en altura, diámetro, volumen y carbono en los linderos, con un alto grado de confiabilidad y precisión.

PALABRAS CLAVES: Almacenamiento de carbono, agroforestería, calidad de sitio, cambio climático, incremento medio anual, modelos de crecimiento, modelos de rendimiento, tasas de fijación.

ABSTRACT

The study was made in seven edges of *Acacia mangium* and *Tectona grandis*, located in property of the Corner of Talamanca in Costa Rica (San Rafael, Bordon, Guabito 2, and El Silencio), in order to evaluate the growth and the storage of carbon in a period of 17 years. For this, initially the quality of the sites was classified, resorting to the model of intercept common for *Acacia mangium* and, to the common slope model for *Tectona grandis*.

In edges of *Acacia mangium*, the quality of the sites was classified according to the index of site found to an age bases of five years: of low quality to Hone Creek, Bordon, Guabito 2 and El Silencio with 7.85 m, of average quality to Guabito 1 with 8.79 m, of high quality to San Rafael with 9.05 m and of very high quality to Cocles with 10.09 m. In edges of *Tectona grandis*, the quality of the sites was classified with respect to the index of site determined to an age bases of 10 years: of low quality to San Rafael, Hone Creek, Bordon and Guabito 2 with 16.26 m, of average quality to Guabito 1 with 18 m, of high quality to Cocles with 19.51m, and of very high quality to El Silence with 20.01 m. One was that the site index influenced in the growth and yield of the height, the diameter, the volume and carbon; from year two for *Acacia mangium* and from year five for *Tectona grandis*.

It was observed that the increase average annual (growth) in height of *Acacia mangium*, more was elevated during the six first years of age, diminished from year n to the 10 and showed a tendency to become stabilized in year 17. In *Tectona grandis*, the growth in height was elevated during the four years of age and as of year five it descended, reaching the smaller value in year 17.

The greater growth in diameter of *Acacia mangium*, was obtained during the five first years of age, diminished of year six to the 10 and, in year 17 he was still smaller. For *Tectona grandis*, the greater growth appeared during the three first years of age and was smaller of year four to the seven. From a year eight to the ten, the species increased the growth with respect to the obtained one in the period between year four and seven. In year 17, the growth was minor who the one of the obtained one in year 10.

The average increase (growth) in volume and the carbon fixation in *Acacia mangium* and *Tectona grandis* increased progressively from year one to the 10. In year 17 it diminished with respect to the obtained in year 10

The coefficient of variation, showed low dispersion ($CV \leq 25\%$), demonstrating that the data of height, diameter and volume represent the species evaluated in their site of origin suitably.

Models of growth and yield were considered, which adjusted very well to the model of Shumacher. The models explained from 81.20 to 98.90% the variability in height, diameter, volume and carbon in the edges, with a high degree of trustworthiness and precision.

KEY WORDS: Storage of carbon, agroforestry, quality of site, change climate, increase average annual, models of growth, models of yield, fixation rates.

INTRODUCCIÓN

Modelajes del cambio climático proporcionados por el IPCC (Panel inter gubernamental del Cambio climático), sugieren como medida para mitigar la concentración de los gases del efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, halocarbonos y otros gases industriales) promover la actividad agroforestal, debido a su capacidad para almacenar y fijar carbono en componentes como el árbol, el cultivo y el suelo, igualmente contrarrestar prácticas desmesuradas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación causantes del aumento de dichos gases.

Se propone que los agricultores realicen buenas prácticas agroforestales, al integrar árboles, cultivos y animales en una misma unidad de tierra pensando en el cuidado del ambiente. De esta manera el objetivo del productor es tanto la producción de bienes agrícolas así como la de servicios ambientales.

El lindero es uno de los sistemas agroforestales, que consiste en la plantación y manejo de árboles en líneas en las fincas, los cuales que pueden crecer y almacenar carbono dependiendo en gran medida de la calidad del sitio en donde se encuentren.

La calidad de sitio se puede evaluar determinando el índice del sitio, que se puede estimar con la altura de 100 árboles más altos por hectárea de plantación, a una edad en particular. Actualmente tener en cuenta la calidad del sitio, es determinante en los procesos de reforestación e implementación de sistemas agroforestales, para evitar fracasos técnicos y por consiguiente pérdidas económicas de una región.

El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar el crecimiento y almacenamiento de carbono en los linderos de siete fincas de Costa Rica y Panamá. Se generó información de crecimiento y rendimiento de *Tectona grandis* y *Acacia mangium*, teniendo en cuenta la altura, el diámetro, el volumen, y el contenido de carbono en las cuatro calidades de sitio determinadas.

Para cumplir con los objetivos de estudio, se emplearon datos de altura y diámetro, de 10 años (1989-1999) registrados en la base de datos del proyecto “Árboles maderables en linderos”; ejecutado entre el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (CATIE/GTZ). En el año 2006, la remediación realizada en los linderos de estudio, permitió actualizar la base de datos del proyecto.

Con los productos generados en este estudio, se espera contribuir en los programas de reforestación e implementación de sistemas agroforestales, con fines productivos y de servicio ambiental en Costa Rica, Panamá y otras regiones; con condiciones de adaptabilidad para *Acacia mangium* y *Tectona grandis*.

La propuesta del presente trabajo se enmarcó dentro del Proyecto “Captura de Carbono y Desarrollo de Mercados Ambientales en Sistemas Agroforestales indígenas con Cacao en Costa Rica”, dirigido por el CATIE y financiado por el Banco Mundial-Fideicomiso Japonés, con el objetivo de diseñar una estrategia para establecer un mercado regional para el carbono capturado en sistemas agroforestales con cacao y otros sistemas multiestratos.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 AGROFORESTERÍA

1.1.1 Definición. Es la interdisciplina y modalidad de uso productivo de la tierra donde se presenta interacción espacial y temporal de especies vegetales leñosas y no leñosas, o leñosas, no leñosas y animales. Cuando todas son especies leñosas, al menos una se maneja para producción agrícola o pecuaria permanente¹.

1.1.2 Concepto. La agroforestería es una interdisciplina, también una tradición e innovación productiva y de conservación de la naturaleza, desarrollada fundamentalmente por culturas agroforestales en tierras tropicales, donde existen formas de manejo y aprovechamiento de sistemas agroforestales en fincas y territorios comunitarios para obtener una producción biodiversa, libre de agroquímicos y duradera con predominio y desarrollo de saberes tradicionales y novedosos, fortalecimiento de la identidad cultural, interacciones ecológicas totales de complementariedad del sistema, diversificación del paisaje, aprovechamiento adecuado de recursos naturales, privilegio del trabajo humano, uso de tecnologías de bajo impacto ambiental y relaciones sociales y económicas de bienestar, equidad y justicia².

1.1.3 Clasificación agroforestal. La clasificación agroforestal debe realizarse mediante la asignación de categorías articuladas y jerárquicas, de tal manera que unas mayores contengan otras de menor nivel. Las categorías se definen así:

1.1.3.1. Sistema agroforestal. Es el conjunto de asociaciones o arreglos agroforestales donde se encuentran especies del componente vegetal leñoso y vegetal no leñoso, o componente vegetal leñoso, no leñoso y animal. Clasificatoriamente, el sistema agroforestal comprende el sistema agrosilvícola (leñosas y no leñosas) y agrosilvopastoril (leñosas, no leñosas y animales), Cada uno agrupa tecnologías agroforestales.

¹ OSPINA, A. Agroforestería: Aportes conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal. 1 ed. Cali: Asociación del Colectivo de Agroecología del Suroccidente Colombiano, 2003. p.18.

² Ibid., p. 21.

Como se puede observar en la Tabla 1, los sistemas agroforestales han sido clasificados de diferentes maneras: según su estructura en el espacio, su diseño a través del tiempo, la importancia relativa y la función de diferentes componentes, los objetivos de la producción y las características sociales y económicas prevalentes.

1.1.3.1.1. Sistemas agroforestales secuenciales. En ellos existe una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos, es decir, que los cultivos anuales y las plantaciones de los árboles se suceden en el tiempo.

Esta categoría incluye formas de agricultura migratoria con intervención y manejo de barbechos, y los sistemas Taungya, métodos de establecimiento de plantaciones forestales en los cuales los cultivos anuales se llevan a cabo simultáneamente con las plantaciones de árboles, pero sólo temporalmente, hasta que el follaje de los árboles se encuentre desarrollado.

1.1.3.1.2. Sistemas agroforestales simultáneos. Consisten en la integración simultánea y continua de cultivos anuales o perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple, y ganadería. Estos sistemas incluyen asociaciones de árboles con cultivos anuales o perennes, huertos caseros mixtos y sistemas agrosilvopastoriles.

1.1.3.1.3. Sistemas agroforestales de cercas vivas y cortinas rompevientos. Consisten en hileras de árboles que pueden delimitar una propiedad o servir de protección para otros componentes u otros sistemas; se los puede considerar como sistemas complementarios de los nombrados anteriormente³.

1.1.3.2. Práctica agroforestal. Es la asociación específica de componentes agroforestales, con disposiciones detalladas de especies, acomodo espacio temporal y manejo agroforestal particular de una localidad y cultura⁴.

1.1.3.3. Tecnología agroforestal. Es el arreglo definido de componentes agroforestales con ciertas disposiciones en espacio y tiempo. Clasificatoriamente, las tecnologías agroforestales son: cerca viva, árboles en linderos, barreras

³ MONTAGNINI, F. Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones. San José, Costa Rica: Organización para estudios Tropicales, 1992. p. 61.

⁴ OSPINA, Op. Cit., p.39.

rompevientos, cultivos en fajas, lote multipropósito, huerto de plantación frutal, huerto familiar entre otras.

TABLA1. Principales sistemas agroforestales.

| AGROSILVICULTURA | |
|---------------------------------|---|
| Rotacional | <ul style="list-style-type: none"> • Agricultura itinerante • Barbechos mejorados • Sistema Taungya |
| Mezclada e el espacio | <ul style="list-style-type: none"> • Árboles en cultivo • Cultivos en plantaciones forestales • Combinaciones de árboles con cultivos perennes • Huertos familiares |
| Localizada en el espacio | <ul style="list-style-type: none"> • Cultivos en callejones • Árboles en linderos • Árboles en estructuras para el control de erosión • Cortinas rompevientos • Transferencia de biomasa |
| Mezclada e el espacio | <ul style="list-style-type: none"> • Árboles en potreros • Introducción de pastos y animales en plantaciones forestales |
| Localizada en el espacio | <ul style="list-style-type: none"> • Cercas vivas • Bancos de proteína⁵ |

⁵ LEON, M. Sistemas agroforestales. Bogotá: Editorial gente nueva, 1993. p.15.

1.1.3.3.1. Árboles en linderos. Un lindero es plantar árboles maderables en líneas o hileras junto con cultivos o pastos para producir madera⁶.

Un sistema de linderos puede ser establecido en la finca bajo diversas modalidades, es decir en los límites exteriores de la finca, en las divisiones interiores de una finca y en algunos casos se justifica la línea de árboles maderables en un campo agrícola⁷. Su función principal es demarcar límites. Además de generar varios productos y servicios (frutas, madera, forraje, sombra, embellecimiento de fincas y caminos veredales⁸.

Esta tecnología agroforestal podría presentar gran potencial productivo además de diversificar el paisaje, controlar la erosión, promover la vida silvestre, fomentar el manejo biológico de poblaciones de insectos, acumular CO₂, entre otros. Por ejemplo, en fincas pequeñas y medianas, en los varios miles de metros de perímetro entre lotes y caminos internos y veredales, esta tecnología agroforestal podría prestar innumerables favores a habitantes rurales y visitantes, además de embellecer los monótonos y áridos paisajes de muchas fincas y parajes⁹.

Esta tecnología agroforestal presenta arreglo temporal simultáneo. La disposición horizontal del componente vegetal leñoso es zonal, generalmente en filas, siguiendo bordes de lotes, fincas y caminos rurales: también se presenta el caso de árboles que marcan límites en arreglo mezclado. La disposición vertical es biestratificada o multiestratificada. Los animales cuando se presentan, pueden hacerlo de manera simultánea o con periodos de ausencia, con variable densidad poblacional. Es una tecnología principalmente de autoabastecimiento¹⁰.

1.1.3.3.1.1. Motivos para plantar árboles en linderos.

- Producir madera en cualquier finca.
- Separar mediante una hilera de árboles los límites de la finca.
- Aprovechar las chapeas que se hacen para mantener limpios los límites de la finca.

⁶ CAMACHO, A y GONZALES, J. Linderos maderables. Turrialba, Costa Rica: Centro de Investigación y Enseñanza Tropical CATIE. (Serie materiales de enseñanza; no. 31). 1995. 28 p.

⁷ BEER, J. Consideraciones básicas para el establecimiento de especies maderables en linderos. Turrialba, Costa Rica: Centro de Investigación y Enseñanza Tropical CATIE. (Serie generación y transferencia de tecnología; no1). 1993.11p.

⁸ OSPINA, Op. Cit., p. 95.

⁹ Ibid., p. 54.

¹⁰ Ibid., p. 54.

- Hacer más linda la propiedad.
- Cambiar postes muertos de la cerca o árboles de poco valor por otros más valiosos.
- Producir postes.
- Producir madera en menos tiempo que en plantaciones en bloque. Los árboles en linderos crecen más rápido que árboles en plantaciones en bloque.
- Producir madera sin quitarle terreno al cultivo.

1.1.3.3.1.2. Cómo escoger la clase de árboles a plantar en linderos.

- Los árboles deben dar uno o varios productos de valor comercial: como madera de aserrío, postes para cerca o tendido eléctrico, leña, etc.
- Deben crecer rápido en altura.
- Preferiblemente que dejen caer las ramas de abajo conforme vayan creciendo de manera natural; a esto se le llama “autopoda”.
- Buscar informes sobre las tasas de crecimiento en la zona donde se van a plantar.
- Que sean conocidos en la zona.
- Que haya semilla o arbolitos disponibles.
- Que sean resistentes a plagas y enfermedades.
- Que crezcan rápido y que no necesiten un manejo intensivo¹¹.

2.1.3.3.1.3. Criterios par seleccionar sitios para establecer linderos.

- **Protección y cuidado de árboles jóvenes.** Es más fácil establecer arbolitos alrededor de una siembra agrícola que entre dos potreros donde el riesgo de daño físico causado por el ganado, es alto.
- **Competencia con cultivos.** Seleccionar sitios donde la competencia con cultivos sea mínima.
- **Condiciones de sitio.** Hay especies que dan muy buen resultado en sitios húmedos (p.e. Roble sabana) y en suelos de potreros compactados (p.e. Acacia y en menor grado Teca). El laurel no da buen resultado en estas circunstancias. Hay que seleccionar especies aptas para cada sitio. Lo cual puede indicar la necesidad de seleccionar diferentes especies para diferentes secciones de un mismo lindero.

¹¹ CAMACHO y GONZALES, Op. Cit., p. 4-7.

- **Factibilidad de aprovechamiento.** Sitios cerca de un río en un guindo, no son deseables para siembras comerciales debido al riesgo de problemas legales y los costos. Como en cualquier reforestación el dueño debe tener la seguridad de aprovechar el producto. Por lo tanto es importante estar al día con las regulaciones pertinentes y tener seguridad sobre la tenencia de la tierra.
- **Fertilidad del suelo.** Los gobiernos y empresas grandes generalmente establecen sus plantaciones en suelos no aptos para agricultura aceptando un turno de mediano a largo plazo. Los finqueros quieren un turno más corto y es mejor empezar con linderos en buenos suelos donde hay mayor probabilidad de conseguir resultados satisfactorios.
- **Sombra lateral.** La presencia de sombra lateral de un charral o un cacaotal abandonado ha sido en muchos casos beneficiosa para mejorar la forma de árboles sembrados en linderos, sin embargo cuando se presenta de un lado solamente. Puede ser desfavorable porque los árboles crecen en forma inclinada. Además si hay exceso de sombra lateral los árboles desarrollan un tallo alto y delgado que es muy susceptible a sufrir daños por vientos cuando se elimina la sombra lateral.
- **Recursos del dueño.** Muchos programas de reforestación han fracasado por falta de mantenimiento de las plantaciones. En las zonas húmedas lo más importante es el control a tiempo de las malezas durante los dos primeros años. Si no hay recursos para cuidar muchos árboles, se debe sembrar menos.

Con una selección apropiada de la especie, el nivel de tecnología requerida no es tan exigente¹².

2.1.3.3.1.4. Derechos y deberes en los linderos. Es importante conocer la legislación escrita o verbal, sobre deberes y derechos en linderos. En ciertos países (a veces, depende de la localidad dentro del país), los vecinos comparten los costos (establecimiento y mantenimiento) y los beneficios de un lindero (ej. frutas). En otros casos, solo comparten beneficios. En calles públicas, las municipalidades y organismos gubernamentales tienen derechos sobre los árboles, por ejemplo, los podan y desopan para salvaguardar el tendido eléctrico. El hurto de las frutas desaconseja el uso de frutales en estos segmentos. Las

¹² BEER, Op. Cit., p. 9.

especies ornamentales y setos de porte bajo se utilizan en estos segmentos para aislamiento visual, bloquear el polvo de los caminos, ornamentación, etc¹³.

1.2 ACACIA



Figura 1. *Acacia mangium* en lindero Guabito1 (Panamá).

1.2.1 Clasificación taxonómica.

Reino: *Plantae*
Filo: *MAGNOLIOPHYTA*
Clase: *Magnoliopsida*
Orden: *Fabales*
Familia: *Leguminosae*
Género: *Acacia*
Especie: *mangium*¹⁴.

¹³ SOMARRIBA, E. El análisis y mejoramiento de las plantaciones lineales de una finca. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 8, no. 30, 2001; p. 56-57.

¹⁴ INBIO. [en línea]. 2000. [Citado el 16 de julio de 2006]. Disponible en internet: <http://www.inbio.ac.cr/bims.html>

1.2.2 Características ecológicas y climáticas.

- **Descripción del árbol:** es una especie pionera y heliófita de rápido crecimiento, que en su hábitat natural alcanza de 25 a 30 m de altura y diámetros de hasta 90 cm. El tronco es generalmente recto y libre de ramas hasta las dos terceras partes de su altura total. No obstante, en plantaciones tiende a producir más de un eje y a bifurcarse. Tiene copa redonda si está aislado.

En plantaciones cerradas, las ramas de la parte inferior caen naturalmente después de cierta edad, dejando un fuste columnar. Presenta un follaje característico, con pecíolos aplanados o filodios, con apariencia de hojas enteras, que en árboles bien sanos alcanzan gran tamaño (hasta 25 cm).

Generalmente florece a finales del período lluvioso. Las inflorescencias aparecen por centenares, sobre espigas de hasta 10 cm de largo; las flores son pequeñas, blancas o de color crema. Cinco a siete meses después se producen las vainas, retorcidas y angostas, que llegan a tener 10 cm de largo.

- **Origen y distribución:** es originaria del noreste de Australia, Papúa-Nueva Guinea y las islas Molucas, donde se le encuentra en sitios de baja altitud en las fajas de tierra arriba de los manglares y a lo largo de los ríos. Ha sido ampliamente plantada en muchos países tropicales asiáticos y las islas del Pacífico. En América Central, la especie fue introducida en Costa Rica en 1979; luego se establecieron parcelas de investigación en Costa Rica, Panamá y Honduras en 1984.
- **Temperatura:** en su área de origen, la temperatura oscila entre 12 y 34 °C. En América Central se ha plantado en sitios con un rango de 21 a 27 °C.
- **Altitud:** la especie presenta mayor potencial en tierras bajas tropicales. Se ha plantado desde 30 msnm en Panamá, hasta 1100 msnm en Costa Rica.
- **Precipitación:** es una especie de clima húmedo y muy húmedo; en su hábitat ordinario, la precipitación media anual varía de 1000 mm hasta más de 4500 mm. Los mejores sitios con precipitación de 1500 a 3100 mm. Puede soportar hasta tres meses de sequía.
- **Suelos:** mangium no es exigente en suelos, ya que se adapta y crece en forma satisfactoria en condiciones difíciles de suelos (infértiles y compactados). Puede desarrollarse en suelos erosionados, con pendientes fuertes, rocosos o muy ácidos (hasta pH=4,0). Evidentemente presenta mejores crecimientos en suelos fértiles y sueltos. Responde bien a las

aplicaciones de fertilizantes químicos (nitrógeno y fósforo). No soporta suelos encharcados. Al igual que otras leguminosas, mangium realiza simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, las cuales fijan nitrógeno que puede ser utilizado por el árbol.

- **Madera:** es vetada, de color café claro con bandas más oscuras. Es moderadamente pesada, tiene gravedad específica de 0.60 g/cm^3 ; es de fácil secado y permite buen acabado. Es lustrosa, ideal para trabajos de ebanistería, construcción ligera, carpintería y construcciones rurales. También se utiliza para la preparación de contrachapado (*Plywood*) y pulpa para papel. En plantaciones establecidas en buenos sitios y con buen mantenimiento, puede llegar a tener un rendimiento de $27 \text{ a } 40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, a los cuatro años. En suelos degradados el rendimiento es menor¹⁵.

1.3 TECA



Figura 2. *Tectona grandis* en lindero Hone Creek (Costa Rica).

¹⁵ CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA. Mangium (*Acacia mangium* Willd): Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE. (Serie Técnica. Informe técnico no.196; Colección de Guías Silviculturales no.5), 1992. 58 p.

1.3.1 Clasificación taxonómica.

Reino: *Plantae*
Filo: *MAGNOLIOPHYTA*
Clase: *Magnoliopsida*
Orden: *Lamiales*
Familia: *Verbenaceae*
Género: *Tectona*
Especie: *grandis*¹⁶.

1.3.2 Características ecológicas y climáticas.

- **Descripción del árbol:** es grande, deciduo y de copa circular, bajo condiciones favorables, alcanza hasta 50 m de altura en su lugar de origen. En América Central alcanza alturas de hasta 30 m con diámetros de 2 m. Desarrolla un tallo limpio, alto y cilíndrico. A menudo con gambas en la base de las ramas cuadrangulares y acanaladas a 85 cm de longitud y de 6 cm a 50 cm de ancho.

De Hojas opuestas ovaladas, acanaladas, grandes, ásperas en la superficie y brillantes en el envés con puntos glandulares pequeños de color rojo en hojas jóvenes que luego cambian a negro. Su tamaño varía de 11 a 85 cm de longitud y de 6 cm a 50 cm de ancho.

Las flores en pánicula terminales de color blanco, pequeñas y numerosas. Aparecen de junio a septiembre, en la estación lluviosa.

Los frutos en drupas pequeñas de color castaño claro. Maduran en Costa Rica de Noviembre a enero y se recolectan de diciembre a febrero¹⁷.

- **Distribución geográfica:** teca es originaria de Birmania, India, Tailandia e Indonesia. En América fue introducida en Trinidad, Bélice, República Dominicana, Cuba, Costa Rica, Colombia, Venezuela, Haití, México, Brasil, Perú, El Salvador, Honduras, Nicaragua.
- **Zonas de vida:** tiene un ámbito variado de zonas de vida: Bosque seco Tropical (bs-T), Bosque húmedo Premontano (bh-PM), Bosque muy húmedo Premontano (bmh-PM), Bosque húmedo Tropical (bh-T).
- **Altura:** en América Central se ha plantado desde el nivel del mar hasta los 600 msnm.

¹⁶ INBIO, Op. Cit.

¹⁷ CHAVES y FONSECA, Op. Cit., p. 4.

- **Temperatura:** en América Central se ha cultivado en lugares con temperaturas promedio entre los 23 y los 28 °C. Su máximo desarrollo se encuentra se alcanza entre los 22 y los 28 °C. Esta especie no resiste heladas.
- **Precipitación:** la precipitación óptima está en el rango de 1200 a 2500 mm año⁻¹. En América Central se encuentra en sitios con precipitación entre 885 y 3150 mm. Su rango natural de precipitación está entre los 500 y los 5000 mm. En General gusta de un periodo de verano de 3 a 5 meses de duración.
- **Suelos:** prefiere suelos neutros, aunque tolera suelos ácidos y calcáreos. Su pH puede variar de 6 a 7.5. Prefiere un suelo franco arenoso o ligeramente arcilloso, no tolera suelos arcillosos pesados. Requiere de suelos fértiles. Su drenaje, debe ser bueno con un nivel freático de por lo menos un metro de profundidad. Prefiere suelos profundos, porosos entre 100 y 140 cm, con alta capacidad de intercambio catiónico. Está especie no soporta inundaciones.
- **Limitantes:** suelos con riesgo de anegamiento, suelos pesados o con mal drenaje, suelos poco profundos o con capas endurecidas son limitantes para la especie¹⁸.
- **Propiedades tecnológicas de la madera:** esta especie se clasifica como muy pesada, con un peso específico básico promedio de 0.61g/cm³.

La velocidad de secado es moderadamente rápida, presentándose pocos y leves defectos en la superficie y los extremos. El trabajarla es fácil. Esta madera es reconocida por su alta resistencia al ataque de organismos xilófagos.

- **Usos recomendados:** en construcción marina en general, madera contrachapada, juguetería, madera torneada y tallada, muebles y gabinetes, cercas, marcos de puertas, ventanas y carpintería en general¹⁹.

¹⁸ KEOGH, R. The care and management of teak (*Tectona grandis* L.F.) plantations, citado por LUJAN, R y CAMACHO, A. Manejo y crecimiento de linderos: resultados de ensayos del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ de tres especies maderables en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba: CATIE, 1994. p 4.

¹⁹ CARPIO, M. Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales, San José, C.R.: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1992. 338 p.

1. 4 CALIDAD DE SITIO E ÍNDICE DE SITIO

Se entiende por **sitio** a un “área considerada en términos de sus factores con referencia a la capacidad de producir bosques u otra vegetación; lo que es la combinación de las condiciones bióticas, climáticas y edáficas de un área”.

Se entiende por **calidad de sitio** a “la combinación e interacción de los factores bióticos y abióticos con la vegetación existente”. En el caso forestal, se estima como la máxima cosecha de madera o biomasa que el bosque produce en un tiempo determinado.

Se entiende por **índice de sitio** a “la estimación de la altura dominante (Hdom) que los árboles dominantes (100 árboles más altos por hectárea) de una plantación coetánea alcanzan a una edad en particular, conocida como una edad base”²⁰.

1.4.1 Importancia de la calidad del sitio en el manejo forestal. En la actualidad muchas de las operaciones de manejo forestal no consideran la calidad de sitio y la productividad, por lo que varias inversiones han resultado en fracasos y pérdidas de dinero por ser realizadas en sitios cuyas características no ofrecen las condiciones ideales para el desarrollo óptimo del bosque, tanto desde el punto de vista ecológico como productivo.

La clasificación productiva de un sitio es una información indispensable para asegurar el aprovechamiento racional y sostenido de un bosque²¹.

1.4.2 Principales objetivos de evaluar la calidad de sitio.

- Estimación del rendimiento global de las plantaciones forestales.
- Planificación y ejecución de trabajos de investigación.
- Programación y ejecución de trabajos de mantenimiento de las plantaciones.

²⁰ ALFARO, M. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el Valle Central de Costa Rica. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Nacional. Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar, Escuela de Ciencias Ambientales, 1983. 132 p.

²¹ Ibid.

- Extrapolación o extensión en la clasificación de la calidad de sitio áreas aún sin plantar para selección de sitios a plantar.
- Selección de los mejores genotipos (especies y procedencias) para uno o más sitios en particular.

Además se le considera que contribuye en la planificación a nivel sectorial para tomar decisiones en cuanto a la autorización de actividades de manejo y repoblación forestal²².

1.4.3 Métodos de evaluación de la calidad de sitio. Los métodos de evaluación de calidad de sitio, se dividen en métodos directos e indirectos.

1.4.3.1. Métodos directos.

- Determinación de volumen o altura del rodal. Es difícil de interpretar, salvo que el rodal se encuentre cercano a una edad clave o de rotación usada como comparación.
- Registro histórico de desarrollo y rendimiento. Cada vez es más frecuente que las empresas conserven toda la información de inventarios sucesivos. Estos datos están desprovistos de todo supuesto y su error es reducido.
- Intercepción, basada en la medición de longitudes internodales de un cierto número de años de crecimiento después de que el árbol haya alcanzado 1.3 m. Algunos autores recomiendan alturas mayores que 2 y 3 m.
- Análisis fitosociológico o fisionómico de la vegetación presente en el área²³.

El método directo, que presenta un mayor costo, se basa en la medición de la masa existente y en el desarrollo de tablas de rendimiento normal, para rodales con un monitoreo continuo de su desarrollo y crecimiento. Este método ha sido aplicado en países con una larga trayectoria forestal, donde la información requerida ha sido recabada en múltiples rotaciones.

Este método tiene el inconveniente de ser afectado por factores tales como la edad y el turno, la composición de las especies, aspectos patológicos y del

²² ALFARO, Op. cit.

²³ PRODAN, M. *et al.* Mensura forestal. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible / IICA, ISSN 1027-2631; no. A1/SC-97-01, no. 1), 1997. 586 p.

bosque; el tipo de interacciones silvícolas o cortas aplicadas al bosque, los factores genéticos, la capacidad productiva innata de los terrenos y la densidad del rodal²⁴.

1.4.3.2. Métodos indirectos. Estos métodos conducen a la obtención de índices de sitio o productividad a través de análisis de regresión en tres formas diferentes.

- Determinación de características propias de los árboles consideradas sensibles a la calidad del sitio.
- Medición de uno o más del medio que se consideran como íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles.
- Una combinación de las anteriores²⁵.

Los métodos indirectos, usados de manera habitual son aplicables a países con un avanzado desarrollo forestal, ya que son menos onerosos al no estimar directamente el volumen, sino una variable de más fácil medición y estrechamente correlacionada con el; dicha variable es la altura dominante²⁶. Pueden ser diferenciados en tres: índice de sitio dasométrico, índice de sitio vegetacional e índice de sitio ambiental²⁷.

- **Índice de sitio dasométrico.** Para la construcción del índice de sitio dasométrico, es necesario medir tanto la altura como la edad de los árboles presentes en los rodales a ser evaluados.

²⁴ PRODAN. Op. Cit, p.370.

²⁵ Ibid.

²⁶ GREEN, R., MARSHALL, P.; y KLINKA, K. Estimating site index of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb] Franco) from Ecological variables in Southwestern British Columbia. Citado por VALLEJOS, O. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1996.147 p

²⁷ VICENT, L. Manejo de plantaciones forestales con fines de producción, citado por REYES, C. Estimación del incremento en *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* a partir de variables del árbol y factores de sitio en un bosque secundario en Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1997. 119 p.

- **Índice de sitio vegetacional.** El método consiste en asociarle un índice de sitio a un área definida, donde se presenta predominancia de una cierta especie, la cual es considerada como “indicadora” de la calidad de sitio.
- **Índice de sitio ambiental.** Existen algunas situaciones en las cuales la vegetación no puede ser usada como indicador de la calidad del sitio o de la productividad forestal como es el caso de las áreas deforestadas, intervenciones por faenas agrícolas, forestales o ganaderas u otro tipo de alteraciones. En estos casos se puede efectuar un análisis de los factores del medio ambiente que influyen en el área con el objeto de estimar la calidad de sitio.

1.4.4 Determinación de la edad base. Un aspecto fundamental en la construcción de una familia de curvas de índice de sitio, es la determinación de la edad base; la cual se define como la edad a la que se cuantifica y se fija el índice de sitio²⁸. La edad índice, se fija generalmente con base a la longevidad de la especie estudiada. El principio básico es usar una edad base fija, con el objeto de diferenciar alturas que a su vez sirvan para valorizar la calidad del sitio en estudio²⁹.

En la elección de la edad base se deben tomar los siguientes criterios: que sean suficientes años para distinguir diferentes índices de sitio con precisión aceptable, que se ubique al final del turno de la especie, que esté bien representada con los datos de crecimiento disponibles; que se ajuste, hasta donde sea posible, con las edades base utilizadas en otros estudios similares³⁰.

²⁸ REVOLORIO, A. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 1996.141 p.

²⁹ CASTAÑOS, M. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula*, en el norte de Oaxaca, citado por REVOLORIO, A. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 1996.141 p.

³⁰ HEGER, L. A method of constructing site-index curves from stem analyses, citado por REVOLORIO, A. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 1996. 141 p.

1.4.5 La altura como indicador de la calidad de sitio. La altura es una de las herramientas a la cual se le atribuyen las siguientes ventajas:

- Es una medida de diferencias en los sitios porque a diferencia de los otros parámetros dasométricos (dap y área basal). Casi no es influenciada por tratamientos de manejo y por lo tanto expresa mejor la condición del sitio.
- La altura es hasta cierto grado independiente de la densidad y la mezcla de especies.
- La relación altura edad es fácil de determinar³¹.

La altura dominante, se define como la altura promedio de los cien árboles más altos por hectárea. Es una manifestación de la productividad del sitio relativamente independiente de la densidad, ya que los árboles más altos son los más desarrollados y por consiguiente los que sufren menos competencia de sus vecinos³². Es un buen parámetro indicador del potencial productivo de un sitio determinado, y está integrada al concepto de sitio mundialmente utilizado en este tipo de ecosistemas. Para que la altura dominante sea considerada un buen indicador del potencial productivo del sitio es necesario minimizar la variación dentro de la parcela y maximizar la variación entre parcelas³³.

La altura promedio y el diámetro no se consideran buenos indicadores, debido a que son más sensibles a cambios en la densidad del rodal, que la altura dominante³⁴.

1.4.6 Curvas de índice de sitio. Se han propuesto diferentes métodos para desarrollar funciones de sitio, que varían según el principio aplicado, el tipo de datos, el método de construcción y el modelo empleado³⁵. La mayoría de los métodos de evaluación de la calidad de sitio, basados en datos de la altura del rodal, involucran el uso de curvas de índice de sitio. Estas son una familia de

³¹ ALDER, D. Estimación del volumen Forestal y Predicción del rendimiento. En: FAO Montes. Roma (Vol 2), no 22/2; 80 p.

³² VICENT. Op. Cit.

³³ HÄGGLUND, B. Evaluation of forest site productivity, citado por HERRERA, B y CAMPOS J. Avances en la investigación sobre la calidad de sitio en bosques secundarios tropicales. En: Revista forestal centroamericana CATIE. Costa Rica, nº 19 (Abr- Jun1997). p. 13-19.

³⁴ CURTIS, R. y REUKEMA, D. Crown development and site estimates in a Douglas - fir plantation spacing test. En: Forest Science. EE.UU, 16 (3); 1970 p. 287-300.

³⁵ PRODAN, Op. Cit., p. 371.

patrones gráficos de desarrollo de la altura a una edad determinada, a las cuales se asocian símbolos o números con propósitos de referencia³⁶.

El método de la curva guía, es un método muy aceptado para los estudios de calidad de sitio, este comprende los siguientes pasos:

- Desarrollar una ecuación para estimar la altura dominante con base en la edad, la cual define la curva guía.
- Seleccionar entre los modelos de intercepto común y pendiente común para definir una familia de curvas de índice de sitio.
- Aplicar el modelo seleccionado para calcular el índice de sitio para cada parcela³⁷.

1.4.7 Clasificación del sitio. Para clasificar las plantaciones desde el punto de vista práctico, éstas se estratifican en clases de sitio, para facilitar su manejo posterior estas clasificaciones no pueden ser muchas debido a la multiplicidad de unidades que saldrían y considerando esto se definieron tres clases de sitio:

- **Alto.** Agrupa plantaciones con el mejor crecimiento, superior al promedio, sitios con mayor potencial económico.
- **Medio.** Sitios buenos, alrededor del promedio, con manejo apropiado tendrían buena oportunidad de ser rentables.
- **Bajo.** Sitios por debajo del promedio, considerados como marginales, difícilmente rentables que no deberían ser recomendados para ser plantados³⁸.

³⁶ CLUTTER, J.; FORTSON, J; PEINAR,.; BRISTER, H. y BAYLEY, R. Timber magement, citado por REVOLORIO, A. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, 1996. 141 p.

³⁷ HUGHELL, D. Lineamientos para el desarrollo de modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de árboles de uso múltiple. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido. Área de Producción Forestal y Agroforestal. Turrialba, Costa Rica, 1991. 131 p.

³⁸ VASQUEZ, C. y UGALDE, A. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica, citado por VAIDES, E. Características de sitio que determinan el crecimiento y la productividad de teca (*Tectona grandis* L. F.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Turrialba Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2004. 81 p.

1.5 CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

El crecimiento es el cambio en tamaño del parámetro (altura, diámetro, volumen, etc.), durante un periodo de tiempo definido (también conocido como el incremento)³⁹.

En la producción de madera el crecimiento se considera en relación al fuste o parte utilizable del árbol. Generalmente se expresa en diámetro, altura, área basal, o en algunos casos, pulpa en peso de árboles individuales, rodales⁴⁰.

El crecimiento de los árboles individuales está influenciado por sus características genéticas y su interrelación con el medio ambiente, factores climáticos y de suelo y características topográficas (calidad de sitio). Además de estos factores, la competencia es un factor muy importante y el más controlable a través del manejo silvicultural⁴¹.

El rendimiento es el crecimiento acumulado del parámetro, desde la edad "0" hasta la edad de evaluación a una edad específica⁴².

1.5.1 Tipos de crecimiento. Para tener un significado específico del término de crecimiento se le debe clasificar de acuerdo con:

- Parámetro o variable considerado
- Período de tiempo considerado
- Porción o parte del rodal considerado⁴³.

A la cantidad de crecimiento en un periodo de tiempo determinado se le llama incremento. Por analogía se habla del incremento de una masa o bosque, diferenciándose tres tipos de incremento:

³⁹ HUGHELL, Op. Cit., p.431.

⁴⁰ VICENT, Op. Cit., p. 119.

⁴¹ PRODAN, Op. Cit., p. 431.

⁴² HUGHELL, Op. Cit.

⁴³ PRODAN, Op. Cit., p. 431.

Incremento medio anual (IMA): Es el promedio anual del incremento total. Se obtiene dividiendo el rendimiento de un árbol o de un rodal entre su edad

Incremento corriente anual (ICA): Es el crecimiento alcanzado por un árbol o un rodal en un año.

Incremento total (IT): Es el crecimiento de un árbol o un rodal a lo largo de toda su vida⁴⁴.

1.5.2 Modelos de crecimiento y rendimiento. El modelo es una expresión matemática, desarrollada con base en los datos de parcelas de crecimiento (la información empírica) y conocimientos biológicos de las especies (procesos lógicos del sistema), que estima el valor de un parámetro de la masa arbórea, como la altura, el diámetro, la biomasa o un conjunto de parámetros⁴⁵.

Es una abstracción y simplificación de un proceso natural que permite su estudio y su análisis. El modelo puede estar constituido por uno o varios gráficos, una o más tablas, una o múltiples ecuaciones y uno o más subsistemas⁴⁶.

Modelo de crecimiento se considera efectivo si está expresado en función de variables predictoras fáciles de medir, con un coeficiente de determinación relativamente alto, por arriba de 0.8. Mientras menor número de variables predictoras estén implicadas en un modelo, más apropiado es para ser usado; con muchas variables predictoras, el modelo se vuelve muy sensible a las relaciones entre ellas, especialmente, si algunas de esas variables están altamente correlacionadas⁴⁷.

Los modelos de rendimiento se derivan de relaciones estocásticas entre las variables dependientes (altura, área basal, número de árboles, volumen) y un conjunto de variables independientes predictoras del estado del desarrollo de un rodal, como por ejemplo la edad y el índice de sitio⁴⁸.

⁴⁴ VICENT, Op. Cit.

⁴⁵ HUGHELL, Op. Cit.

⁴⁶ PRODAN, Op. Cit., p. 431.

⁴⁷ ALDER, Op. Cit., 80 p.

⁴⁸ PRODAN, Op. Cit., p. 455.

Los principales **propósitos** para elaborar modelos de crecimiento y rendimiento son los siguientes:

- Estimar la producción futura, para determinar el turno óptimo y realizar análisis financieros y económicos;
- Estimar el crecimiento bajo condiciones donde no existan datos;
- Comparar alternativas de manejo para analizar el uso de la tierra;
- Simular prácticas silviculturales;
- y sintetizar hipótesis, conocimientos y datos experimentales en una expresión inteligible, del comportamiento de los bosques (modelos ecológicos)⁴⁹.

1.5.2.1. Modelo de crecimiento de Shumacher. Un modelo general que ha recibido gran aceptación para describir el rendimiento y el crecimiento de árboles individuales y masas forestales es el de Shumacher. Basado en principios biológicos, el cual produce ecuaciones compatibles de rendimiento y crecimiento.

El Modelo tipo Shumacher se basa en la hipótesis de que el crecimiento relativo tiene una relación con el cuadrado de la edad:

$$d(y)/d(t) = (b/t^2) Y \quad (a),$$

en donde:

Y puede ser altura, dap, volumen o cualquier otro parámetro de la masa forestal

t= edad

b= constante

La notación **dy/dt** representa el cambio instantáneo de Y con respecto a t.

La integral con respecto a la edad de la ecuación de crecimiento produce la siguiente **ecuación de rendimiento**⁵⁰:

$Y = e^{a-b/t}$ (b), que sustituyendo en la ecuación (a) se tiene la **ecuación de crecimiento**:

$$d(y)/d(t) = (b/t^2) e^{a-b/t}$$

⁴⁹ HUGHELL, Op. Cit.

⁵⁰ Ibid.

1.6 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Modelajes del cambio climático global sugieren que la calidad del manejo forestal puede hacer una contribución sustancial a controlar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. Actividades de uso de la tierra y bosques que pueden contribuir incluyen: conservación de bosque en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, reforestación o promoción de agroforestería⁵¹.

Los sistemas agrosilviculturales, silvopastoriles y agrosilvopastoriles pueden, en diversos grados, mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y en los suelos; de hecho la agroforestería tiende a prácticas sostenibles de bajos insumos que minimicen la alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el ciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a almacenar bancos de carbono que son estables por décadas o siglos⁵².

La implementación de proyectos agroforestales puede ser justificada por múltiples razones:

- Incrementan el carbono en el suelo aumentando además la sostenibilidad y la productividad de los mismos.
- El costo financiero de secuestrar carbono mediante proyectos agroforestales es mucho más bajo que otras formas de mitigación⁵³.

⁵¹ FUNDACIÓN SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, 2000. 33 p.

⁵² KURSTEN, E y BURSCHEL, P. CO₂-mitigation by agroforestry: water, air and soil. *Pollution* 70: 533-534. Citado por: AVILA, G. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa Educación para el Desarrollo y la Conservación. Costa Rica, 2000, p. 11.

⁵³ ROJAS, J. Secuestro de carbono y uso de agua en Sistemas Silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de educación para el desarrollo y la conservación, Escuela de postgrado. Turrialba, Costa Rica, 2005. 71 p.

Las reservas de carbono en varias partes del mundo enseñan que significantes cantidades pueden ser removidas de la atmósfera en los próximos 50 años si los sistemas agroforestales son implementados en forma global⁵⁴.

1.7 CAMBIO CLIMATICO

El clima es el resultado de la combinación e interacción de todos los elementos meteorológicos que se dan en una región; es decir, presión atmosférica, humedad, vientos, nubosidad, precipitaciones y temperatura, este último es sin duda, el elemento fundamental en la determinación del clima.

Hoy en día es comúnmente aceptado que el fenómeno conocido como “cambio climático” constituye uno de los principales problemas medioambientales de los que ha de afrontar la Humanidad en el presente siglo⁵⁵.

El cambio climático afecta directamente a muchas áreas productivas y de servicios, pero indirectamente afecta a toda la humanidad y a toda forma de vida en el planeta, las áreas de mayor impacto son: agricultura, bosques, ecosistema terrestre, ecosistema marino, hidrología y fuentes de agua, salud humana, infraestructura y servicios financieros⁵⁶.

El cambio climático probablemente ha de tener un efecto significativo en el medio ambiente mundial. En general, cuanto más rápido cambie el clima, mayor será el riesgo de daños. Se prevé que el nivel medio del mar aumente de 9 a 88 cm para el año 2100, y cause inundaciones en las zonas de tierras bajas, así como otros daños. Las zonas climáticas podrían desplazarse hacia los polos y verticalmente, perturbando los bosques, desiertos, praderas y otros ecosistemas no sujetos a ordenación. Como resultado, muchos han de reducirse o fragmentarse, y algunas especies concretas podrían extinguirse⁵⁷.

⁵⁴ ALBRECHT y KANDJI. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems, citado por ROJAS, J. Secuestro de carbono y uso de agua en Sistemas Silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de educación para el desarrollo y la conservación, Escuela de posgrado. Turrialba, Costa Rica. 2005. 71 p.

⁵⁵ Estrategia Española sobre el cambio climático para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto. Vol. 3. No.3 (diciembre del 2003). Madrid. Adoptado por la comisión permanente. 220 p.

⁵⁶ SEMINARIO MERCADO DEL CARBONO (1o. : 2000: Chile). Actas del seminario mercado del carbono: FONDEF, UACH-INFOR; 2000, 61 p.

⁵⁷ TÖPFER, Klaus, *et al.* Cambio climático. Suiza: PNUMA-UNFCCC, 2004. 65 p.

1.7.1 Causas del cambio climático: gases de efecto invernadero y fuentes de emisión. Los cambios en el clima derivados de la actividad humana son debidos a la intensificación del efecto invernadero natural, al aumentar la concentración atmosférica de los gases radiactivamente activos y provocar lo que se conoce como un forzamiento radiactivo.

El clima de la tierra está influido por un flujo continuo de energía procedente del sol que llega principalmente en forma de luz visible. Cerca del 30% se dispersa inmediatamente y vuelve al espacio, pero la mayor parte del 70% restante atraviesa la atmósfera para calentar la superficie de la tierra.

La tierra debe devolver esta energía al espacio en forma de radiación infrarroja. Los “gases de efecto invernadero” en la atmósfera impiden que la radiación infrarroja escape directamente de la superficie al espacio.

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, el metano, el óxido nitroso y los halocarbonos y otros gases industriales. Aparte de los gases industriales, todos estos gases se producen naturalmente. En conjunto representan menos del 1% de la atmósfera. Ello es suficiente para producir un “efecto de invernadero natural” que mantiene el planeta unos 30 °C más caliente de lo normal, lo que es esencial para la vida que conocemos.

Las principales fuentes de emisión de los gases del efecto invernadero son:

- Emisiones procedentes de los combustibles,
- procesos industriales,
- utilización de disolventes y
- cambio del uso de la tierra y silvicultura⁵⁸.

1.7.2 IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) establecieron en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El IPCC es un órgano intergubernamental que proporciona asesoramiento científico, técnico y socioeconómico a los usuarios a nivel mundial y, en particular, a las Partes de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) cuyo número sobrepasa los 170.

⁵⁸ TÖPFER, Op. Cit., 68 p.

1.7.3 La Convención sobre el Cambio Climático. La Convención de Cambio Climático es un acuerdo de las Naciones Unidas para estabilizar la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, al nivel que prevenga cambios peligrosos en el clima. La Convención de Cambio Climático fue acordada en la Conferencia de Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en Río en el año 1992. A la fecha, 186 países han ratificado la Convención.

La Convención estableció algunos principios normativos. En virtud del principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas” de los Estados, se asigna a los países desarrollados la iniciativa de combatir el cambio climático y sus efectos adversos. Los países industrializados asumen varios compromisos específicos. La mayoría de los miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) más los Estados de Europa Central y Oriental conocidos colectivamente como países del Anexo I (entre ellos Alemania, Australia, Austria, Dinamarca, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Luxemburgo, Noruega), se comprometieron a adoptar políticas y medidas destinadas a restablecer sus emisiones de gases de invernadero en los niveles de 1990 para el año 2000.

El órgano supremo de la Convención es la Conferencia de las Partes (CdP). La CdP está formada por todos los Estados que han ratificado o se han adherido a la Convención (188 hasta julio de 2003). La CdP podrá contraer nuevos compromisos a través de enmiendas y protocolos a la Convención; en diciembre de 1997 adoptó el Protocolo de Kyoto en el cual que se detallan los objetivos vinculantes en materia de emisiones para los países desarrollados⁶⁰.

1.7.4 Protocolo de Kyoto. El Protocolo de Kyoto fue adoptado en diciembre de 1997, su aspecto más relevante es el compromiso legal de 39 países desarrollados de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un promedio de 5.2 %, con respecto a los niveles de emisiones que tenían en el año 1990. Esta reducción de emisiones debe ser lograda en el período 2008-2012: llamado “Primer Período de Compromiso”. Los países desarrollados que deben cumplir con esas metas de reducción de emisiones son los llamados países Anexo I⁶¹.

1.7.5 Mecanismos de la Convención Marco del Cambio Climático (CMCC). El protocolo de Kioto estableció 3 mecanismos para facilitar lograr los objetivos de la CMCC, y ayudar a los países industrializados alcanzar sus límites, éstos

⁶⁰ TÖPFER, Klaus, Op. Cit., 68 p.

⁶¹ Ibid.

⁶² FUNDACIÓN SOLAR, Op. Cit., 33 p.

conjuntamente se llaman “mecanismos flexibles”. Estos mecanismos son: Implementación Conjunta, el Mecanismo de Desarrollo Limpio y el Intercambio de Emisiones y Créditos. En términos de proyectos de fijación de carbono en países en desarrollo, el Mecanismo de Desarrollo Limpio es el mecanismo flexible mas relevante⁶².

1.7.5.1. Mecanismo de desarrollo limpio (MDL). El Mecanismo de Desarrollo Limpio, definido en el Artículo 12 del Protocolo, tiene un doble objetivo: ayudar a las Partes Anexo I a cumplir con sus compromisos cuantificados de reducción; y lograr el desarrollo sostenible de las Partes no incluidas en el Anexo I (China, India, República de Corea, México, México, Sudáfrica, Brasil, Arabia Saudita, Irán, Indonesia, Rep. Dem. Popular de Corea).

Este mecanismo ofrece a los Gobiernos y a empresas privadas de países desarrollados nuevas vías para transferir tecnologías limpias y promover el desarrollo sostenible en países en desarrollo mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o de fijación de carbono, recibiendo a cambio, certificados que podrán contabilizar como suplemento a sus reducciones internas. Este mecanismo merece una especial consideración dado el interés que tiene tanto para contribuir a reducir emisiones futuras en los países en desarrollo como para potenciar nuestra capacidad de transferencia de tecnologías limpias⁶³.

Para usar el Mecanismo de Desarrollo Limpio se debe demostrar que el proyecto sea adicional a lo que hubiese sucedido sin el apoyo del MDL y que tenga el apoyo del gobierno anfitrión. Dentro de las actividades elegibles en el MDL, agroforestería y forestación integrada con proyectos energéticos tienen beneficios sociales considerables. El futuro del mercado global de carbono dependerá básicamente de los proyectos de MDL, por parte de las compañías y de los países del norte⁶⁴.

1.7.5.1.1. Importancia del MDL para el sector del uso de la tierra. El impacto humano sobre los suelos y los bosques es también un factor clave, con aproximadamente el 25% del total de las emisiones de CO₂ causadas por la tala de bosques. Sin embargo, la plantación de árboles o la regeneración de ecosistemas boscosos remueve el CO₂ atmosférico a medida que la vegetación crece, en un proceso llamado “secuestro o fijación de carbono”. (Alrededor del 50% del peso seco de la vegetación boscosa es carbono).

⁶³ AUCKLAND, L. *et al.* [En línea]. Colocando los cimientos para el desarrollo limpio: preparando al sector del uso de la tierra. [Citado el 4 de junio de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.capacity.org>. p. 39

⁶⁴ FUNDACIÓN SOLAR, Op. Cit., 33 p.

El MDL es el único Mecanismo de Flexibilización que incluye a los países en desarrollo. Le permite a los países desarrollados cumplir con parte de sus compromisos de reducción de emisiones a través de proyectos en países en desarrollo, que reduzcan emisiones o fijen o secuestren CO₂ de la atmósfera⁶⁵.

1.8 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES

La capacidad de captar carbono es un “producto” que se puede vender. La oportunidad de un negocio nace a partir de una ecuación, según la cual energía solar + CO₂+ agua = oxígeno + azúcares, en donde se produce oxígeno, se captura CO₂ y lo transforma. Esta es la ecuación de un proceso natural llamado fotosíntesis mediante el cual se puede atacar limpia y naturalmente el problema del cambio climático⁶⁶.

El pago por servicios ambientales puede representar una oportunidad de captar fondos del exterior mediante captura de carbono y las posibilidades de acuerdos para la utilización de biodiversidad con fines farmacéuticos, así como también de captación de ingresos internos provenientes de la venta de servicios ambientales como la protección del recurso hídrico para consumo y generación de energía eléctrica, entre otros. La idea de un mecanismo de Pago por Servicios ambientales, en este sentido, reconoce el esfuerzo adicional que el productor realiza en una producción cuyo objetivo es tanto la producción de bienes agrícolas que comercializará, así como la de servicios ambientales⁶⁷.

1.9 FINANCIACIÓN DE LA ACCIÓN EMPRENDIDA EN VIRTUD DE LA CONVENCIÓN

El “mecanismo financiero” de la Convención es una importante fuente de financiación. Su papel es transferir fondos y tecnología a los países en desarrollo sobre la base de subvenciones o en condiciones de favor. La CdP ha encomendado esta función al Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), establecido en 1991.

⁶⁵ TÖPFER, Op. Cit., 65 p.

⁶⁶ SEMINARIO MERCADO DEL CARBONO, Op. Cit., 81 p.

⁶⁷ ALARCÓN, L., *et al.* Costos de prácticas agrícolas para la generación de Servicios Ambientales en El Salvador. El Salvador: PRISMA. 2001. 23 p.

El FMAM sufraga la “totalidad de los gastos adicionales convenidos” de proyectos para proteger el medio ambiente mundial. Los proyectos deben ser dirigidos por los países y basados en prioridades nacionales que fomenten el desarrollo sostenible. Inicialmente el FMAM cubría tres ámbitos de atención: Cambio climático, diversidad biológica, aguas internacionales y (sólo para los países de Europa oriental y del Asia central) protección de la capa de ozono. Con posterioridad su mandato se ha extendido para incluir las actividades para combatir la degradación de la tierra y contaminantes orgánicos persistentes.

Las propuestas de financiación se presentan al FMAM a través de una de los tres organismos de ejecución. El PNUD, el PNUMA y el Banco Mundial cumplen cada una de ellas una función específica en la promoción de proyectos y el apoyo de los procesos del FMAM. La secretaría del FMAM supervisa el programa de trabajo y ayuda a asegurarse de que los proyectos se ajustan a las decisiones de la CdP y a las estrategias y políticas de programación del Fondo. Una vez aprobados, los proyectos son ejecutados por una amplia gama de organismos, tales como ministerios gubernamentales, organizaciones no gubernamentales (ONG), órganos de las Naciones Unidas, instituciones multilaterales regionales y empresas privadas⁶⁸. En general, entre 1995 y 2003 el FMAM asignó aproximadamente 1.250 millones de dólares para 179 proyectos de mitigación de los gases de efecto invernadero⁶⁹.

1.10 FUNDAMENTO LEGAL PARA EL PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES EN COSTA RICA

El Pago de Servicios ambientales se puso en marcha en Costa Rica en 1996, con la Ley Forestal no 7575. Esta es una medida novedosa para valorar las actividades forestales por los servicios que prestan a la sociedad. El PSA, constituye un nuevo eslabón en una larga cadena de herramientas de política para fomentar la actividad forestal y detener la deforestación en el país⁷⁰.

⁶⁸ TÖPFER, Op. Cit., 65 p.

⁶⁹ Ministerio de Medio Ambiente Español. Convención Marco de las Naciones Unidas: los diez primeros años p 40-41. [Citado el 1 de Octubre de 2007]. Disponible en Internet: http://unfccc.int/resource/docs/publications/first_ten_years_sp.pdf.

⁷⁰ CAMPOS, J., *et al.* Almacenamiento de carbono y conservación de biodiversidad por medio de actividades forestales en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica: potencialidades y limitantes, Turrialba (Costa Rica): CATIE. Unidad de manejo de bosques naturales. (Serie técnica informe técnico; no. 314). 2000. 70 p.

La Ley estableció un mecanismo de compensación a los propietarios de bosques y plantaciones forestales por los servicios ambientales de mitigación de gases con efecto invernadero, y protección de la biodiversidad, ciclo hidrológico y belleza escénica, que generan las actividades de protección, conservación y manejo de bosques naturales y plantaciones forestales (Art. 69). Se paga PSA a los propietarios de áreas comprendidas entre 2 y 300 ha dedicadas a la protección, manejo de bosque y regeneración natural, y para 1 ha o más de reforestación o manejo de plantaciones. Las solicitudes se tramitan ante la Administración Forestal del Estado (AFE) a través de las oficinas regionales, en forma individual o conjunta, o por medio de organizaciones debidamente acreditadas⁷¹.

El pago se ejecuta por medio de títulos valores (certificados) o mediante dinero efectivo, según la fuente de recursos. Los montos a cancelar se reajustan cada año para los nuevos contratos, y para ellos se toma como elemento mínimo de ajuste el Índice de Precios al Por Mayor del Banco Central de Costa Rica (Reglamento Ley Forestal 7575, Art.102); sin embargo, una vez firmado el contrato con un propietario en particular, los montos establecidos mantienen su valor hasta completar los cinco años de vigencia del contrato⁷².

1.11 CONTABILIDAD DE CARBONO

A través de la fotosíntesis, las plantas capturan CO₂ de la atmósfera, fijando C en la biomasa y liberando oxígeno. La biomasa está definida como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema y normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea (ton/ha) de peso seco.

Los factores de reducción involucran el contenido de carbono (proporción) en biomasa seca. El IPCC (1996) asumió como valor promedio 50% para especies arbóreas, lo que quiere decir que por cada gramo de materia seca, 0.50 gramos corresponden a C⁷³.

Se reconocen 5 diferentes depósitos donde se acumula carbono en el ecosistema forestal:

⁷¹ ALFARO, M. Revista Forestal Centro Americana. Turrialba, Costa Rica. No 19 Año 6, 1997. p. 11-14.

⁷² CAMPOS, *et al*, Op. Cit.

⁷³ CALDERO, S., *et al*. Inventarios forestales para contabilidad de carbono: manual de procedimientos. Valdivia, Chile. UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE- FONDEF- INFOR. 2002. 38 p.

- En la biomasa sobre el suelo que considera los árboles, la vegetación arbustiva y la vegetación herbácea.
- En la biomasa bajo el suelo, que se refiere a las raíces de vegetación del ecosistema estudiado, tanto de los árboles como de sotobosque.
- En la hojarasca, que es la capa de material orgánico (hojas, ramillas, raíces, etc) no descompuesto y cuyas formas se pueden reconocer a simple vista, también llamada mantillo o litera.
- En la necromasa, que se refiere tanto a los árboles muertos en pie, como a los caídos, también troncos y todo el material muerto que se encuentra en el ecosistema.
- En el suelo el cual es considerado por el IPCC (1996) hasta una profundidad de 30 cm, debido a que el cambio de uso de la tierra tiene un mayor efecto en los estratos superiores.

Los árboles en el ecosistema forestal son el componente más importante en lo que se refiere a la cantidad de biomasa y carbono que pueden almacenar. Por esta razón es el muestreo de los árboles donde se debe poner más énfasis⁷⁴.

1.12 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA

El contenido de biomasa puede ser estimado a través de métodos directos e indirectos.

- **Método directo.** Consiste en medir las dimensiones básicas de un árbol, cortarlo y determinar la biomasa a través del peso directo de cada uno de sus componentes (raíces, fuste, ramas y follaje).
- **Método indirecto.** Es utilizado cuando el árbol es de dimensiones muy grandes, que es lo usual en bosques naturales, se usan los métodos de cubicación y estimando el volumen de las trozas con las fórmulas de Smallian, Huber, entre otros; al final se suman estos volúmenes para obtener el volumen total del fuste o de las ramas gruesas. Se toman

⁷⁴ UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción de mercado mundial: inventario de biomasa y contabilidad de carbono. Valdivia, Chile, 2002. p. 1.

muestras del componente del árbol y se pesan en el campo, luego se calculan en el laboratorio los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir la gravedad específica verde y la gravedad específica seca⁷⁵.

- **Método sencillo.** En cuanto a la cuantificación de carbono, existen formas muy precisas para su cálculo pero también se han desarrollado formas simples para esta etapa inicial de análisis. Los métodos más sencillos aplicados en Costa Rica son de bajo costo y fáciles de aplicar. Para realizar las estimaciones se realiza lo siguiente:
 - Se cuantifica el volumen de madera existente por hectárea en el campo. Este volumen se convierte por medio de la densidad específica de la madera en biomasa seca.
 - Se cuantifica, si se considera pertinente para el proyecto, la biomasa existente en el follaje, ramas y raíces. Se calcula la biomasa seca de estos componentes.
 - Se determina la biomasa total por hectárea o solo la de los fustes dependiendo del enfoque del proyecto⁷⁶.

1.13 CARBONO ALMACENADO Y FIJADO

El carbono almacenado hace referencia a la cantidad de carbono que se encuentra en un ecosistema vegetal, en un determinado momento. El carbono fijado, se refiere al flujo de carbono dentro de una unidad del área cubierta con vegetación, en un lapso de tiempo dado⁷⁷.

⁷⁵ SEGURA, M. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999.119 p

⁷⁶ ALFARO, Op.cit., 111 p.

⁷⁷ SEGURA, M. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis* en un Bosque de altura en la cordillera de Talamanca. Trabajo de grado (Lic. Ingeniero Forestal). Universidad de Heredia. Turrialba, Costa Rica 1997. 34 p

1.14 ANTECEDENTES DEL PROYECTO CATE/GTZ DE ARBOLES MADERABLES EN LINDEROS

Entre septiembre de 1988 y junio de 1989 se ejecutó el proyecto agroforestal “Arboles maderables en linderos”, propuesto entre el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (CATIE/GTZ), los linderos fueron establecidos en fincas ubicadas en Costa Rica (C.R.) y Panamá.

1.14.1 Tipo de ensayo, mediciones y espaciamiento. Los linderos se establecieron con base en un diseño estadístico de bloques completos al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. Cada lindero fue dividido en tres secciones lineales; dentro de cada sección se establecieron tres parcelas con un promedio de 24 árboles espaciados a 2.5 m; la ubicación de las especies en cada parcela fue al azar.

En Talamanca (C.R.), los ensayos incluyen teca (*Tectona grandis*), acacia (*Acacia mangium*) y laurel (*Cordia alliodora*), en Panamá teca (*Tectona grandis*), acacia (*A. Mangium*) y roble marfil (*Terminalia ivorensis*), especies a las cuales se les ha hecho mediciones cada seis meses en los dos primeros años desde 1989 y luego mediciones anuales hasta 1999.

Las mediciones de los árboles incluyeron: sobrevivencia, altura total, diámetro de copa, diámetro a la altura del pecho a 1.30 m (dap), forma del fuste y ramificación⁷⁸.

1.14.2 Establecimiento. La preparación del sitio incluyó una chapia de 3 m a cada lado del lindero y la eliminación de árboles y arbustos dentro de esta franja. En algunos casos hubo necesidad de destroncar. El ahoyado se realizó en forma manual. Para el control de malezas a lo largo de la franja (6 m), se combinaron métodos manuales (chapias) y químicos (aplicación de herbicidas)⁷⁹.

1.14.3 Resiembras y mortalidad. Las resiembras contabilizadas representan el número de espacios vacíos o posiciones dentro del lindero donde se hizo

⁷⁸ LUJAN, R.; y CAMACHO, B. Manejo y crecimiento de linderos: resultados de ensayos del Proyecto agroforestal CATIE/GTZ de tres especies maderables en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, C.R.: Unidad de producción de medios CATIE. (Serie Técnica, Informe Técnico no.224). 1994. 9 p.

⁷⁹ LUJAN, R.; y CAMACHO, B., Op. Cit.

necesario reponer un árbol para lograr mantener la ocupación del distanciamiento inicial. Esta actividad se realizó durante los seis primeros meses.

1.14.4 Deshijas y podas. Solamente hubo deshijas en la teca (especie plantada por pseudoestaca) cuando los brotes alcanzaron alrededor de 1.5 m y se podía seleccionar el mejor. En los primeros dos años, durante las mediciones de los linderos, se podaron las ramas bajas de los árboles hasta una altura máxima de 6 m⁸⁰.

1.14.5 Estudio de suelos. En 1993, Nieuwenhuys⁸¹ realizó el análisis de suelos de los siete sitios experimentales, en laboratorios del CATIE y en el laboratorio de suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en Guadalupe, CR.

Los análisis físicos contienen datos de textura, densidad aparente y los análisis químicos datos de pH, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn, Ca, Mg, acidez intercambiable, Materia orgánica, N, CIC, Al, Fe. El mismo autor determina homogeneidad, altitud, posición fisiográfica, pendiente y uso de la tierra, drenaje, nivel freático, pedregosidad, erosión, profundidad, fertilidad, toxicidad de Cu, salinidad, zona de vida, periodo de sequía, neblina, viento y compactación.

1.14.2 Descripción de los sitios de estudio.

Linderos en Talamanca

- **San Rafael**, se encuentra en una cresta de loma, a una altitud de 175 msnm, es de topografía plana a ondulada, con pendiente del 3%. Su vegetación colindante es pastizal (*Ischaemum indicum*).

Su suelo se clasifica como *Aeric Tropaquept*, de fertilidad media, deficiente en Zn, es ácido (pH=4.1), de textura arcillosa, con drenaje pobre o lento y nivel freático mayor a 200 cm). Su mayor limitante es la acidez, la profundidad efectiva.

- **Bordon**, se localiza en una planicie costera, con pendiente del 1% y altitud de 10 msnm. Su vegetación colindante es cacaotal abandonado.

⁸⁰ LUJAN, R.; y CAMACHO, B., Op. Cit.

⁸¹ NIEUWENHUYSE, A. Los suelos de los sitios experimentales del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Guápiles, Costa Rica, 1994. 134 p.

Su suelo se clasifica como *Vertic/Aeric Tropaquept*, de textura arcillo-limoso, es fértil, ácido (pH=5.4) y con drenaje pobre a imperfecto. Tiene como limitantes la acidez y el drenaje imperfecto que provoca empozamiento.

- **Hone Creek**, Se encuentra en una planicie costera, a una altitud de 10 msnm y con una pendiente del 2%. Su vegetación colindante es cacaotal abandonado.

Su suelo se clasifica como *Fluvaquentic Eutropept*, es poco homogéneo, de fertilidad alta, medianamente ácido (pH=5.8); con drenaje y textura variable entre franco-arenosa y arcillosa a mayor profundidad. La capa freática es variable entre 40 cm (bloque 1) hasta 170 cm. Su limitante es el mal drenaje en algunos sectores.

- **Cocles**, Se localiza en una planicie costera, a una altitud de 3 msnm, tiene una pendiente de 3%. Su vegetación colindante es cacaotal abandonado.

Su suelo se clasifica como *Lithic Tropopsamment* (arena marina sobre coral), es fértil, neutro (pH=7.0), de textura franco-arenosa, con drenaje excesivo y su capa freática es de 170 cm⁸².

Linderos en Panamá

- **Guabito 1**, Se encuentra en la planicie de inundación del río Sixaola a una altitud de 10 msnm, tiene una pendiente promedio de 1%. Su vegetación colindante es bosque secundario joven.

Su suelo se clasifica como *Aquic Eutropept*, es homogéneo, aunque existen variaciones en drenaje, profundidad de la capa freática y textura del subsuelo. Es fértil, ligeramente ácido (pH=de 6.5) y su textura es franco-limosa. Su drenaje es imperfecto. Su limitante esta dado por la profundidad efectiva y un leve riesgo de inundación.

- **Guabito 2**, ubicado en la planicie de inundación del río Sixaola, a una altitud de 10 msnm, con pendiente de 1%. Su vegetación colindante es pastizal de gamalote (*Paspalum fasciculatum*).

Su suelo se clasifica como *Aeric Tropaquept*, es bastante homogéneo, de drenaje imperfecto y ligeramente ácido (pH=6.2). Es fértil, de textura franco-

⁸² LUJAN, Ricardo y CAMACHO, Op. Cit., p.4.

arcillo-limosa. Su drenaje es pobre y el nivel freático está a 145 cm. Sus limitantes son el drenaje y la compactación por el pisoteo del ganado.

- **El Silencio**, se encuentra en la planicie de inundación del río Changuinola, a una altitud entre 5 y 10 msnm y con una pendiente menor al 2%. Su vegetación colindante es pastizal.

Su suelo se clasifica como *Fluvaquentic Eutropet*, es fértil, homogéneo; es ligeramente ácido (pH=6.8), su textura es franco-areno-limosa y su horizonte A está compactado por el ganado. De buen drenaje y nivel freático a >200 cm. Tiene como limitante el riesgo de inundaciones⁸³.

⁸³ CAMACHO y GONZALES, Op. Cit. 21p.

2. METODOLOGÍA

2.1 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

La evaluación del crecimiento y el almacenamiento de carbono en los linderos de *Acacia mangium* y *Tectona grandis*, se efectuó en fincas del proyecto agroforestal “Arboles maderables en linderos”, ejecutado entre el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (CATIE/GTZ), de las cuales se seleccionaron siete: San Rafael, Cocles, Hone Creek, Bordon, Guabito 1, Guabito 2 y El Silencio. Las cuatro primeras pertenecientes al Cantón de Talamanca, Provincia Limón, al suroeste en Costa Rica y las tres siguientes al Distrito Changuinola, Provincia Bocas del Toro, al nor-este en Panamá.

2.1.1 Ubicación geográfica y condiciones climáticas. Los linderos de este estudio, se localizan entre los 9°38' y 9°71' de latitud Norte y 82°53' y 82°91' de longitud Oeste. Exceptuando al lindero de San Rafael, el cual se ubica en una cresta de montaña, los demás, se ubican en una planicie aluvial (Figura 3). Presentan altitud menor a 300 m, 2500 mm de precipitación anual, sin estación seca marcada y 1600 mm de evapotranspiración potencial. Su temperatura promedio anual es de 24 a 27 °C. Los linderos se registran en la Tabla 2 y se pueden detallar desde la Figura 4 a la Figura 10.

Tabla 2. Siete linderos maderables de *A. mangium* y *T. grandis*.

| Linderos | Nº de ensayo | Propietario | Posición fisiográfica |
|-------------|--------------|--------------------|-----------------------|
| San Rafael | 14 | Gerardo Rojas | Cresta de montaña |
| Cocles | 21 | Daniel Richard | Planicie aluvial |
| Hone Creek | 22 | Wolfgang Bissinger | Planicie aluvial |
| Bordon | 23 | Marcos García | Planicie aluvial |
| Guabito 1 | 62 | Carmelo Guerra | Planicie aluvial |
| Guabito 2 | 63 | Teodomilton Guerra | Planicie aluvial |
| El silencio | 64 | Diego Herrera | Planicie aluvial |

Figura 3. Ubicación de los linderos en Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá.



■ Bordon, ★ San Rafael, ◐ Hone Creek, ▲ Cocles, ■ Guabito 1, ● Guabito 2, ◆ El Silencio

Mapas de archivos de descripción de ensayos CATIE-GTZ, Enciclopedia Encarta 2007.

Figura 4. Esquema del ensayo de linderos maderables en San Rafael de Bordon (esc. 1 : 2000).

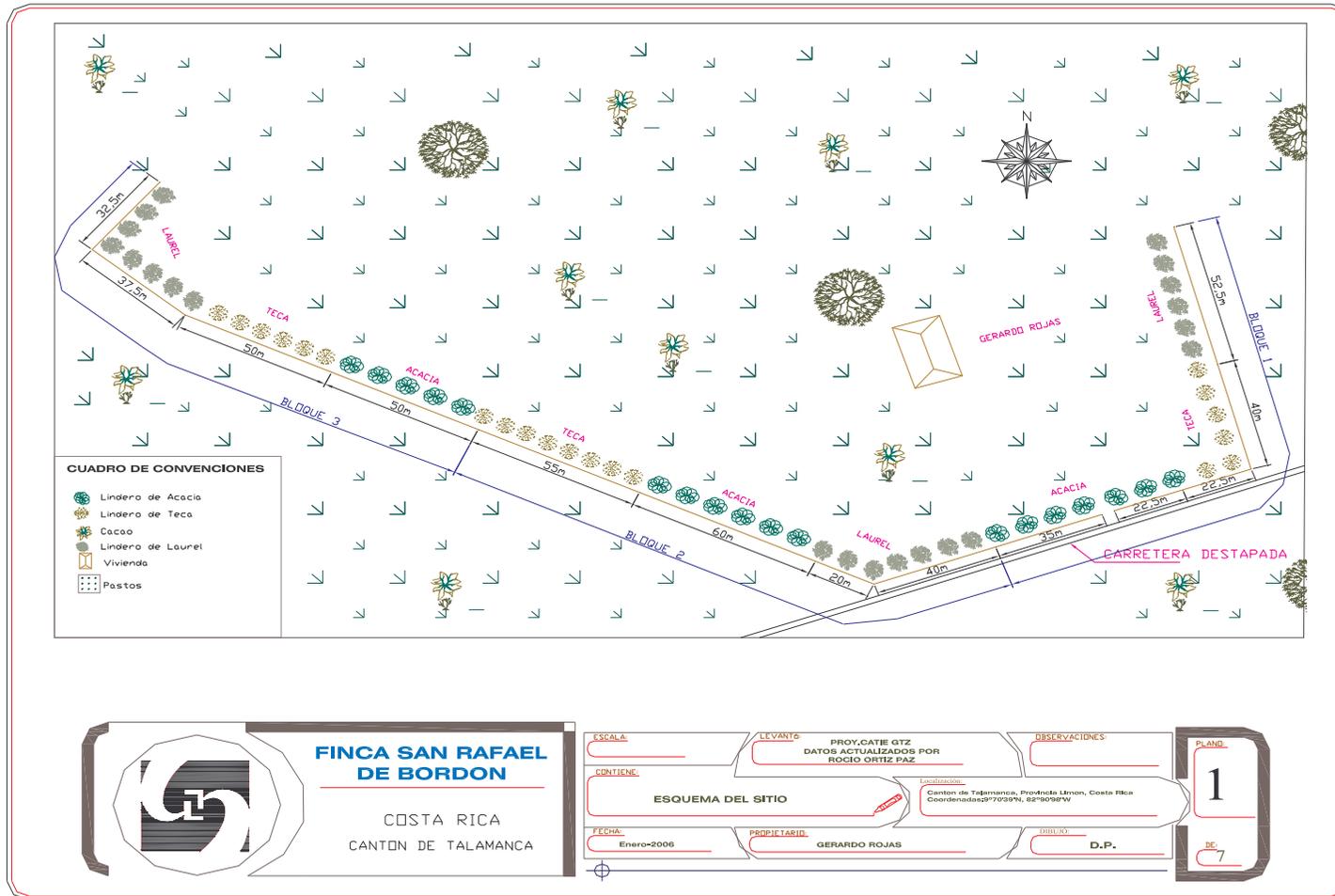


Figura 5. Esquema del ensayo de linderos maderables en Bordon (esc. 1 : 3000).

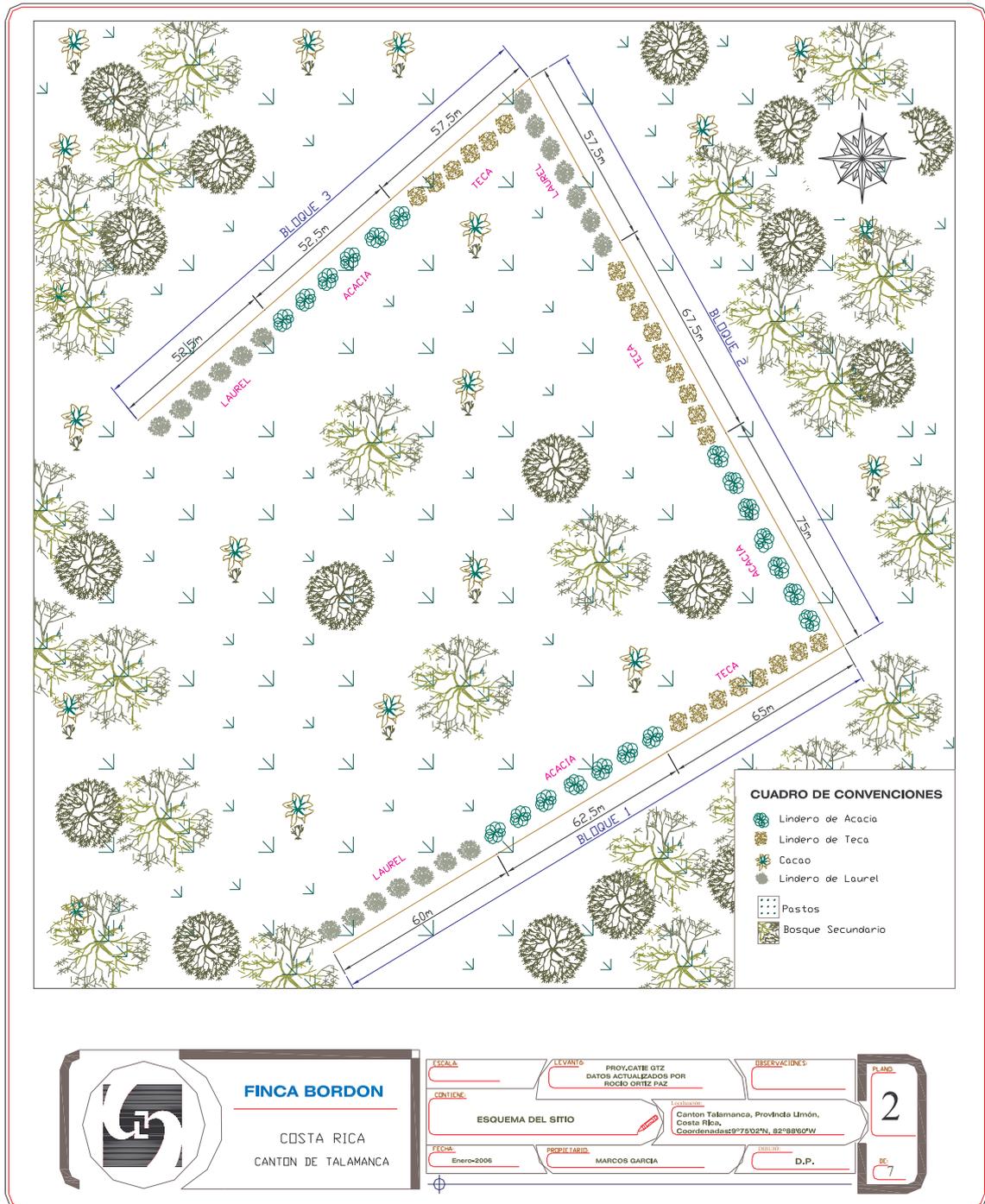


Figura 6. Esquema del ensayo de linderos maderables en Hone Creek (esc. 1: 2000).

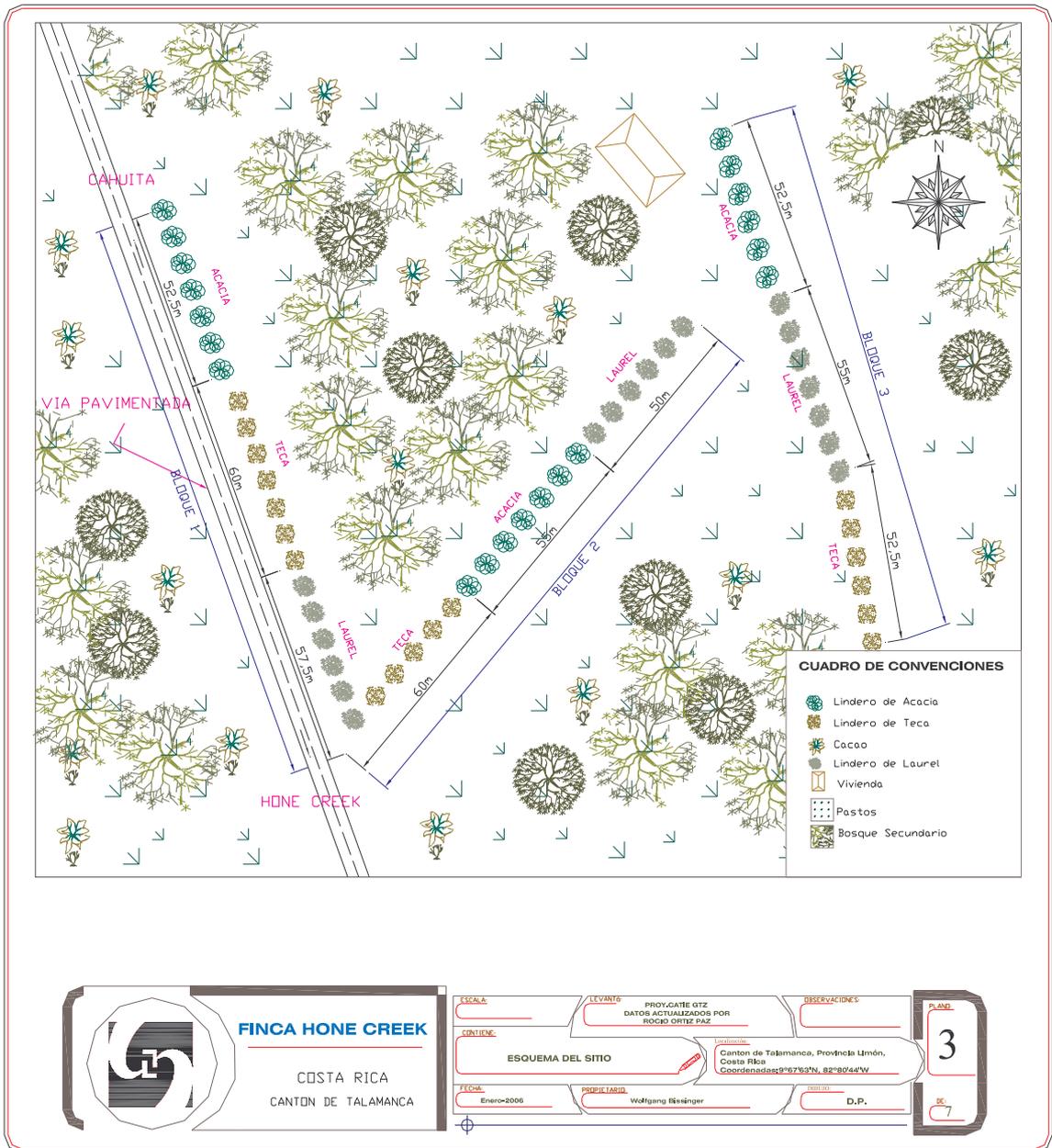


Figura 7. Esquema del ensayo de linderos maderables en Cocles (esc. 1: 2500).

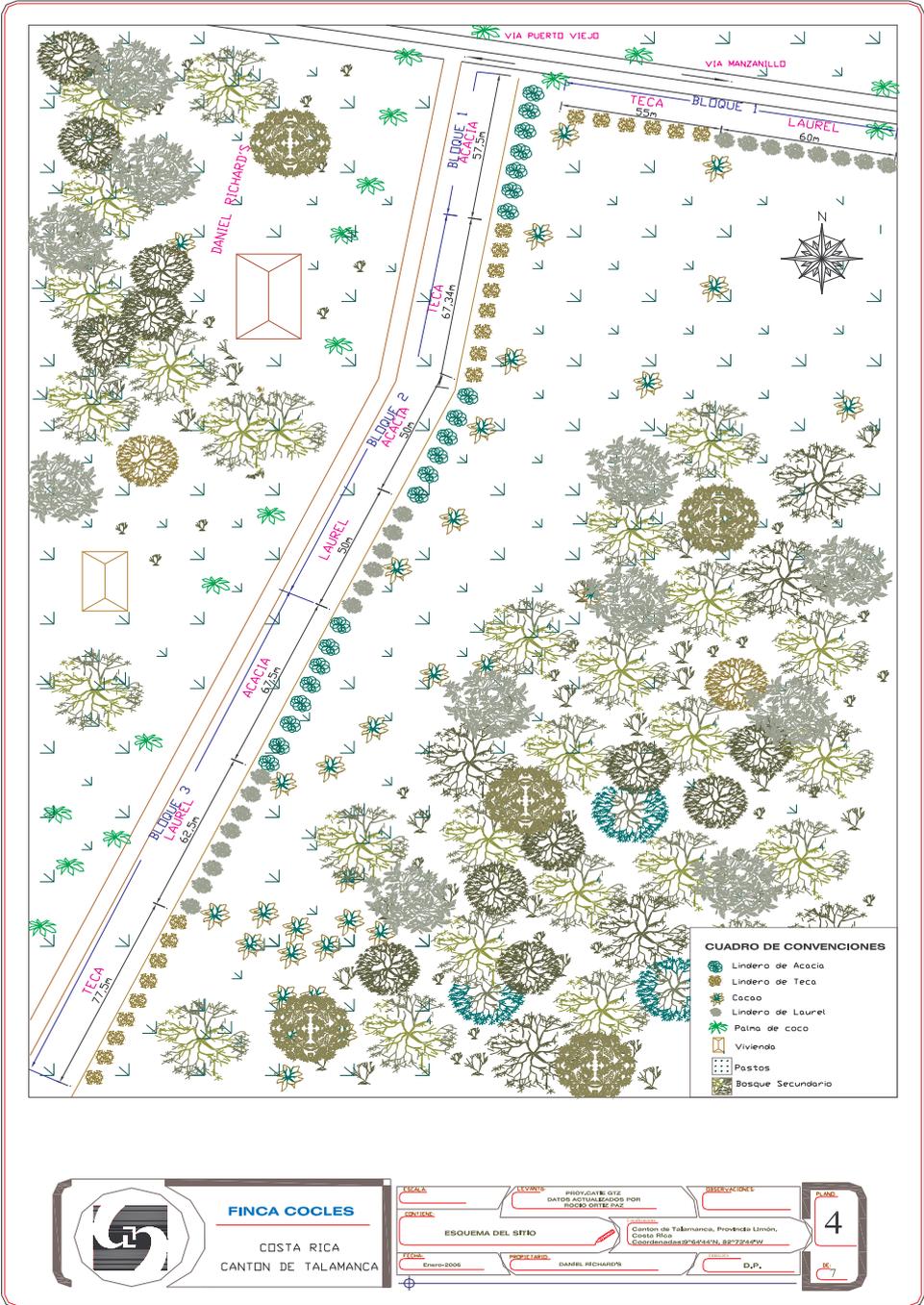


Figura 8. Esquema del ensayo de linderos maderables en Guabito 1 (esc. 1: 2400).

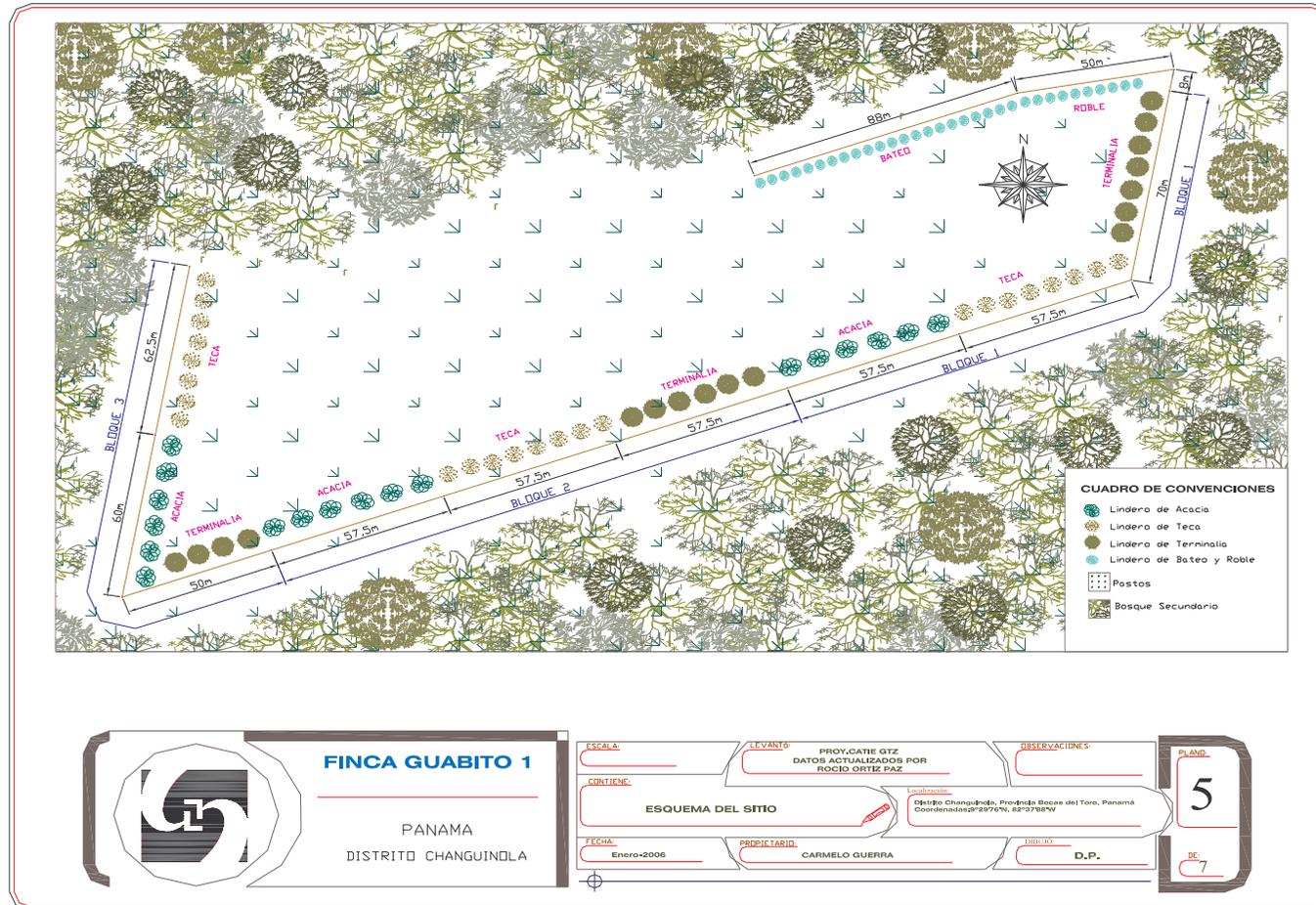


Figura 9. Esquema del ensayo de linderos maderables en Guabito 2 (esc. 1:3000).

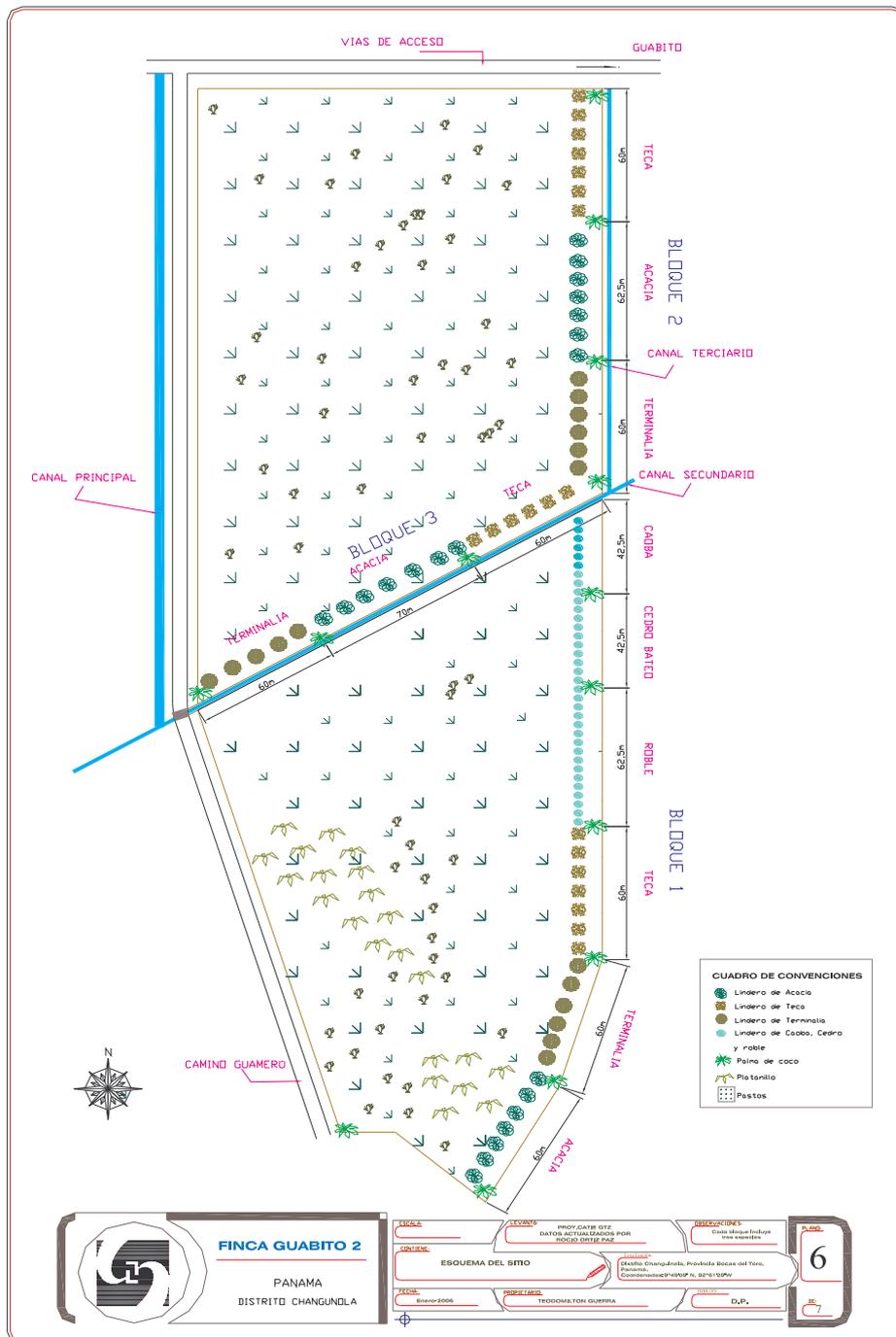
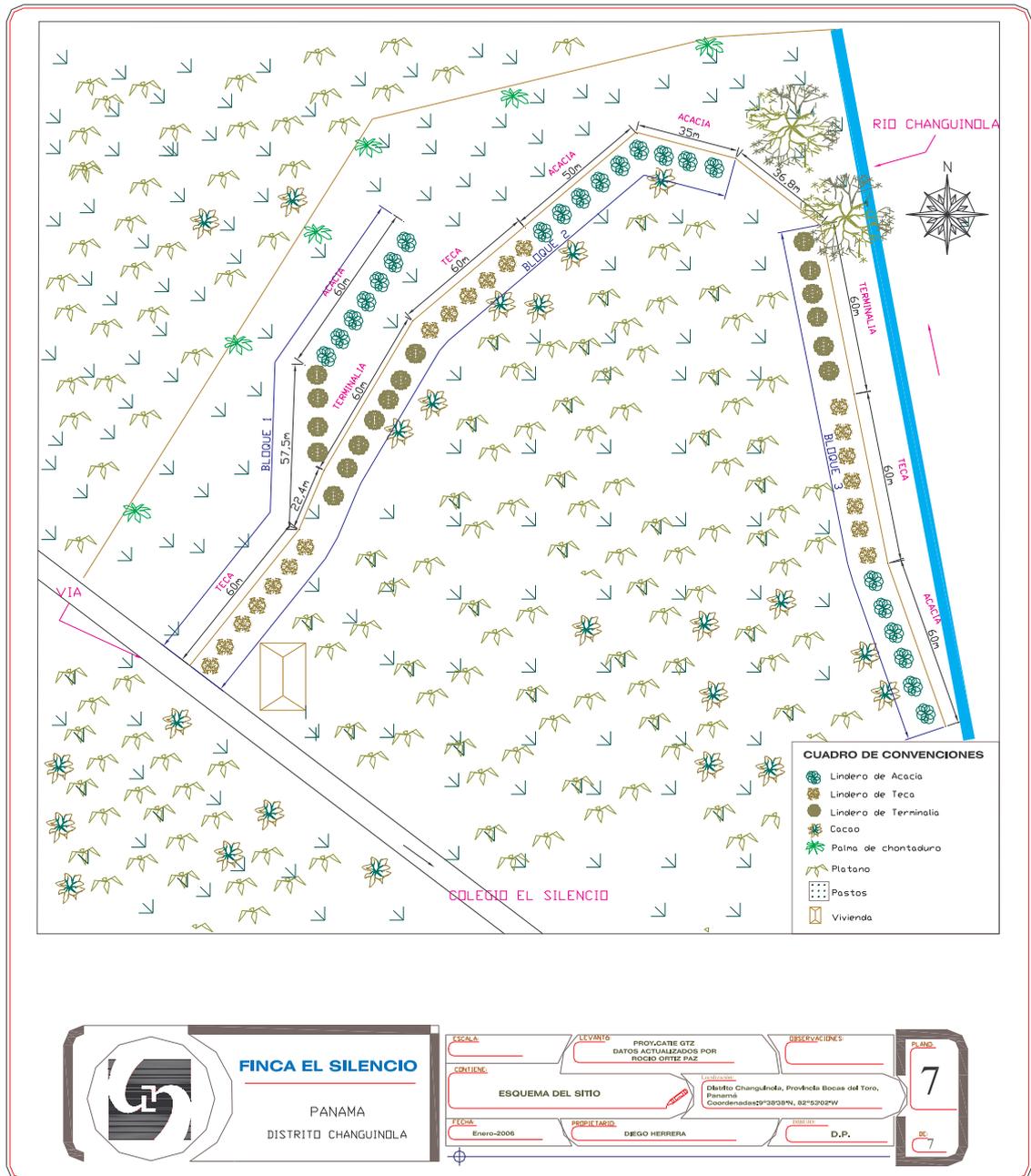


Figura 10. Esquema del ensayo de linderos maderables en El Silencio (esc. 1: 2400).



2.2 MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos planteados en el estudio, fue necesario dividir el trabajo en tres etapas principales:

- **Recolección de información**
- **Remediación de los linderos**
- **Labores de oficina**, que comprende: actualización y depuración de datos y, análisis de información.

2.2.1 Recolección de información. Se obtuvo información de los archivos de descripción, cronológico, manejo, inspecciones y de acciones correctivas del proyecto Linderos Maderables CATIE/GTZ. Además se contó con la base de datos de las variables altura y diámetro de especies plantadas en los linderos desde el año de 1989 hasta el año de 1999.

Con el propósito de tener representatividad y confiabilidad en los resultados de este estudio bajo condiciones predecibles, se seleccionó fincas con especies en común. Se identificó que los linderos con esta característica fueron los siete mencionados en cuyas plantaciones se había incluido a *A. mangium* y *T. grandis* L.F.

2.2.2 Remediación de los linderos en campo. Para actualizar la base de datos se volvió a medir los linderos de *A. mangium* y *Tectona grandis* considerando el siguiente procedimiento:

- **Orientación de las parcelas.** Los mapas de los ensayos encontrados en los archivos de descripción, sirvieron de guía para la ubicación y orientación de los linderos. Los ejes principales, la latitud, longitud y altitud fueron determinados con la utilización del GPS 12XL GARMIN No. 23823 y una brújula.
- **Mediciones dendrométricas.** El diámetro evaluado fue el diámetro a la altura del pecho de árboles en pie, la medición se realizó con la cinta diamétrica a 1.30 m sobre el suelo.

Para cuantificar la altura total y la altura comercial de los árboles se utilizó el clinómetro Code PM-5/360, PC SUUNTO.

El diámetro de copa brinda una idea de vigor de los árboles como también del grado de competencia que puede existir con los cultivos aledaños, este

se midió con la cinta métrica Truper TFC-30ME en dirección de los dos ejes perpendiculares norte-sur, este-oeste. Luego se obtuvo un promedio de los dos valores.

- **Marcación de los linderos.** Para señalar los linderos se aplicó pintura a una altura de 1.30 m alrededor del fuste de *Acacia mangium* y *Tectona grandis*. Se empleó pintura de color azul para árboles útiles y roja para árboles de borde.
- **Plaqueteo.** El plaqueteo de los árboles se realizó con placas de aluminio, que contienen la letra inicial de la especie en mayúscula con el número individual del árbol, seguidamente el número del bloque al que pertenece. Por ejemplo la placa A 16 - B3, indica que la especie encontrada es una *Acacia mangium*, que el número del árbol es 16 y, que se encuentra en el bloque tres. La placa se colocó en el árbol a una altura de 1.40 m, en dirección norte.

2.2.3 Labores de oficina. La etapa de gabinete comprendió: actualización y depuración de la base de datos y, análisis de la información.

2.2.3.1. Actualización y depuración de la base de datos. Con la información obtenida en campo se actualizó la base de datos del proyecto de árboles maderables en linderos hasta el año 2006. De esta base de datos se tabularon alturas y diámetros de *Acacia mangium* y *Tectona grandis* L.F. Para identificar inconsistencias, a estos datos se les realizó una depuración con base en el análisis gráfico de residuales, mediante el software estadístico Statgraphics 5.0. Se eliminó aquellos datos dudosos o no característicos de las condiciones generales presentes. Además de se detectaron tendencias entre las variables.

2.2.3.2. Análisis de la información. Se analizó variables como el diámetro a la altura del pecho en cm (dap), altura total en m (H), edad de los linderos en años, número inicial de árboles de cada especie plantados por kilómetro, número de árboles de cada especie existentes por kilómetro año⁻¹ (Nx). Con algunas de estas variables se estimó:

- Altura total promedio (Hp) en m
- Diámetro promedio (Dap) en cm
- Volumen total promedio con corteza (Vp) en m³ km⁻¹ año⁻¹, utilizando las siguientes fórmulas:

$Vp = \pi/4 * Dap^2 * Hp * Ff * (Nx)$, para *A. mangium* y,

$Vp = 0.000073 * (Dap)^{1.5588} * (Hp)^{1.2103}$, para *T. grandis*⁸⁴,

en donde:

Dap= diámetro a la altura del pecho (1.30 m),

Hp = altura total promedio en m;

Ff = factor de forma, en *A. mangium* igual a 0.4704⁸⁵.

Además, se calcularon las siguientes variables de crecimiento para todos las especies, edades y sitios:

- Incremento medio anual de altura promedio (IMAH), con la siguiente fórmula:

$$IMAHp = Hp/n^{\circ} \text{ de años}$$

- Incremento medio anual de diámetro promedio, con la fórmula dada a continuación:

$$IMADap = Dap/n^{\circ} \text{ de años}$$

- Incremento medio anual de volumen promedio, con la siguiente fórmula:

$$IMAVp = Vp/n^{\circ} \text{ años.}$$

2.2.3.2.1. Cálculo de la altura dominante. Siguiendo el lineamiento tradicional de los 100 árboles más altos por hectárea y el procedimiento optado por Valdivieso⁸⁶, quien tomó un árbol por cada nueve metros lineales en los linderos,

⁸⁴ PEREZ, D y KANNINEN, M. Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* L.F. en Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. No.39-40, 2002. p. 56-59.

⁸⁵ Estimados de rendimiento para la plantación de *Acacia mangium*. [en línea]. 2003. [Citado el 23 de agosto de 2007]. Disponible en internet: <http://www.3fkanguroid.com>

⁸⁶ VALDIVIESO, T. Crecimiento de laurel (*Cordia alliodora* [Ruíz y Pavón] Oken) como componente maderable de sistemas agroforestales en Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá. Trabajo de grado (Magister Scientiae), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, 1997. 70 p.

en este estudio, se tomó 15 árboles más altos a la edad base de cinco años de *A. mangium* y 19 árboles más altos a la edad base de 10 años de *T. grandis*, en 180 m que ocupan las tres repeticiones lineales.

Las alturas dominantes encontradas a la edad base de cinco años para *A. mangium* y de 10 años de edad para *T. grandis*, se exportaron de la hoja de cálculo Excel a Statgraphics 5.0 y con estas, se desarrolló una ecuación para estimar la altura dominante de cada especie, basada en la ecuación de Shumacher⁸⁷ (1):

$$\text{Ln (Hd)} = a + b/\text{edad}^k \quad (1),$$

en donde:

Hd= altura dominante

a, b, k son coeficientes que se estimaron por regresión.

2.2.3.2.2. Estimación directa del Índice de sitio por el método de la curva guía. Para estimar el índice de sitio de *A. mangium*, a una edad base de cinco años, se utilizó el modelo de intercepto común de Shumacher⁸⁸(2), dado a continuación:

$$\text{Ln (IS)} = a + [\text{Ln (Hd)} - a] * (\text{edad})^k / (\text{edad base})^k \quad (2),$$

en donde:

IS = Índice de sitio (m),

Hd = altura dominante (m),

Ln = logaritmo natural,

edad = edad del lindero (años);

edad base = edad base para calcular el índice de sitio y,

a y b = coeficientes que se estimaron por regresión en la ecuación (1).

Para estimar el índice de sitio de *T. grandis*, a una edad base de 10 años de edad se recurrió al siguiente modelo de pendiente común de Shumacher⁸⁹(3):

⁸⁷ HUGHELL, Op. Cit.

⁸⁸ Ibid.

⁸⁹ Ibid.

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hd)} + b (1/\text{Edad}^k - 1/\text{Edad base}^k) \quad (3),$$

en donde:

IS = Índice de sitio (m),
Hdom = altura dominante (m),
Ln = logaritmo natural,
edad = edad del lindero (años);
edad base = edad base para calcular el índice de sitio y,
a y b = coeficientes que se estimaron por regresión en la ecuación (1)

La altura dominante en los siete sitios, se reemplazó en (2) y en (3) para cada especie y, se obtuvo cuatro rangos de índices de sitio, que representan su calidad: **bajo**, que corresponde a sitios pobres, que numéricamente son sitios por debajo del promedio, difícilmente rentables. **Medio**, son sitios buenos, alrededor del promedio. Esta clase de sitio tiene buenas posibilidades de ser rentable con un manejo apropiado. **Alto**, significa plantaciones con buen crecimiento y superior al promedio, sitios con buen potencial económico y **muy alto**, son sitios con crecimiento muy bueno y superan el promedio.

La edad base de cinco años para *A. mangium*⁹⁰ y de 10 años de edad para *T. grandis*⁹¹⁻⁹², se fijó de acuerdo a los rangos de edad utilizados en los estudios reportados.

En literatura, se encontró los siguientes modelos de intercepto común para *A. mangium*⁹³ (4) y de pendiente común para *T. grandis*⁹⁴ (5):

⁹⁰ OLIVA, E. Comportamiento en Plantación de Mangium (*Acacia mangium* Willd) y Aripín (*Caesalpinia velutina* (B Y R) Standl) en America Central. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica. 1990. 117 p.

⁹¹ VAIDES, E. Características de sitio que determinan el crecimiento y la productividad de teca (*Tectona grandis* L. F.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 2004, 81p.

⁹² VALLEJOS, O. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Facultad de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Turrialba, Costa Rica. 1996, 147 p.

⁹³ OLIVA, Op. Cit.

⁹⁴ HUGHELL, Op. Cit.

$$\text{Ln (IS)} = 5.8369 + [\text{Ln (Hdom)} - 5.8369] * (\text{edad} / \text{edad base})^{0,30} \quad (4)$$

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hd)} + 1.8253 (1/\text{edad}^{0,5162} - 1/\text{edad base}^{0,5162}) \quad (5)$$

en donde:

IS = Índice de sitio (m),

Hd = altura dominante (m),

Ln = logaritmo natural,

edad base= cinco años para *A. mangium* y 10 para *T. grandis* y,

edad = total de años de los linderos (17 años).

2.2.3.2.2. Estimación de carbono almacenado y fijado en *Acacia mangium* Y, *Tectona grandis* en linderos. Los datos de volumen e incrementos medios en volumen de las especies en los siete linderos, se emplearon en las ecuaciones mencionadas por Cubero⁹⁵, con las cuales se estimó el carbono almacenado (Ca) y fijado (Cf). Las ecuaciones son:

$$\text{Ca} = \text{Vp} * \text{d} * \text{fc},$$

en donde:

Ca = carbono almacenado (tn C km⁻¹)

V= volumen total (m³ km⁻¹)

d = densidad de la madera (g cm⁻³)

fc = fracción de carbono (valor sugerido por IPCC de 0.50)

$$\text{Cf} = \text{IMAVp} * \text{d} * \text{fc},$$

en donde:

Cf= carbono fijado (tn C km⁻¹ año⁻¹),

IMA = Incremento medio anual (m³ km⁻¹ año⁻¹) en fustes,

fc = fracción de carbono (valor sugerido por IPCC de 0.50)

⁹⁵ CUBERO, J y ROJAS, S. 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. Trabajo de grado (Licenciado en Ciencias Forestales con énfasis en Desarrollo Forestal). Universidad Nacional. Facultad de Ciencias de la Tierra y El Mar . Escuela de Ciencias Ambientales. Costa Rica, 1999. p. 34.

Se utilizó el valor en densidad de la madera igual a 0.60 g cm^{-3} en *A. mangium*⁹⁶ y 0.61 g cm^{-3} en *T. grandis*⁹⁷.

2.2.3.2.4. Modelos de rendimiento y crecimiento. Se empleó el modelo de crecimiento y rendimiento de Shumacher⁹⁸(6), para estimar las ecuaciones de crecimiento y rendimiento en altura, diámetro, volumen y, carbono almacenado y fijado hasta los diez años de edad (edad hasta que existen datos consecutivos por año). El modelo se basa en la hipótesis de que el crecimiento relativo tiene una relación inversa con el cuadrado de la edad:

$$d(Y)/d(t) = (b/t^2)Y, \quad (6)$$

en donde:

Y= puede ser volumen, diámetro o altura.

t = tiempo (edad)

b = constante

La notación **dy/dt** representa el cambio instantáneo de Y con respecto a t. La integral con respecto a la edad de esta ecuación de crecimiento produce la **ecuación de rendimiento (7)**:

$$\ln(Y) = a - b/t, \text{ que puede expresarse como } Y = e^{a-b/t} \quad (7),$$

sustituyendo (7) en la ecuación (6), se obtiene la **ecuación de crecimiento (8)**:

$$d(y)/d(t) = (b/t^2) e^{a-b/t} \quad (8)$$

El ajuste de modelos, se realizó por medio del método de mínimos cuadrados, relacionando las variables dependientes (alturas, diámetros, volumen, carbono almacenado y fijado) con la variable independiente (edad). Se probó modelos lineales, no lineales con y sin transformaciones.

⁹⁶ CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA, Op. Cit.

⁹⁷ CARPIO, Op. Cit., 338p.

⁹⁸ HUGHELL, Op. Cit., p.39.

En la selección de los modelos de mejor ajuste, se emplearon los criterios de la lógica biológica del modelo y los estadígrafos más conocidos y ampliamente usados en el campo forestal, los cuales son: el Coeficiente de Determinación (R^2), el Coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust), el Coeficiente de variación (CV%) y, la raíz del cuadrado medio del error o error estándar de estimación RMSE). Se tuvo en cuenta que los valores del R^2 y del R^2 -ajust deben ser altos, y que los valores del CV% deben ser bajos⁹⁹.

⁹⁹ SEGURA, M. y VENEGAS, G. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. (Serie Técnica no. 306); PRESS: Suma de cuadrados del error. CATIE, Turrialba. 1999. 46 p.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 REMEDICIÓN DE LOS LINDEROS DE *Acacia mangium* Y *Tectona grandis*, A LOS 17 AÑOS DE EDAD

En el año 2006, se volvió a medir el diámetro y la altura total de los árboles de *Acacia mangium* y *Tectona grandis* en los linderos. Esta remediación se realizó 17 años después de su establecimiento. De las alturas y diámetros medidos, la Tabla 3 muestra 12 para cada especie. Como puede observarse, existen linderos en los que el crecimiento en diámetro fue alto respecto a otros. Por ejemplo, para *Acacia mangium*, el lindero en Cocles registró el mayor diámetro promedio (32.3 cm), superior en 5.0 cm al diámetro presentado en El Silencio (27.3 cm). Para *Tectona grandis*, Cocles reportó el mayor diámetro promedio (37.2 cm), superior en 2.0 cm al registrado en San Rafael (35.2 cm).

Al comparar las alturas promedio de *A. mangium* obtenidas por cada lindero, se observó que entre estos, hubo una diferencia menor a 0.7 m. Sin embargo, se presentaron altas diferencias en altura, entre los linderos de *Tectona grandis*, por ejemplo en El Silencio, esta especie obtuvo 27.1 m y superó en 5.5 m a la altura encontrada en Guabito 2 (21.6 m).

Se actualizó la base de datos del proyecto CATIE/GTZ, en la que se encontraban diámetros y alturas de las especies hasta el año 10, agregándole las alturas y diámetros del año 17 y, se obtuvo un promedio de las alturas y diámetros en cada año de crecimiento por lindero (Tabla 4).

En la mayoría de los años, *A. mangium* presentó los valores más altos en altura promedio en Cocles y *Tectona grandis* alcanzó los valores más altos en El Silencio.

Tabla 3. 12 diámetros y 12 alturas de *A. mangium* y *T. grandis* a los 17 años de edad.

| | | Linderos en Costa Rica | | | | | | | | Linderos en Panamá | | | | | |
|-------------------|--|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | San Rafael | | Cocles | | H. Creek | | Bordon | | Guabito 1 | | Guabito 2 | | El Silencio | |
| <i>A. mangium</i> | | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H |
| | | | 29,7 | 23,5 | 29,8 | 23,4 | 29,4 | 23,0 | 29,5 | 22,9 | 29,6 | 23,0 | 29,4 | 22,8 | 29,3 |
| | | 30,4 | 21,5 | 30,5 | 21,5 | 30,0 | 21,1 | 30,0 | 20,8 | 30,2 | 21,2 | 29,8 | 20,7 | 29,7 | 20,5 |
| | | 28,7 | 21,0 | 28,9 | 21,2 | 28,4 | 21,0 | 28,5 | 20,8 | 28,5 | 21,0 | 28,4 | 20,7 | 28,5 | 20,5 |
| | | 31,4 | 20,0 | 31,5 | 20,0 | 30,9 | 20,0 | 30,7 | 20,0 | 31,0 | 20,0 | 30,5 | 20,0 | 30,2 | 20,0 |
| | | 31,5 | 20,0 | 31,6 | 20,0 | 31,0 | 19,9 | 31,0 | 19,8 | 31,3 | 19,9 | 31,0 | 19,8 | 31,0 | 19,7 |
| | | 30,9 | 20,0 | 31,0 | 20,0 | 30,6 | 19,7 | 30,5 | 19,6 | 30,8 | 19,9 | 30,3 | 19,8 | 30,0 | 19,8 |
| | | 29,0 | 23,9 | 33,0 | 24,0 | 28,5 | 24,0 | 28,2 | 23,8 | 28,9 | 23,8 | 28,0 | 23,5 | 25,0 | 23,3 |
| | | 28,5 | 23,8 | 35,6 | 24,8 | 28,0 | 24,0 | 27,8 | 23,8 | 28,0 | 24,0 | 27,2 | 23,7 | 25,5 | 23,5 |
| | | 27,6 | 25,0 | 34,2 | 24,5 | 27,3 | 24,0 | 27,2 | 23,7 | 27,5 | 24,5 | 27,3 | 23,6 | 25,2 | 23,4 |
| | | 27,5 | 25,8 | 33,5 | 25,9 | 26,2 | 25,8 | 26,1 | 25,7 | 26,8 | 25,7 | 26,2 | 25,5 | 24,0 | 25,0 |
| | | 28,0 | 23,5 | 34,0 | 23,6 | 27,5 | 23,5 | 27,0 | 23,4 | 27,9 | 23,6 | 26,5 | 23,0 | 24,0 | 23,0 |
| | | 29,0 | 25,5 | 34,2 | 25,4 | 27,9 | 25,2 | 26,1 | 25,0 | 28,5 | 25,4 | 29,0 | 25,0 | 25,3 | 24,5 |
| promedio | | 29,4 | 22,8 | 32,3 | 22,9 | 28,8 | 22,6 | 28,6 | 22,4 | 29,1 | 22,7 | 28,6 | 22,3 | 27,3 | 22,2 |
| <i>T. grandis</i> | | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H | Dap | H |
| | | 31,0 | 20,0 | 30,0 | 24,7 | 31,0 | 20,0 | 31,0 | 20,1 | 31,0 | 21,8 | 35,0 | 20,0 | 31,5 | 25,8 |
| | | 30,3 | 20,0 | 33,2 | 24,6 | 30,4 | 20,0 | 30,5 | 19,9 | 31,0 | 21,5 | 35,1 | 19,9 | 33,0 | 26,8 |
| | | 30,0 | 19,5 | 30,1 | 24,5 | 30,1 | 20,0 | 30,0 | 20,0 | 30,1 | 23,4 | 30,0 | 20,0 | 30,2 | 27,6 |
| | | 29,4 | 20,8 | 30,1 | 24,4 | 29,9 | 21,0 | 30,1 | 21,2 | 30,0 | 23,2 | 29,0 | 20,4 | 30,1 | 27,3 |
| | | 31,4 | 20,5 | 32,0 | 24,1 | 31,5 | 21,0 | 31,9 | 21,0 | 32,0 | 23,8 | 37,4 | 20,4 | 32,0 | 27,6 |
| | | 31,3 | 20,4 | 32,0 | 24,0 | 31,4 | 21,9 | 31,5 | 22,0 | 32,0 | 24,1 | 38,5 | 20,2 | 32,0 | 26,8 |
| | | 39,5 | 24,0 | 40,1 | 26,5 | 40,0 | 24,8 | 40,0 | 25,0 | 40,0 | 25,9 | 35,0 | 23,5 | 40,4 | 28,0 |
| | | 40,6 | 23,5 | 44,0 | 26,6 | 40,5 | 24,5 | 43,0 | 24,6 | 43,2 | 25,4 | 40,8 | 23,2 | 44,0 | 26,9 |
| | | 40,3 | 22,0 | 42,5 | 27,0 | 40,1 | 22,1 | 42,5 | 22,2 | 42,6 | 27,1 | 40,2 | 22,0 | 43,0 | 27,1 |
| | | 39,4 | 22,5 | 35,4 | 24,9 | 39,5 | 23,0 | 35,1 | 23,1 | 35,2 | 24,6 | 39,0 | 22,4 | 35,6 | 26,5 |
| | | 39,9 | 23,7 | 47,0 | 27,9 | 40,4 | 24,0 | 46,5 | 25,0 | 46,9 | 26,7 | 39,5 | 23,5 | 48,2 | 28,0 |
| | | 39,5 | 23,8 | 49,6 | 26,9 | 42,1 | 24,0 | 49,2 | 24,0 | 49,5 | 24,5 | 39,3 | 23,7 | 49,9 | 26,9 |
| promedio | | 35,2 | 21,7 | 37,2 | 25,5 | 35,6 | 22,2 | 36,8 | 22,3 | 37,0 | 24,3 | 36,6 | 21,6 | 35,6 | 27,1 |

Dap = Diámetro a la altura del pecho en cm

H = altura total en m

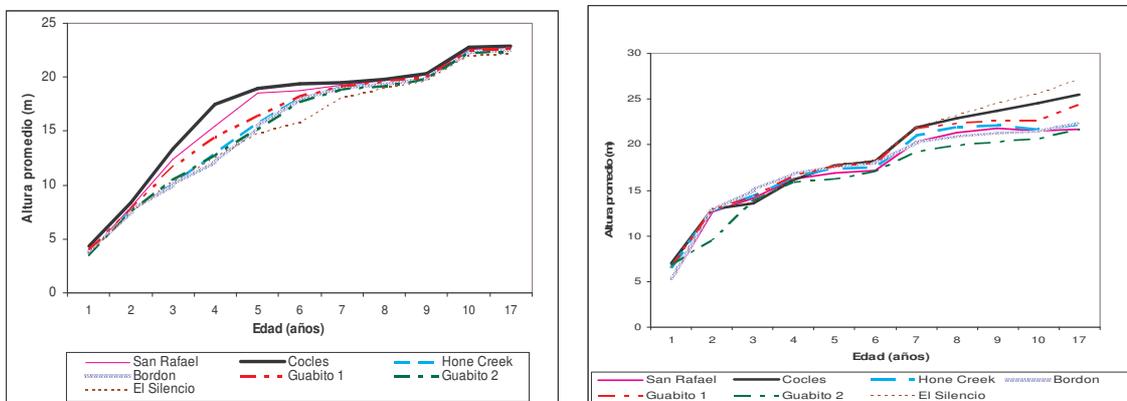
Tabla 4. Análisis de la altura de *A. mangium* y *T. grandis* en los siete linderos.

| | | linderos en Costa Rica | | | | linderos en Panamá | | |
|-------------------|-------|------------------------|--------|----------|--------|--------------------|-----------|-------------|
| <i>A. mangium</i> | Edad | S. Rafael | Cocles | H. Creek | Bordon | Guabito 1 | Guabito 2 | El Silencio |
| | 1 | 3,74 | 4,39 | 3,44 | 3,68 | 4,02 | 3,37 | 3,62 |
| 2 | 7,89 | 8,42 | 7,65 | 7,56 | 7,78 | 7,48 | 7,38 | |
| 3 | 12,43 | 13,33 | 10,10 | 9,98 | 11,62 | 10,53 | 10,24 | |
| 4 | 15,52 | 17,50 | 12,94 | 12,12 | 14,40 | 12,74 | 12,53 | |
| 5 | 18,49 | 19,00 | 15,78 | 15,32 | 16,43 | 15,10 | 14,74 | |
| 6 | 18,80 | 19,34 | 17,98 | 17,86 | 18,25 | 17,69 | 15,83 | |
| 7 | 19,25 | 19,52 | 19,08 | 18,92 | 19,15 | 18,81 | 18,03 | |
| 8 | 19,67 | 19,81 | 19,39 | 19,29 | 19,60 | 19,14 | 19,00 | |
| 9 | 20,18 | 20,31 | 19,93 | 19,85 | 20,07 | 19,77 | 19,64 | |
| 10 | 22,53 | 21,21 | 22,36 | 22,29 | 22,45 | 22,21 | 21,91 | |
| 17 | 22,79 | 22,86 | 22,60 | 22,44 | 22,67 | 22,34 | 22,15 | |
| <i>T. grandis</i> | 1 | 4,62 | 4,82 | 4,40 | 4,37 | 4,52 | 4,37 | 4,94 |
| | 2 | 8,00 | 8,44 | 7,91 | 7,16 | 7,98 | 7,91 | 8,15 |
| | 3 | 11,84 | 13,43 | 11,62 | 11,25 | 12,11 | 11,34 | 12,04 |
| | 4 | 14,23 | 17,54 | 13,95 | 14,31 | 15,80 | 13,75 | 15,86 |
| | 5 | 16,07 | 18,84 | 16,07 | 16,18 | 17,17 | 16,07 | 19,18 |
| | 6 | 18,15 | 20,16 | 18,35 | 18,43 | 19,18 | 18,22 | 20,33 |
| | 7 | 20,28 | 21,85 | 20,94 | 20,17 | 21,79 | 19,17 | 21,92 |
| | 8 | 21,29 | 22,88 | 21,92 | 20,89 | 22,35 | 19,96 | 23,13 |
| | 9 | 21,74 | 23,68 | 22,04 | 21,20 | 22,65 | 20,26 | 24,57 |
| | 10 | 21,47 | 24,54 | 21,63 | 21,44 | 22,66 | 20,65 | 25,54 |
| 17 | 21,73 | 25,51 | 22,19 | 22,34 | 24,33 | 21,60 | 27,11 | |

En la Figura 11 (a), se observa que a la edad de cinco años, en *A. mangium* se forman cuatro grupos de linderos bien diferenciados en altura. El primer grupo registra las más bajas alturas: Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio. El segundo grupo lo forma Guabito 1. El tercer y cuarto grupo lo conforman San Rafael y Cocles respectivamente. Sin embargo, a partir del año ocho, se observa que la altura crece de forma similar en todos los linderos.

La Figura 11 (b), muestra que en altura *T. grandis* a la edad de 10 años, diferencia cuatro grupos de linderos: San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2, conforman el primer grupo con las alturas más bajas. Guabito 1, el segundo; Cocles forma el tercero y El Silencio forma el cuarto.

Figura 11. Altura vs edad de las especies en los siete linderos.



a) Altura vs edad de *Acacia mangium*

(b) Altura vs edad de *Tectona grandis*

En la Tabla 5, se resume el promedio de la altura, el diámetro y el volumen para las especies. El volumen, surgió de utilizar la fórmula citada en la metodología¹⁰⁰

Tabla 5. Resumen de la altura, el diámetro y el volumen en los linderos.

| Edad | <i>Acacia mangium</i> | | | <i>Tectona grandis</i> | | |
|------|-----------------------|----------|---------------------------------------|------------------------|----------|---------------------------------------|
| | Hp (m) | Dap (cm) | Vp (m ³ km ⁻¹) | Hp (m) | Dap (cm) | Vp (m ³ km ⁻¹) |
| 1 | 3,92 | 5,29 | 1,76 | 4,68 | 5,59 | 2,83 |
| 2 | 7,90 | 8,86 | 9,37 | 8,08 | 9,74 | 12,38 |
| 3 | 11,90 | 10,16 | 19,44 | 12,27 | 13,79 | 39,67 |
| 4 | 15,00 | 12,12 | 33,84 | 15,82 | 14,66 | 55,17 |
| 5 | 17,29 | 14,66 | 56,04 | 17,82 | 15,47 | 71,84 |
| 6 | 18,43 | 16,62 | 76,73 | 19,49 | 17,23 | 94,71 |
| 7 | 19,16 | 18,44 | 97,70 | 21,42 | 19,87 | 127,49 |
| 8 | 19,57 | 21,26 | 133,04 | 22,34 | 23,47 | 173,22 |
| 9 | 20,09 | 24,98 | 186,27 | 23,05 | 29,83 | 263,52 |
| 10 | 22,49 | 27,49 | 251,75 | 23,51 | 33,34 | 318,36 |
| 17 | 22,68 | 29,63 | 294,34 | 24,73 | 36,91 | 404,93 |

3.2 INDICE DE SITIO A UNA EDAD BASE DE CINCO AÑOS PARA *Acacia mangium* Y, DE DIEZ AÑOS DE EDAD PARA *Tectona grandis*

Se estimó directamente el índice de sitio por medio del método de la curva guía, explicado en la metodología. Se seleccionaron 19 alturas dominantes en cada

¹⁰⁰ Estimados de rendimiento para la plantación de *Acacia mangium*. [en línea]. Op. cit.

lindero de *A. mangium*, a una edad base de cinco años y 15 alturas dominantes para *Tectona grandis* a una edad base de 10 años (Tabla 6). La altura dominante, representa adecuadamente el potencial de crecimiento del sitio¹⁰¹.

Tabla 6. Alturas dominantes de *A. mangium* y *T. grandis*, en la edad base.

| | Cocles | San Rafael | Guabito 1 | H. Creek | Bordon | Guabito 2 | El silencio | |
|-------------------|--------|------------|-----------|----------|--------|-----------|-------------|------|
| <i>A. mangium</i> | 20,2 | 19,0 | 16,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 14,9 | |
| | 20,0 | 18,0 | 11,9 | 15,0 | 15,0 | 14,2 | 13,8 | |
| | 19,0 | 18,0 | 17,6 | 16,4 | 15,9 | 15,8 | 15,4 | |
| | 20,1 | 18,0 | 16,0 | 15,0 | 15,0 | 13,5 | 13,4 | |
| | 20,4 | 17,0 | 16,8 | 14,0 | 13,8 | 13,5 | 13,0 | |
| | 19,9 | 18,0 | 14,5 | 13,7 | 12,9 | 12,5 | 12,4 | |
| | 20,3 | 19,9 | 19,2 | 18,4 | 18,3 | 17,8 | 16,4 | |
| | 20,1 | 20,0 | 18,4 | 17,8 | 17,5 | 16,5 | 15,7 | |
| | 20,0 | 19,2 | 17,0 | 16,0 | 16,0 | 15,0 | 15,1 | |
| | 20,3 | 20,1 | 16,2 | 15,9 | 15,7 | 15,4 | 15,3 | |
| | 20,1 | 20,0 | 16,4 | 16,3 | 15,2 | 15,1 | 15,0 | |
| | 20,5 | 20,4 | 16,4 | 16,5 | 16,0 | 16,2 | 16,4 | |
| | 20,5 | 20,4 | 17,0 | 16,8 | 16,7 | 16,5 | 16,0 | |
| | 20,4 | 20,3 | 16,0 | 15,8 | 15,4 | 15,2 | 15,1 | |
| | 20,6 | 20,5 | 16,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 14,5 | |
| <i>T. grandis</i> | 20,4 | 21,0 | 16,2 | 15,2 | 15,1 | 15,0 | 15,0 | |
| | 19,2 | 18,0 | 15,9 | 16,0 | 14,0 | 14,2 | 14,1 | |
| | 19,0 | 17,9 | 17,5 | 16,8 | 15,2 | 15,0 | 12,5 | |
| | 18,0 | 17,6 | 14,2 | 15,0 | 14,9 | 14,5 | 14,2 | |
| | pron | 20,0 | 19,1 | 16,3 | 15,8 | 15,4 | 15,0 | 14,6 |
| | 26,0 | 25,2 | 24,0 | 25,3 | 23,0 | 20,5 | 26,8 | |
| | 25,0 | 21,6 | 24,2 | 21,7 | 23,0 | 21,0 | 25,0 | |
| | 25,0 | 19,9 | 24,0 | 19,9 | 23,0 | 21,0 | 26,7 | |
| | 25,9 | 20,0 | 23,0 | 20,0 | 22,0 | 21,7 | 25,0 | |
| | 24,9 | 20,8 | 24,9 | 21,0 | 21,2 | 20,0 | 24,0 | |
| 26,0 | 21,0 | 23,0 | 21,0 | 21,2 | 21,9 | 25,0 | | |
| 25,9 | 22,3 | 25,0 | 24,2 | 21,2 | 21,9 | 27,0 | | |
| 25,8 | 23,0 | 24,8 | 22,0 | 25,0 | 23,0 | 27,0 | | |
| 26,9 | 21,9 | 24,8 | 20,1 | 20,1 | 21,8 | 27,6 | | |
| 27,0 | 21,5 | 24,0 | 21,9 | 22,0 | 22,9 | 26,6 | | |
| 26,0 | 21,2 | 23,5 | 23,0 | 23,0 | 22,8 | 27,6 | | |
| 26,8 | 21,2 | 23,0 | 21,0 | 21,0 | 21,1 | 27,6 | | |
| 27,0 | 21,1 | 23,9 | 20,4 | 20,6 | 21,0 | 27,6 | | |
| 26,0 | 21,0 | 23,0 | 21,9 | 22,2 | 21,0 | 27,7 | | |
| 25,0 | 20,3 | 24,0 | 21,0 | 21,0 | 20,0 | 28,0 | | |
| Promedio | 25,9 | 21,5 | 23,9 | 21,6 | 22,0 | 21,4 | 26,6 | |

¹⁰¹ HUGHELL, Op. Cit.

Con los datos de las alturas dominantes, los cuales se ajustaron muy bien a la ecuación de Shumacher¹⁰², se obtuvo la curva guía para cada especie:

$$\text{Ln (Hd)} = a + b/\text{edad}^k \quad (\text{ecuación de Shumacher})$$

En *A. mangium*,

$$a = -1.24431, b = 2.95559 \text{ y } k = -0.165218 \quad (\text{Anexo 1}),$$

$$\text{Ln(Hd)} = -1,24431 + 2,95559/\text{edad}^{-0,165218} \quad (\text{curva guía para } A. \text{ mangium})$$

En *Tectona grandis*,

$$a = 0,0835346, b = 2,08401 \text{ y } k = -0,167359 \quad (\text{Anexo 2})$$

$$\text{Ln(Hd)} = 0,0835346 + 2,08401/\text{edad}^{-0,167359} \quad (\text{curva guía para } T. \text{ grandis})$$

Remplazando los coeficientes a, b y k en el modelo de intercepto común seleccionado para *A. mangium* y el modelo de pendiente común seleccionado para *T. grandis*, se obtuvieron las ecuaciones (9) y (10), respectivamente.

$$\text{Ln(IS)} = a + (\text{Ln(Hd)} - a) * (\text{edad}/\text{edad base})^k \quad (\text{modelo de intercepto común})$$

$$\text{Ln(IS)} = -1,24431 + (\text{Ln(Hd)} + 1,24431) * (17/5)^{-0,165218} \quad (9)$$

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln(Hd)} + b (1/\text{edad base}^k) - (1/\text{edad}^k) \quad (\text{modelo de pendiente común})$$

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln(Hd)} + 2.08401(1/10^{-0,167359}) - (1/17^{-0,167359}) \quad (10)$$

Al remplazar las alturas dominantes por especie y por sitio en las ecuaciones (9) y (10), se encontraron los índices de sitio para cada especie, que se pueden observar en la Tabla 7.

¹⁰² HUGHELL, Op. Cit.

Tabla 7. Índices de sitio estimados para *A. mangium* y *T. grandis*, a una edad base de cinco y 10 años respectivamente.

| | | | | | | | |
|--------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| | H. Creek | Bordon | Guabito 2 | El Silencio | Guabito 1 | S. Rafael | Cocles |
| Acacia | 7,92 | 7,88 | 7,92 | 7,68 | 8,79 | 9,05 | 10,07 |
| | S. Rafael | Guabito 2 | H. Creek | Bordon | Guabito 1 | Cocles | El silencio |
| Teca | 16,14 | 16,12 | 16,26 | 16,52 | 18,00 | 19,51 | 20,01 |

En la Tabla 7, se corrobora que para *A. mangium*, a la edad de cinco años, se forman cuatro grupos de linderos bien diferenciados, que corresponden a cuatro sitios. El primer grupo, que registra las más bajas alturas lo conforma: Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio. El segundo grupo lo forma Guabito 1. El tercer y cuarto grupo lo conforman San Rafael y Cocles respectivamente.

Para *Tectona grandis*, a la edad de 10 años, se diferencian cuatro grupos de linderos: San Rafael, Guabito 2, Hone Creek y Bordon forman el primero. Guabito 1, Cocles y Silencio forman el segundo, tercero y cuarto grupo respectivamente.

Con base en esta observación, se promediaron los índices de sitio de los linderos que conforman cada grupo, determinando cuatro calidades de sitio para *A. mangium* (Tabla 8) y cuatro calidades de sitio para *Tectona grandis* (Tabla 9). El valor de la altura dominante para cada calidad de sitio, se obtuvo de promediar de la Tabla 6 los valores de la altura dominante, bien diferenciada entre grupos.

Las cuatro calidades de sitio, en las dos especies fueron: **baja**, que corresponde a sitios pobres que numéricamente son sitios por debajo del promedio, difícilmente rentables. **Media**, son sitios buenos, alrededor del promedio, esta clase de sitio tiene buenas posibilidades de ser rentable con un manejo apropiado, **Alta** que significa plantaciones con mejor crecimiento y superior al promedio, sitios con mayor potencial económico¹⁰³. **Muy alta**, son sitios con crecimiento muy superior al promedio.

¹⁰³ HUGHELL, Op. Cit.

¹⁰⁴ OLIVA, Edwin. Op. Cit. 117 p.

Tabla 8. Calidad de sitio para los linderos de *A. mangium*.

| Calidad | Is | Hd pro | CV (%) | Ubicación |
|----------|-------|--------|--------|--|
| Baja | 7,85 | 15,20 | 15 | Hone Creek, Bordon, Guabito 2, El Silencio |
| Media | 8,79 | 16,30 | 18 | Guabito 1 |
| Alta | 9,05 | 19,10 | 13 | San Rafael |
| Muy alta | 10,09 | 20,00 | 8 | Cocles |

Hd pro = altura dominante promedio (m), **Is** = índice de sitio (m), **CV**= coeficiente de variación.

Los linderos de Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio representan el 57.13% del total de los linderos evaluados y se clasificaron como sitios de calidad baja, con un Is igual a 7.85 m. El 14.29% de los linderos evaluados lo representa Guabito 1 y se clasificó sitio de calidad media, con un Is igual a 8.79 m. San Rafael, constituyó el 14.29% de los linderos evaluados y se clasificó sitio de calidad alta, con un Is igual a 9.05 m. Finalmente el restante (14.29%) de los linderos evaluados lo constituyó Cocles y se clasificó sitio de calidad muy alta con un Is igual a 10.09 m.

Oliva¹⁰⁴, reporta valores de Is para *A. mangium*: altos, medios y bajos de 12 m, 9 m y 6 m respectivamente, a una edad base de cuatro años para América central en una densidad de plantación de 2500 árboles ha⁻¹. Estos valores son similares a los encontrados en este estudio a una edad base de cinco años, en una densidad de 400 árboles km⁻¹.

La variabilidad relativa de las alturas dominantes, representada por los coeficientes de variación (CV), aunque fue mayor en los sitios de calidad baja y media y, menor en los sitios de calidad alta y muy alta, demuestran la confiabilidad de los datos al ser menor a 18%.

El modelo de intercepto común, permitió describir la familia de curvas polimórficas de IS. El modelo de la curva guía fijó el valor de a en -1.24431 (intercepto de la regresión), y el valor de b fue variable (pendiente de la regresión). Como puede verse en la Figura 12, entre curvas polimórficas, la distancia no es proporcional con diferentes edades, tal como lo plantea Hughell¹⁰⁵.

¹⁰⁵ HUGHELL, David. Op. Cit.

Figura 12. Modelo de la curva guía y curvas polimórficas de índice de sitio de 7.85 m, 8.79 m, 9.05 m y 10.09 m, a una edad base de 5 años de edad para *Acacia mangium*, en linderos de Costa Rica y Panamá; con base en el modelo de intercepto común.

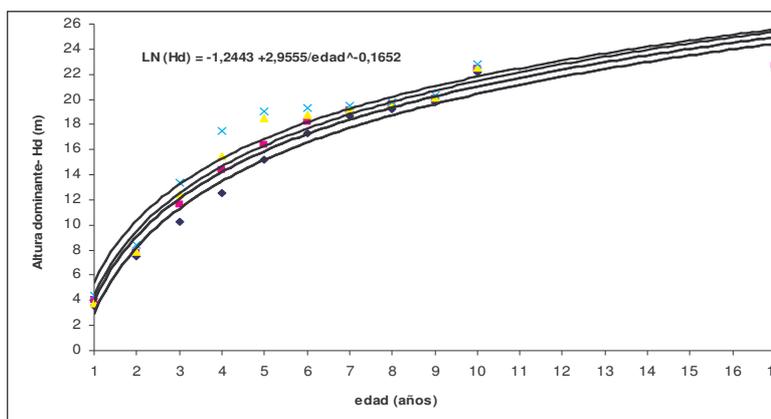


Tabla 9. Calidad de sitio para los linderos de *T. grandis*.

| Calidad | Is | Hd p | CV (%) | Ubicación |
|----------|-------|-------|--------|---|
| Baja | 16,26 | 21,62 | 5 | San Rafael, H. Creek, Bordon, Guabito 2 |
| Media | 18,00 | 23,90 | 4 | Guabito 1 |
| Alta | 19,51 | 25,90 | 3 | Cocles |
| Muy alta | 20,01 | 26,60 | 4 | El Silencio |

Hd p = altura dominante promedio (m), **Is** = índice de sitio (m), **CV**= coeficiente de variación.

San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2, representaron el 57.13% del total de los linderos evaluados y se clasificaron sitios de calidad baja, con un Is de 16.26 m. El 14.29% de los linderos evaluados lo representó Guabito 1 y con un Is de 18.00 m, se clasificó sitio de calidad media. Cocles, representó el 14.29% de los linderos evaluados y con un Is de 19.51 m, se clasificó como un sitio de calidad alta; El Silencio representó el 14.29% de los linderos evaluados, y con un Is de 20.01 m, se clasificó sitio de calidad muy alta.

Somarriba¹⁰⁶, reportó índices de sitio de 17 m, 19 m y 20 m, para calidades de sitio bajo, medio y alto respectivamente. Estos valores encontrados a una edad

¹⁰⁶ SOMARRIBA, E. *et al.* Linderos de *Tectona grandis* L.F. en el trópico húmedo de Costa Rica y Panamá. En: Revista Forestal Centroamericana (CATIE). Oct-Dic 1999. (no.28), p. 15-21.

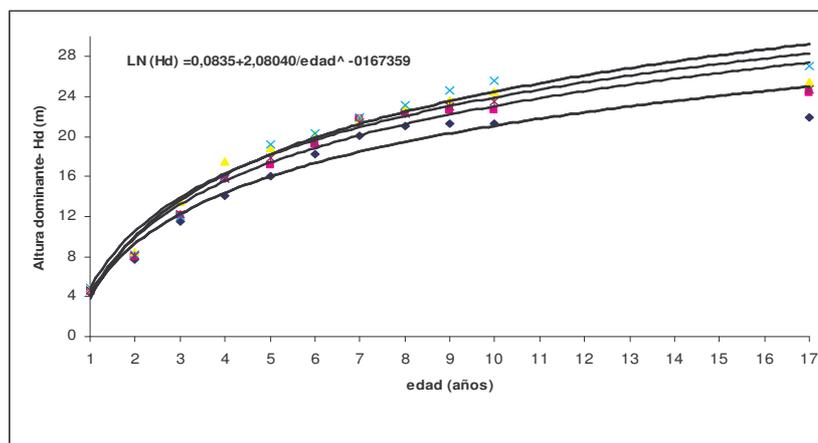
base de cinco años, son similares a los obtenidos en los mismos linderos de este estudio, a una edad base de diez años de edad.

Vaidez¹⁰⁷, reportó cuatro índices de sitio a una edad base de diez años para plantaciones de *T. grandis* en Guatemala: 11.38 m en sitios de baja productividad, 17.19 m en sitios de productividad media, 18.40 m en sitios de productividad alta y 26.43 m en sitios de excelente productividad. Sus valores, sobrepasan los cuatro valores de ls encontrados en este estudio.

Los bajos coeficientes de variación ($CV \leq 5$), demuestran que la altura dominante de los árboles presenta baja dispersión, su promedio representa a cada lindero, y existen bases confiables para la toma de desiciones a nivel profesional.

En *T. grandis*, el modelo de pendiente común, permitió describir la familia de curvas anamórficas de índice de sitio (Figura 13), el modelo de la curva guía mantuvo constante el valor de b en 2,08401 (pendiente de la regresión) y, el valor de a (intercepto de la regresión) fue variable. El término de curvas anamórficas se refiere a que la distancia entre las curvas es proporcional con las diferentes edades.

Figura 13. Curvas anamórficas de índice de sitio de 16.26 m, 18.0 m, 19.51 m y 20.01 m, a una edad base de 10 años para *Tectona grandis*, en linderos de Costa Rica y Panamá; con base en el modelo de pendiente común.



¹⁰⁷ VAIDES, E. Op. Cit., 81 p.

3.3 RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN ALTURA DE *Acacia mangium* y *Tectona grandis*, EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO

3.3.1 Rendimiento y crecimiento en altura de *Acacia mangium*. La calidad del sitio influyó en el crecimiento y rendimiento de los linderos de *A. mangium*, a partir del segundo año de edad (Tabla 10). Se presentó bajo rendimiento e incremento medio anual (crecimiento) en Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio (sitios de calidad baja), medio en Guabito 1 (sitio de calidad media), alto en San Rafael (sitio de calidad alta) y el mejor en Cocles (sitio de calidad muy alta).

Para identificar los sitios que corresponden a las calidades baja, media alta y muy alta, se seleccionó los valores de I_s , que cubrían el ámbito de los datos (Tabla 8 y 9).

Tabla 10. Rendimiento en altura de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | Hp |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 3,53 | 4,02 | 3,74 | 4,39 | 3,92 |
| 2 | 7,52 | 7,78 | 7,89 | 8,42 | 7,90 |
| 3 | 10,21 | 11,62 | 12,43 | 13,33 | 11,90 |
| 4 | 12,58 | 14,40 | 15,52 | 17,50 | 15,00 |
| 5 | 15,24 | 16,43 | 18,49 | 19,00 | 17,29 |
| 6 | 17,34 | 18,25 | 18,80 | 19,34 | 18,43 |
| 7 | 18,71 | 19,15 | 19,25 | 19,52 | 19,16 |
| 8 | 19,21 | 19,60 | 19,67 | 19,81 | 19,57 |
| 9 | 19,79 | 20,07 | 20,18 | 20,31 | 20,09 |
| 10 | 22,19 | 22,45 | 22,53 | 22,80 | 22,49 |
| 17 | 22,38 | 22,67 | 22,79 | 22,86 | 22,68 |

Hp = promedio de la altura promedio en todos los sitios (m). **Edad** (años).

Durante los seis primeros años de evaluación, se observó un rendimiento elevado en altura. En promedio entre sitios, *A. mangium* obtuvo 3.92 m y 7.90 m, en el año uno y dos respectivamente.

En el año tres, entres sitios, se registró un rendimiento y crecimiento más pronunciado de *A. mangium*, que alcanzó 11.90 m y de 3.97 m año⁻¹ respectivamente.

Tabla 11. Crecimiento (Incremento Medio Anual en altura-IMAH) de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | IMAHp |
|------|------|-------|------|----------|-------|
| 1 | 3,53 | 4,02 | 3,74 | 4,39 | 3,92 |
| 2 | 3,76 | 3,89 | 3,95 | 4,21 | 3,95 |
| 3 | 3,40 | 3,87 | 4,14 | 4,44 | 3,97 |
| 4 | 3,15 | 3,60 | 3,88 | 4,38 | 3,75 |
| 5 | 3,05 | 3,29 | 3,70 | 3,80 | 3,46 |
| 6 | 2,89 | 3,04 | 3,13 | 3,22 | 3,07 |
| 7 | 2,67 | 2,74 | 2,75 | 2,79 | 2,74 |
| 8 | 2,40 | 2,45 | 2,46 | 2,48 | 2,45 |
| 9 | 2,20 | 2,23 | 2,24 | 2,26 | 2,23 |
| 10 | 2,22 | 2,24 | 2,25 | 2,12 | 2,21 |
| 17 | 1,32 | 1,33 | 1,34 | 1,34 | 1,33 |

IMAHp = promedio del incremento medio anual en altura de todos los sitios (m año⁻¹).

En el año cuatro, la altura obtenida en el sitio de calidad muy alta (17.50 m), supera al valor reportado por Oliva y Huguell¹⁰⁸(9.5 m) en los mejores sitios.

Luján¹⁰⁹ y Luján, *et al*¹¹⁰ a la edad cuatro en los linderos, reporta a Cocles como el mejor sitio de crecimiento en altura de *A. mangium*, con un IMAH de 4.1 m. Los resultados son similares a los obtenidos en este estudio, en donde a la misma edad Cocles se clasificó un sitio de muy alta calidad, con un IMAH de 4.38 m. Los mismos autores reportan a Bordon como el sitio de menor crecimiento en altura de *A. mangium*, con un IMAH de 3.1 m, valor similar al encontrado en este estudio a la misma edad, en donde Bordon, se incluyó dentro de los sitios de calidad baja con un IMAH de 3.15 m.

Desde los siete hasta los diez años de edad, se registró un crecimiento menos elevado, en comparación con los de años anteriores. En el año siete, *A. mangium* alcanzó una altura de 18.71 m en el sitio de calidad baja, 19.15 m en el sitio de calidad media, 19.25 m en el sitio de calidad alta, y de 19.52 m, en el sitio de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 0.81 m al sitio de calidad baja en este año. El crecimiento (IMA) para estos cuatro sitios osciló entre 2.67 y

¹⁰⁸ OLIVA, E y HUGUELL, D. Modelo de Crecimiento y Rendimiento de mangium (*Acacia mangium* Willd), en Costa Rica, Honduras y Panamá. *En*: SILVOENERGÍA. N° 35. Octubre. 1990. 8 p.

¹⁰⁹ LUJAN, R y CAMACHO, A. Op. cit.

¹¹⁰ LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G. Manejo y crecimiento de linderos de tres especies maderables en el distrito de Changuinola, Panamá. (Serie Técnica, Informe Técnico CATIE, no.242). Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1996. 41 p.

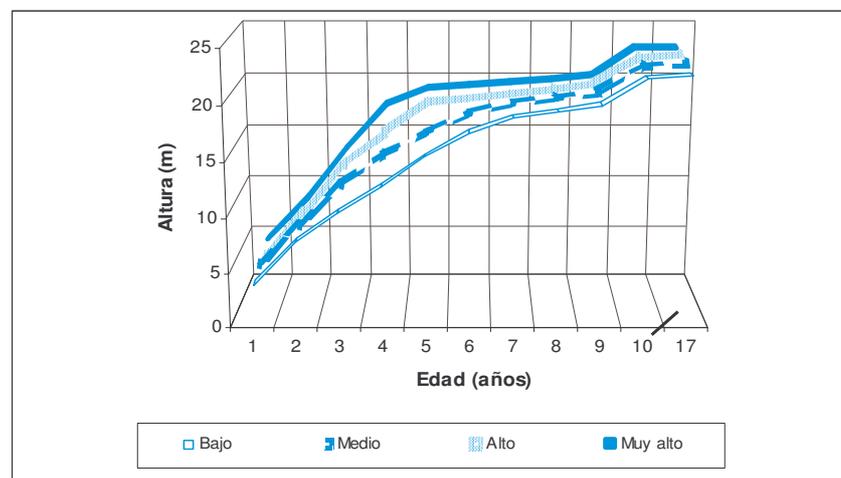
2.79 m año⁻¹ y, en promedio fue de 2.74 m año⁻¹. La tendencia del rendimiento se puede observar en la Figura 14.

A partir de los ocho años de edad, se observa un crecimiento (IMA) similar en los sitios, el cual difiere en centésimas de m año⁻¹. En el año ocho, el crecimiento se ha unificado en 2.4 m año⁻¹, En el año nueve en 2.2 m año⁻¹. La tendencia del crecimiento se puede observar en la Figura 15.

En el año diez, esta especie obtuvo un rendimiento de 22.19 m en el sitio de calidad baja, 22.45 m en el sitio de calidad media, 22.53 m en el sitio de calidad alta, y de 22.80 m en el sitio de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 0.61 m al sitio de calidad baja. El crecimiento (IMA) para estos cuatro sitios oscilo entre 2.12 y 2.25 m año⁻¹.

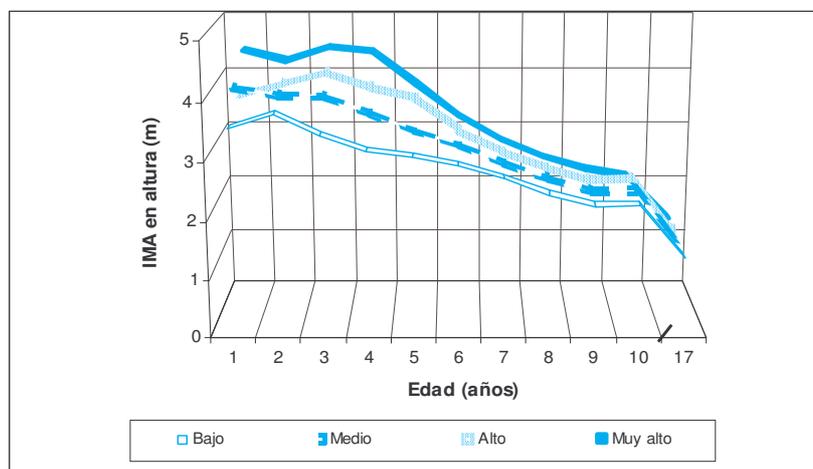
Las remediciones realizadas en el año 17, permitieron analizar que después del año diez, esta especie empezó a estabilizar su rendimiento en el tiempo, alcanzando a los 17 años: 22.38 m en sitios de calidad baja, 22.67 m en el sitio de calidad media, 22.79 m en el sitio de calidad alta y 22.86 m en el sitio de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó 0.48 m al sitio de calidad baja. El crecimiento (IMA) para estos cuatro sitios se unificó en 1.3 m año⁻¹.

Figura 14. Rendimiento en altura de *A. mangium*, según la calidad de sitio.



Las alturas seleccionadas en cada clase de sitio, presentaron baja dispersión (CV ≤ 25%), demostrando que tienen alta representatividad para los linderos en estudio (Anexo 3).

Figura 15. Crecimiento en altura (Incremento Medio anual en altura-IMAH) de *A. mangium*, según la calidad de sitio.



3.3.2 Rendimiento y crecimiento en altura de *Tectona grandis*. Como se presenta en la Tabla 12, a partir del quinto año de edad, la altura de *Tectona grandis*, se vio influenciada por la calidad de sitio a la que pertenece. La altura fue menor en San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2 (sitio de calidad baja), media en Guabito 1 (sitio de calidad media), alta en Cocles (sitio de calidad alta) y muy alta en El Silencio (sitio de calidad muy alta).

Tabla 12. Rendimiento en altura de *Tectona grandis*, según la calidad de sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | Hp |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 4,44 | 4,52 | 4,82 | 4,94 | 4,68 |
| 2 | 7,74 | 7,98 | 8,44 | 8,15 | 8,08 |
| 3 | 11,51 | 12,11 | 13,43 | 12,04 | 12,27 |
| 4 | 14,06 | 15,80 | 17,54 | 15,86 | 15,82 |
| 5 | 16,10 | 17,17 | 18,84 | 19,18 | 17,82 |
| 6 | 18,29 | 19,18 | 20,16 | 20,33 | 19,49 |
| 7 | 20,14 | 21,79 | 21,85 | 21,92 | 21,42 |
| 8 | 21,01 | 22,35 | 22,88 | 23,13 | 22,34 |
| 9 | 21,31 | 22,65 | 23,68 | 24,57 | 23,05 |
| 10 | 21,30 | 22,66 | 24,54 | 25,54 | 23,51 |
| 17 | 21,96 | 24,33 | 25,51 | 27,11 | 24,73 |

Hp = promedio de la altura promedio en todos los sitios (m). **Edad** (años).

T. grandis, presentó mayores rendimientos y crecimientos anuales que *A. mangium*. Los más elevados, se presentaron en los cuatro primeros años (Tabla 13). En altura promedio entre sitios, la especie alcanzó 4.68 m, 8.08 m, 12.27 m y 15.82 m; en el año uno, dos, tres y cuatro respectivamente. Obtuvo un crecimiento promedio entre sitios de 4.04 m año⁻¹, 4.09 m año⁻¹, 3.95 m año⁻¹ y 3.56 m año⁻¹ en el año dos, tres y cuatro respectivamente. La Figura 16, representa la tendencia de su rendimiento.

Tabla 13. Crecimiento en altura (Incremento Medio Anual en altura-IMAH) de *T. grandis*, según la calidad de sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | IMAHp |
|------|------|-------|------|----------|-------|
| 1 | 4,44 | 4,52 | 4,82 | 4,94 | 4,68 |
| 2 | 3,87 | 3,99 | 4,22 | 4,07 | 4,04 |
| 3 | 3,84 | 4,04 | 4,48 | 4,01 | 4,09 |
| 4 | 3,51 | 3,95 | 4,39 | 3,96 | 3,95 |
| 5 | 3,22 | 3,43 | 3,77 | 3,84 | 3,56 |
| 6 | 3,05 | 3,20 | 3,36 | 3,39 | 3,25 |
| 7 | 2,88 | 3,11 | 3,12 | 3,13 | 3,06 |
| 8 | 2,63 | 2,79 | 2,86 | 2,89 | 2,79 |
| 9 | 2,37 | 2,52 | 2,63 | 2,73 | 2,56 |
| 10 | 2,13 | 2,27 | 2,45 | 2,55 | 2,35 |
| 17 | 1,29 | 1,43 | 1,50 | 1,59 | 1,45 |

IMAHp = promedio del incremento medio anual en altura en todos los sitios (m). **Edad** (años)

Rivas¹¹¹, reporta que *T. grandis* en los mejores sitios, logra un IMA en altura dentro de un rango de 3.0 a 4.5 m año⁻¹, en zonas bajas húmedas y muy húmedas de la región atlántica y norte de Costa Rica, a la edad de cuatro. Para la misma edad, todos los sitios de este estudio presentaron un IMAH (3.51 a 4.39 m año⁻¹) que se encuentra dentro del rango mencionado. En la Figura 17, se observa el crecimiento de la especie.

Para *T. grandis*, a la edad cuatro, Luján¹¹² reporta a Cocles como el mejor sitio de rendimiento y crecimiento en los linderos de Costa Rica y Luján *et al*¹¹³ menciona

¹¹¹ RIVAS, C. Plantaciones comerciales en los departamentos de Chinandega y Matagalpa, Nicaragua. Managua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2004. 22 p.

¹¹² LUJAN, R y CAMACHO, A. Op. Cit.

¹¹³ LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G. Op. Cit. p.

a El Silencio mejor sitio de crecimiento en los linderos de Panamá, con 16.1 m y un IMAH de 4.0 m año⁻¹. Los valores son similares a los encontrados en este estudio (15.86 m y un IMAH de 3.96 m año⁻¹) en este linderero de muy alta calidad.

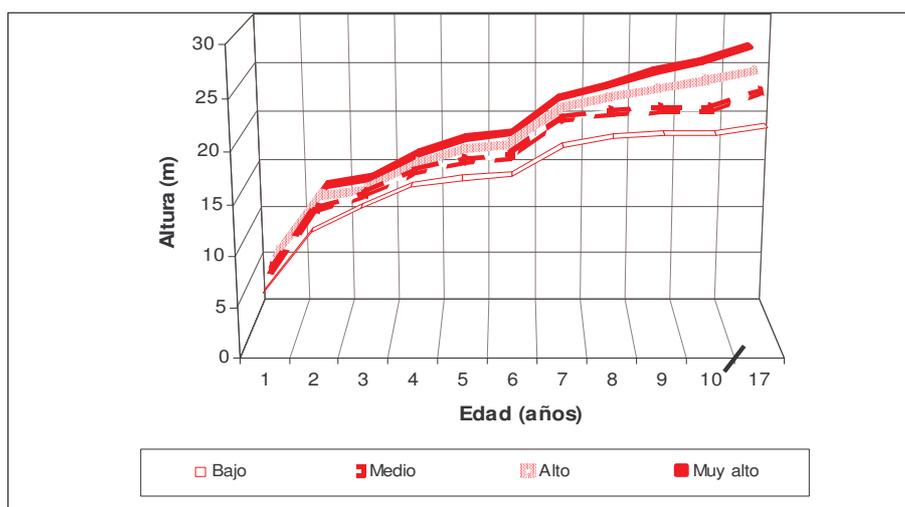
T. grandis, presentó un rendimiento menos elevado a partir del quinto año. En donde obtuvo 16.10 m en el sitio de calidad baja, 17.17 m en el sitio de calidad media, 18.84 m en el sitio de calidad alta y 19.18 m en el sitio de calidad muy alta calidad. Los crecimientos oscilaron entre 3.22 y 3.84 m año⁻¹. Sin embargo, las menores diferencias en rendimiento y crecimiento, se encontraron entre los ocho y 17 años de edad, en donde el crecimiento tendió a estabilizarse.

En el año ocho, esta especie obtuvo 21.01 m en sitios de calidad baja, 22.35 m en el sitio de calidad media, 22.88 m en el sitio de calidad alta y, 23.13 m en el sitio de calidad muy alta. Con un incremento que osciló entre 2.63 y 2.89 m año⁻¹.

En el año 10, Somarriba¹¹⁴ reportó alturas para los linderos (19.8 m en sitios de calidad baja, 21.6 m en sitios de calidad media y de 23.3 m en sitios de calidad alta), inferiores a las encontradas en este estudio (de 21.30 m para el sitio de calidad baja y de 25.54 m para el sitio de muy alta calidad).

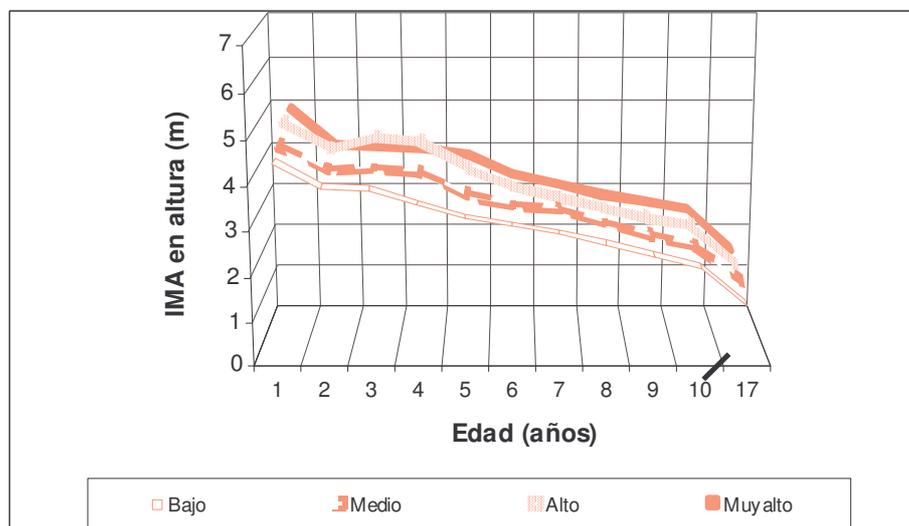
T. grandis, en el año 17 presentó un rendimiento de 21.96 m en el sitio de calidad baja, de 24.33 en el sitio de calidad media, de 25.51m en el sitio de calidad alta y de 27.11 m en el sitio de calidad muy alta. Con un crecimiento que osciló entre 1.29 y 1.59 m año⁻¹.

Figura 16. Rendimiento en altura de *T. grandis*, según la calidad de sitio.



¹¹⁴ SOMARRIBA, E. *et al.* Op. cit.

Figura 17. Crecimiento en altura (Incremento Medio anual en altura-IMAH) de *T. grandis*, según la calidad de sitio.



Los coeficientes de variación del Anexo 4, muestran que las alturas seleccionadas representaron al lindero de origen, sus valores en cada calidad de sitio presentaron baja dispersión ($CV \leq 16\%$).

3.4 RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN DIÁMETRO DE *Acacia mangium* Y *Tectona grandis*, EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO

3.4.1 Rendimiento y crecimiento en diámetro de *Acacia mangium*. Desde el año dos, el rendimiento y crecimiento diamétrico de *A. mangium* fue menor en Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio (sitios de calidad baja), medio en Guabito 1 (sitio de calidad media), alto en San Rafael (sitio de calidad alta) y muy alto en Cocles (sitio de calidad muy alta). Los valores de rendimiento en diámetro, se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Rendimiento en diámetro de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | Dap |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 3,89 | 6,62 | 4,77 | 5,86 | 5,29 |
| 2 | 8,49 | 8,76 | 9,02 | 9,18 | 8,86 |
| 3 | 9,73 | 10,15 | 10,30 | 10,46 | 10,16 |
| 4 | 11,79 | 12,05 | 12,26 | 12,38 | 12,12 |
| 5 | 14,32 | 14,63 | 14,77 | 14,93 | 14,66 |
| 6 | 16,31 | 16,62 | 16,71 | 16,83 | 16,62 |
| 7 | 18,21 | 18,42 | 18,53 | 18,61 | 18,44 |
| 8 | 20,80 | 21,34 | 21,37 | 21,54 | 21,26 |
| 9 | 24,56 | 24,99 | 25,13 | 25,22 | 24,98 |
| 10 | 26,91 | 27,33 | 27,57 | 28,17 | 27,49 |
| 17 | 28,33 | 29,08 | 29,35 | 31,76 | 29,63 |

Dap = promedio del diámetro promedio en todos los sitios (cm). **Edad** (años).

Hasta la edad de cinco años, se produjo un rendimiento y crecimiento diamétrico fuertemente elevado en *A. mangium*.

El año dos, se destacó por ser fuertemente elevado en rendimiento y el de mayor crecimiento para la especie: 8.49 cm en los sitios de calidad baja (IMA de 4.24 cm año⁻¹) 8.76 cm en el sitio de calidad media (IMA de 4.38 cm año⁻¹), 9.02 cm en el sitio de alta calidad (IMA de 4.51 cm año⁻¹) y 9.18 cm en el sitio de muy alta calidad (IMA de 4.59 cm año⁻¹). Los valores de crecimiento en diámetro de *A. mangium*, se pueden observar en la Tabla 15.

En el año cuatro, el diámetro obtenido en el sitio de muy alta calidad (12.38 cm), fue similar al obtenido por Oliva y Huguell (12.7 cm)¹¹⁵.

En Costa Rica, Luján¹¹⁶ reporta a San Rafael como el lindero de mayor crecimiento en el año cuatro, con un promedio de 20.5 cm. Además señala a Hone Creek y Bordon como los lugares en donde se presentó el menor crecimiento en Dap (12.5 cm y 9.9 cm respectivamente). El valor reportado superó al encontrado en este estudio para San Rafael (12.26 cm), considerado sitio de calidad alta y fue similar para Hone Creek y Bordon (11.79 cm), considerados dentro del sitio de calidad baja.

¹¹⁵ OLIVA, E y HUGUELL, D. Op. Cit. 8 p.

¹¹⁶ LUJAN, R y CAMACHO, A. Op. Cit. p. 4.

Luján, *et al*¹¹⁷, reporta que en Panamá, el promedio en Dap para *A. mangium* en el año cuatro fue: 16.0 cm en Guabito1, 15.0 cm en Guabito 2 y 13.7 cm en El Silencio. Los valores reportados, son superiores a los encontrados en este estudio (12.05 cm para Guabito 1 y 11.79 cm para Guabito 2 y El Silencio).

En el año cinco, la especie obtuvo en diámetro: 14.32 cm en el sitio de calidad baja, 14.63 cm en el sitio de calidad media, 14.77 cm en el sitio de calidad alta y, 14.93 cm en el sitio de calida muy alta. En rendimiento, el sitio de calidad muy alta superó en 0.61 cm al sitio de calidad baja. En los sitios, el crecimiento osciló entre 2.86 y 2.99 cm año⁻¹. Los valores de crecimiento, se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Crecimiento en diámetro (Incremento Medio Anual en diámetro-IMADap) de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | IMADap |
|------|------|-------|------|----------|--------|
| 1 | 3,89 | 6,62 | 4,77 | 5,86 | 5,29 |
| 2 | 4,24 | 4,38 | 4,51 | 4,59 | 4,43 |
| 3 | 3,24 | 3,38 | 3,43 | 3,49 | 3,39 |
| 4 | 2,95 | 3,01 | 3,07 | 3,10 | 3,03 |
| 5 | 2,86 | 2,93 | 2,95 | 2,99 | 2,93 |
| 6 | 2,72 | 2,77 | 2,78 | 2,80 | 2,77 |
| 7 | 2,60 | 2,63 | 2,65 | 2,66 | 2,63 |
| 8 | 2,60 | 2,67 | 2,67 | 2,69 | 2,66 |
| 9 | 2,73 | 2,78 | 2,79 | 2,80 | 2,78 |
| 10 | 2,69 | 2,73 | 2,76 | 2,82 | 2,75 |
| 17 | 1,67 | 1,71 | 1,73 | 1,87 | 1,74 |

IMADap = promedio del incremento medio anual del diámetro en todos los sitios (cm año⁻¹).

Desde al año seis hasta el año 10, el rendimiento y crecimiento en diámetro de *A. mangium*, fue menos elevado que en los años anteriores. En el año 10, presentó: 26.91 cm en el sitio de baja calidad, 27.33 cm en el sitio de calidad media, 27.57 cm en el sitio de calidad alta y, 28.17 cm en el sitio de muy alta calidad. En rendimiento en el sitio de calidad muy alta superó en 1.26 cm al sitio de calidad baja. En los sitios, el crecimiento osciló entre 2.69 y 2.82 cm año⁻¹. La tendencia en rendimiento del diámetro, se puede observar en la Figura 18.

Al comparar los valores de los sitios en el año 10 y 17, se observa que la especie continua su rendimiento y crecimiento en diámetro de forma aún menos elevada que en los anteriores años. En el año 17, el diámetro de *A. mangium* fue: 28.33 cm en los sitios de baja calidad, 29.08 cm en el sitio de calidad media, de 29.35 cm en

¹¹⁷ LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G Op. Cit.

el sitio de alta calidad y de 31,76 cm en el sitio de calidad muy alta. El rendimiento en el sitio de calidad muy alta superó en 3.43 cm al sitio de calidad baja. El incremento osciló entre 1.67 y 1.87 cm año⁻¹. La tendencia del crecimiento en diámetro de *A. mangium* en los sitios, se puede observar en la Figura 19.

Figura 18. Rendimiento en diámetro de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

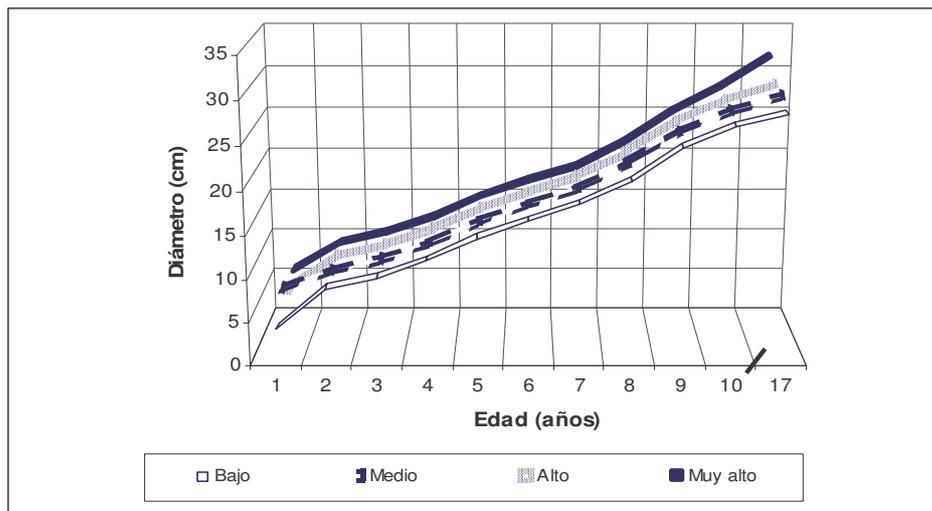
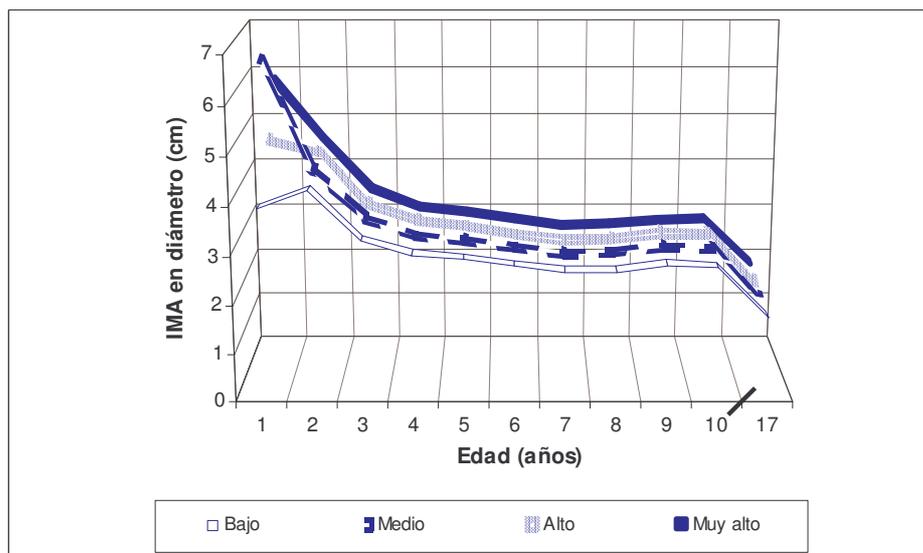


Figura 19. Crecimiento en diámetro (Incremento medio anual del diámetro-IMADap) de *A. mangium*, según la calidad de sitio.



Como se detalla en el Anexo 5, los diámetros presentaron baja dispersión en todas las clases de sitio, sus promedios fueron representativos ($CV \leq 17\%$), de esta manera se demuestra que los datos son confiables para la toma de desiciones a nivel profesional.

3.4.2 Rendimiento y crecimiento en diámetro de *Tectona grandis*. *Tectona grandis*, presentó mayores cambios que *A. mangium* en la distribución de rendimiento y crecimiento diamétrico en los 17 años de estudio. El rendimiento se puede detallar en la Tabla 16.

Tabla 16. Rendimiento en diámetro de *Tectona grandis*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | Dap |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 5,57 | 5,25 | 6,00 | 5,54 | 5,59 |
| 2 | 9,59 | 9,68 | 9,84 | 9,85 | 9,74 |
| 3 | 13,50 | 13,08 | 12,89 | 11,69 | 12,79 |
| 4 | 14,47 | 15,73 | 14,26 | 14,17 | 14,66 |
| 5 | 15,15 | 15,47 | 15,58 | 15,68 | 15,47 |
| 6 | 17,34 | 17,13 | 17,20 | 17,27 | 17,23 |
| 7 | 19,78 | 19,84 | 19,89 | 19,95 | 19,87 |
| 8 | 23,19 | 23,52 | 23,57 | 23,61 | 23,47 |
| 9 | 29,45 | 29,84 | 29,87 | 30,21 | 29,83 |
| 10 | 32,76 | 33,08 | 33,59 | 33,95 | 33,34 |
| 17 | 36,03 | 36,96 | 37,17 | 37,49 | 36,91 |

dap = promedio del diámetro promedio en todos los sitios (cm). **Edad** (años).

A partir del quinto año, el rendimiento y crecimiento, manifestó la influencia de la calidad de sitio al cual corresponde, siendo: bajo en San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2 (sitio de calidad baja), medio en Guabito 1 (sitio de calidad media), alto en Cocles (sitio de calidad alta) y muy alto en El Silencio (sitio de calidad muy alta).

El rendimiento promedio de los sitios en los tres primeros años fue: 5.59 cm en el primer año, 9.74 cm en el segundo y 12.79 cm en el tercero. En este periodo, se registraron los crecimientos mas elevados 5.59 año^{-1} en el primero, 4.87 año^{-1} en el segundo y 4.32 cm año^{-1} en el tercero. El crecimiento en diámetro (IMAdap), se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Crecimiento en diámetro (Incremento Medio Anual-IMAdap) de *Tectona grandis*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | IMAdap |
|------|------|-------|------|----------|--------|
| 1 | 5,57 | 5,25 | 6,00 | 5,54 | 5,59 |
| 2 | 4,80 | 4,84 | 4,92 | 4,93 | 4,87 |
| 3 | 4,50 | 4,59 | 4,30 | 3,90 | 4,32 |
| 4 | 3,62 | 3,93 | 3,57 | 3,54 | 3,66 |
| 5 | 3,03 | 3,09 | 3,12 | 3,14 | 3,09 |
| 6 | 2,89 | 2,86 | 2,87 | 2,88 | 2,87 |
| 7 | 2,83 | 2,83 | 2,84 | 2,85 | 2,84 |
| 8 | 2,90 | 2,94 | 2,95 | 2,95 | 2,93 |
| 9 | 3,27 | 3,32 | 3,31 | 3,36 | 3,31 |
| 10 | 3,28 | 3,31 | 3,36 | 3,39 | 3,33 |
| 17 | 2,12 | 2,17 | 2,19 | 2,21 | 2,17 |

IMAdap = promedio del incremento medio anual del diámetro en todos los sitios (cm año^{-1}).

Desde el año cuatro al siete *Tectona grandis*, aumentó su rendimiento en diámetro, pero en menor grado y, el crecimiento fue menor respecto a los tres primeros años. En el año cuatro, la especie obtuvo un rendimiento promedio en diámetro de 14.66 cm y un crecimiento promedio de 3.66 cm año^{-1} .

Luján¹¹⁸, señala que en el año cuatro, *Tectona grandis* en Costa Rica obtuvo los mayores incrementos en diámetro en Cocles (4.9 cm año^{-1}) y en Hone Creek (4.6 cm año^{-1}). El menor crecimiento, se manifestó en San Rafael (3.8 cm año^{-1}) y Bordon (3.7 cm año^{-1}). Los valores encontrados son superiores a los encontrados en este estudio, sin embargo también se destaca a Cocles como un sitio de crecimiento alto y San Rafael y Bordon se incluyen dentro de los sitios de menor crecimiento.

Luján, *et al*¹¹⁹, reporta que en el año cuatro, en Panamá se obtuvo rendimientos en diámetro de 16.0 cm en Guabito 1, de 14.2 cm en Guabito 2 y, de 17.1 cm en El Silencio. Los valores reportados son superiores a los obtenidos en este estudio (15.47 m, 15.15 m y 15.68 m respectivamente). Igualmente, El Silencio fue el mejor sitio de rendimiento y crecimiento en diámetro.

En el año siete, *Tectona grandis* presentó un diámetro de 19.78 cm en el sitio de calidad baja, 19.84 en el sitio de calidad media, 19.89 cm en el sitio de calidad alta y 19.95 cm en el sitio de calidad muy alta. El rendimiento del sitio de calidad muy

¹¹⁸ LUJAN, R y CAMACHO, A. Op. Cit. p. 4.

¹¹⁹ LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G. Op. Cit.

alta superó en 0.17 cm al sitio de calidad baja y el crecimiento osciló entre 2.83 y 2.85 cm año⁻¹. La distribución del rendimiento en diámetro en los sitios, se puede observar en la Figura 20.

Desde al año ocho al diez, la especie, aumentó su rendimiento y crecimiento en diámetro respecto al obtenido en el periodo comprendido entre el año cuatro y siete. En el año ocho, el rendimiento promedio en diámetro de los sitios fue de 23.47 cm y el crecimiento de 2.93 cm año⁻¹. El rendimiento del sitio de calidad muy alta superó en 0.42 cm al sitio de calidad baja y el crecimiento osciló entre 2.90 y 2.95 cm año⁻¹.

En el año nueve, el rendimiento promedio en diámetro de los sitios fue de 29.83 cm y el crecimiento de 3.31 cm año⁻¹. El rendimiento del sitio de calidad muy alta superó en 0.76 cm al sitio de calidad baja y el crecimiento osciló entre 3.27 y 3.36 cm año⁻¹.

Somarriba¹²⁰, reporta estimaciones para el diámetro de *Tectona grandis*, a la edad de 10 años (32.2 cm en sitios de calidad baja, 35.0 cm en sitios de calidad media, 36.5 cm en sitios de calidad alta), las cuales no difieren mucho de las encontradas en este estudio (32.76 cm en el de calidad baja, 33.08 cm en el de calidad media, 33.59 cm en el de calidad alta y 33.95 cm en el de calidad muy alta). En este año, el rendimiento en diámetro del sitio de calidad muy alta, superó en 1.19 cm al sitio de calidad baja y el crecimiento osciló entre 2.12 y 2.21 cm año⁻¹.

En el año 17, *Tectona grandis* aumentó su rendimiento en diámetro, pero en menor grado y, el crecimiento fue menor respecto al obtenido en el año 10. El rendimiento en diámetro de la especie en los sitios fue: 36.03 cm en el de calidad baja, 36,96 cm en el de calidad media, 37.17 cm en el de calidad alta y 37.49 cm en el de calidad muy alta. El rendimiento del sitio de calidad muy alta superó en 1.46 cm al sitio de calidad baja y el crecimiento osciló entre 2.12 y 2.21 cm año⁻¹. El crecimiento o incremento medio anual en diámetro en los sitios, se puede observar en la Figura 21.

¹²⁰ SOMARRIBA, E. *et al.* Linderos de *Tectona grandis* L.F. en el trópico húmedo de Costa Rica y Panamá. En: Revista Forestal Centroamericana (CATIE). Oct-Dic 1999. (no.28) p. 15-21.

Figura 20. Rendimiento en diámetro de *T. grandis*, según la calidad del sitio.

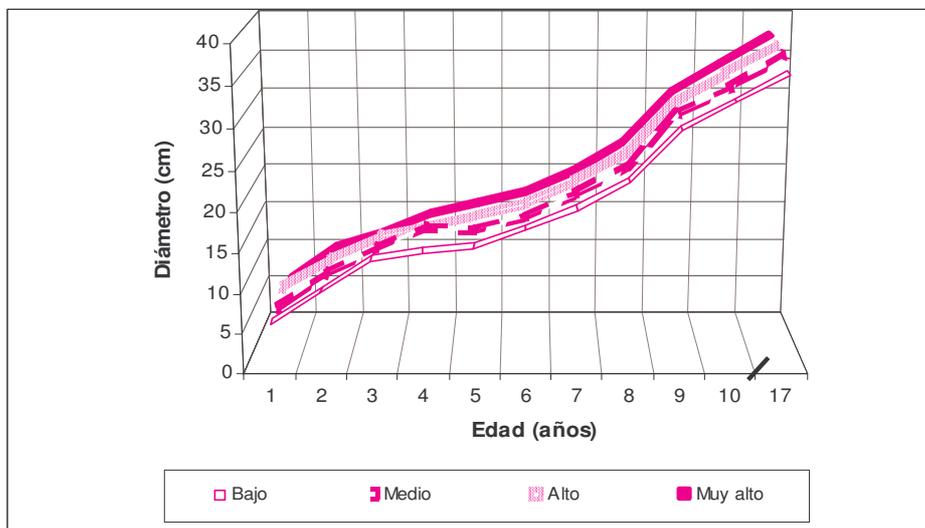
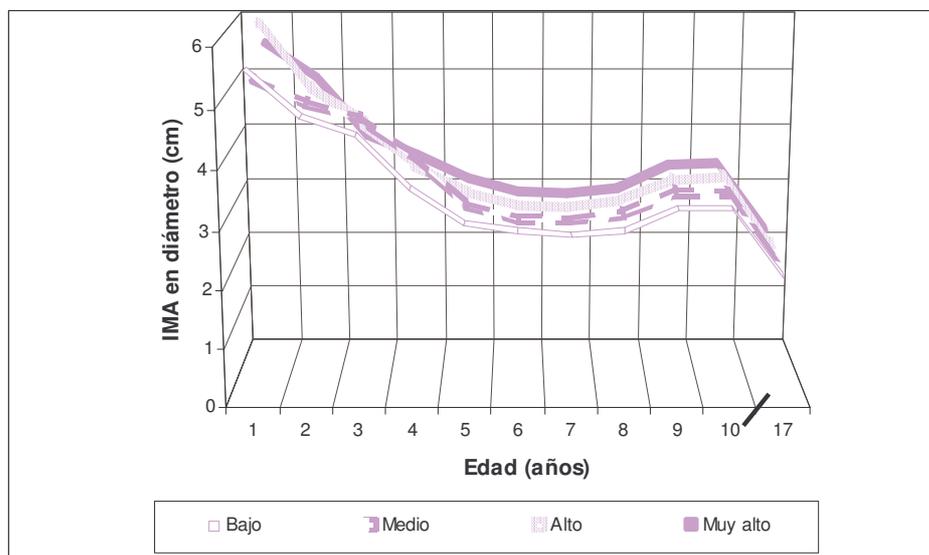


Figura 21. Crecimiento en diámetro (Incremento Medio anual en diámetro-IMADap) de *Tectona grandis*, según calidad de sitio.



Como se detalla en el Anexo 6, se presentó baja dispersión en el rendimiento y crecimiento diamétrico de *Tectona grandis* ($CV \leq 25$), de manera que los diámetros representaron a los linderos de origen.

3.5 CRECIMIENTO EN VOLUMEN DE *Acacia mangium* Y *Tectona grandis*, en las cuatro calidades de sitio

3.5.1 Rendimiento y crecimiento en volumen de *Acacia mangium*. Como se puede detallar en la Tabla 18, a partir del segundo año de edad, el rendimiento y crecimiento en volumen de *A. mangium* fue: bajo en Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio (sitio de calidad baja), medio en Guabito 1 (sitio de calidad media), alto en San Rafael (sitio de calidad alta) y muy alto en Cocles (sitio de calidad muy alta).

Tabla 18. Rendimiento en volumen de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | Vp |
|------|--------|--------|--------|----------|--------|
| 1 | 0,92 | 2,67 | 1,24 | 2,23 | 1,76 |
| 2 | 8,13 | 9,00 | 9,60 | 10,75 | 9,37 |
| 3 | 15,31 | 18,84 | 20,76 | 22,85 | 19,44 |
| 4 | 26,49 | 31,73 | 35,87 | 41,29 | 33,84 |
| 5 | 47,19 | 52,82 | 60,61 | 63,56 | 56,04 |
| 6 | 69,69 | 76,17 | 79,03 | 82,03 | 76,73 |
| 7 | 93,37 | 97,52 | 98,99 | 100,94 | 97,70 |
| 8 | 126,01 | 133,89 | 134,59 | 137,68 | 133,04 |
| 9 | 177,46 | 186,25 | 189,33 | 192,05 | 186,27 |
| 10 | 241,12 | 251,39 | 257,04 | 257,45 | 251,75 |
| 17 | 264,13 | 281,77 | 288,73 | 342,71 | 294,34 |

Vp = promedio del volumen promedio en todos los sitios ($\text{m}^3 \text{km}^{-1}$). **Edad** (años).

Desde el año uno hasta el 17, *A. mangium* aumentó el rendimiento en volumen (Figura 22). La especie, aumentó el crecimiento desde el año uno hasta el 10 y lo disminuyó en el año 17 (Figura 23). En el año uno, la especie obtuvo un volumen promedio entre sitios de $1.76 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$. En el año dos el rendimiento en volumen en los sitios fue: $8.13 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el de calidad baja, $9.00 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el de calidad media, $9.60 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el de calidad alta y $10.75 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad alta superó en $2.02 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ al sitio de calidad baja. El crecimiento osciló entre 4.06 entre y $5.38 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

A la edad cuatro, Oliva y Huguell¹²¹, reportan volúmenes de $32.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en sitios de calidad baja y de $156.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en sitios de calidad alta, para América central. Igualmente para esta edad, Rivas¹²², reporta que *A. mangium* en Nicaragua,

¹²¹ OLIVA, E y HUGUELL, D. Op. Cit. 8 p.

¹²² RIVAS, C. Op. Cit. 22 p.

obtiene un volumen de $39.20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, en los mejores sitios. El rendimiento en volumen encontrado en este estudio en el mejor sitio fue de $41.29 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$.

Tabla 19. Crecimiento en volumen (Incremento Medio Anual en volumen-IMAVp) de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | IMAVp |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 0,92 | 2,67 | 1,24 | 2,23 | 1,76 |
| 2 | 4,06 | 4,50 | 4,80 | 5,38 | 4,68 |
| 3 | 5,10 | 6,28 | 6,92 | 7,62 | 6,48 |
| 4 | 6,62 | 7,93 | 8,97 | 10,32 | 8,46 |
| 5 | 9,44 | 10,56 | 12,12 | 12,71 | 11,21 |
| 6 | 11,62 | 12,69 | 13,17 | 13,67 | 12,79 |
| 7 | 13,34 | 13,93 | 14,14 | 14,42 | 13,96 |
| 8 | 15,75 | 16,74 | 16,82 | 17,21 | 16,63 |
| 9 | 19,72 | 20,69 | 21,04 | 21,34 | 20,70 |
| 10 | 24,11 | 25,14 | 25,70 | 25,74 | 25,17 |
| 17 | 15,54 | 16,57 | 16,98 | 20,16 | 17,31 |

IMAVp = promedio del incremento medio anual en volumen de todos los sitios ($\text{m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$). **Edad** (años).

Figura 22. Crecimiento en volumen de *A. mangium*, según la calidad de sitio.

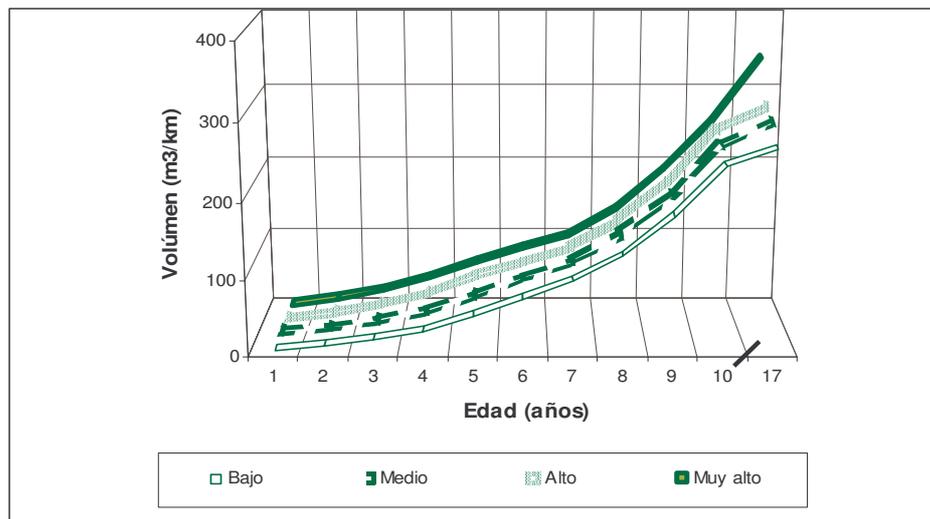
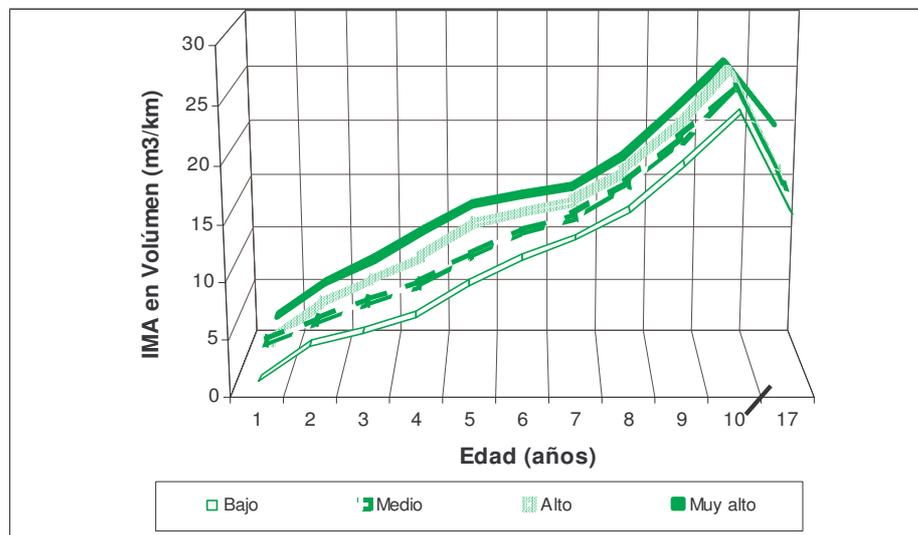


Figura 23. Rendimiento en volumen (Incremento Medio anual en volumen-MAVp) de *A. Mangium*, según la calidad de sitio.



Luján *et al*¹²³, reporta que a la edad de cinco años, el volumen de linderos ubicados en Panamá, fue: 90 m³ km⁻¹ en Guabito 1, 64 m³ km⁻¹ en Guabito 2. El volumen reportado en los linderos, es superior al obtenido en este estudio en la edad mencionada: 52.82 m³ km⁻¹ en Guabito 1 (sitio de calidad media) y 47.19 m³ km⁻¹ en Guabito 2 (se incluye en el sitio de calidad baja). Con crecimientos que oscilan entre 9.44 y 12.71 m³ km⁻¹ año⁻¹.

En *A. mangium*, el rendimiento en volumen continuó en aumento y, en el año diez se presentó el mayor crecimiento. En los sitios el rendimiento fue: 241.12 m³ km⁻¹ en el de calidad baja, 251.39 m³ km⁻¹ en el de calidad media, 257.04 m³ km⁻¹ en el de calidad alta y 257.45 m³ km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 16.33 m³ km⁻¹ al sitio de calidad baja. El crecimiento osciló entre 24.11 y 25.74 m³ km⁻¹ año⁻¹.

En el año 17 el rendimiento aumentó, pero en menor proporción que en los demás años y el crecimiento fue menor respecto al año 10. En los sitios el rendimiento fue: 264.13 m³ km⁻¹ en el de calidad baja, 281.77 m³ km⁻¹ en el de calidad media, 288.73 m³ km⁻¹ en el de calidad alta y 342.71 m³ km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 78.58 m³ km⁻¹ al sitio de calidad baja. El crecimiento osciló entre 15.54 y 20.16 m³ km⁻¹ año⁻¹.

¹²³ LUJAN, R.; BEER, J y KAPP, G. Op. Cit. 44 p.

El volumen de *A. mangium* presentó baja dispersión ($CV \leq 25$), por lo tanto sus promedios si representan a la clase de sitio del cual provienen y, a demás proveen bases confiables para la toma de desiciones a nivel profesional (Anexo 7).

3.5.2 Rendimiento y crecimiento en volumen de *Tectona grandis*. Se puede observar en la Tabla 20, la influencia de la calidad del sitio en el rendimiento en volumen de *Tectona grandis* a partir del quinto año de edad. El volumen promedio en San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2 (sitios de calidad baja) fue menor que en Guabito 1 (sitio de calidad media), Cocles (sitio de calidad alta) y El Silencio (sitio de calidad muy alta). La Figura 15 detalla el comportamiento del rendimiento en volumen promedio por calidad de sitio en el tiempo.

Tabla 20. Rendimiento en volumen de *T. grandis*, según la calidad de sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | Vp |
|------|--------|--------|--------|----------|--------|
| 1 | 2,78 | 2,44 | 3,30 | 2,83 | 2,83 |
| 2 | 11,40 | 12,22 | 13,16 | 12,74 | 12,38 |
| 3 | 40,12 | 44,20 | 42,48 | 31,87 | 39,67 |
| 4 | 46,01 | 55,01 | 62,84 | 56,84 | 55,17 |
| 5 | 62,52 | 67,30 | 77,04 | 80,52 | 71,84 |
| 6 | 88,37 | 92,63 | 97,30 | 100,53 | 94,71 |
| 7 | 116,97 | 130,06 | 130,94 | 132,01 | 127,49 |
| 8 | 157,36 | 173,67 | 179,54 | 182,30 | 173,22 |
| 9 | 233,83 | 256,91 | 271,71 | 291,64 | 263,52 |
| 10 | 274,16 | 300,97 | 337,87 | 360,43 | 318,36 |
| 17 | 336,86 | 399,56 | 425,62 | 457,67 | 404,93 |

Vp = promedio de volumen promedio en todos los sitios ($m^3 km^{-1}$). **Edad** (años).

Tectona grandis, obtuvo volúmenes más elevados que *Acacia mangium* en los sitios de crecimiento. El crecimiento de la especie se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Crecimiento en volumen (Incremento Medio Anual en volumen-IMAVp) de *Tectona grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | IMAVp |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 2,78 | 2,44 | 3,30 | 2,83 | 2,83 |
| 2 | 5,70 | 6,11 | 6,58 | 6,37 | 6,19 |
| 3 | 13,37 | 14,73 | 14,16 | 10,62 | 13,22 |
| 4 | 11,50 | 13,75 | 15,71 | 14,21 | 13,79 |
| 5 | 12,50 | 13,46 | 15,41 | 16,10 | 14,37 |
| 6 | 14,73 | 15,44 | 16,22 | 16,76 | 15,78 |
| 7 | 16,71 | 18,58 | 18,71 | 18,86 | 18,21 |
| 8 | 19,67 | 21,71 | 22,44 | 22,79 | 21,65 |
| 9 | 25,98 | 28,55 | 30,19 | 32,40 | 29,28 |
| 10 | 27,42 | 30,10 | 33,79 | 36,04 | 31,84 |
| 17 | 19,82 | 23,50 | 25,04 | 26,92 | 23,82 |

IMAVp = promedio del incremento medio anual en volumen en todos los sitios ($\text{m}^3 \text{km}^{-1} \text{año}^{-1}$).

En los tres primeros años de edad, *Tectona grandis* presentó un elevado rendimiento y crecimiento promedio en volumen: En el primer año el rendimiento promedio en volumen de los sitios fue de $2.83 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$, en el año dos de $12.38 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ y en el año tres de $39.67 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$. En estos años, el crecimiento promedio en volumen de los sitios fue de $2.83 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$, de $6.19 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y de $13.22 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente. La tendencia del rendimiento se puede observar en la Figura 24.

Mollinedo¹²⁴, reporta incrementos medios anuales en volumen de *Tectona grandis* de $3.44 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en sitios de calidad baja, a la edad de tres años. En este estudio, el sitio de calidad baja, obtuvo $13.37 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$, a la edad de tres años.

Desde el año cuatro al cinco, la especie disminuyó su crecimiento en volumen en los sitios de calidad baja y media en comparación con los tres primeros años de edad, y este continuó en aumento en los demás sitios. En el año cuatro, en promedio, la especie alcanzó un rendimiento de $55.17 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ y un crecimiento de $13.79 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en todos los sitios.

Para el año cinco Luján, *et al*¹²⁵, reporta en volumen $54 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en Guabito 2, $62 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en Guabito 1 y $76 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$ en El Silencio. Los valores son inferiores a los

¹²⁴ MOLLINEDO, M. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona oeste, Cuenca del canal de Panamá. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 2003. 93 p.

encontrados en esta investigación para los mismos sitios: 62.52 m³ km⁻¹ en Guabito 2 (uno de los sitios de calidad baja), 67.30 m³ km⁻¹ en Guabito 1 (sitio de calidad media) y 80.52 m³ km⁻¹ en El Silencio (sitio de calidad muy alta). El sitio de calidad muy alta superó en 13.22 m³ km⁻¹ al sitio de calidad baja. El crecimiento en volumen osciló entre 12.50 y 16.10 m³ km⁻¹ año⁻¹.

Desde el año seis al diez, la especie, aumenta su rendimiento y crecimiento en volumen respecto al de años anteriores. En el año seis, el crecimiento en volumen promedio de los sitios fue 94.71 m³ km⁻¹.

En el año 10, Somarriba¹²⁶, reporta un volumen de 184 m³ km⁻¹ en sitios de crecimiento bajo, 202 m³ km⁻¹ en sitios de crecimiento medio y de 235 m³ km⁻¹ en sitios de crecimiento alto en los linderos. Estos valores son inferiores a los encontrados en este estudio a la misma edad.

En el año 17, *Tectona grandis* aumentó su rendimiento en volumen y el crecimiento fue menor respecto al obtenido en el año 10. La especie, obtuvo un rendimiento de 336.86 m³ km⁻¹ en el sitio de calidad baja, 399.56 m³ km⁻¹ en el sitio de calidad media, 425.62 m³ km⁻¹ en el sitio de calidad alta y de 457.67 m³ km⁻¹ en el sitio de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 120.81 m³ km⁻¹ al sitio de calidad baja. El crecimiento osciló entre 19.82 y 26.92 m³ km⁻¹ año⁻¹. La tendencia del crecimiento, se puede observar en la Figura 25.

CONIF¹²⁷, reporta un valor promedio de 15 m³ ha⁻¹ para el IMA en volumen de parcelas permanentes de *Tectona grandis* en Magdalena (Colombia), a los 14 años de edad. En este estudio, el valor promedio de IMA en volumen fue 17.31 m³ km⁻¹ año, a los 17 años de edad.

Figura 24. Rendimiento en volumen de *Tectona grandis*, según la calidad de sitio.

¹²⁵ LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G. Op. Cit. 44 p.

¹²⁶ SOMARRIBA, E. *et al.* Op. Cit. p. 15-21.

¹²⁷ CONIF. Red nacional en parcelas permanentes de Crecimiento y Rendimiento en plantaciones de especies forestales de uso comercial en el país. Bogotá. Informe anual, 2003. 81 p.

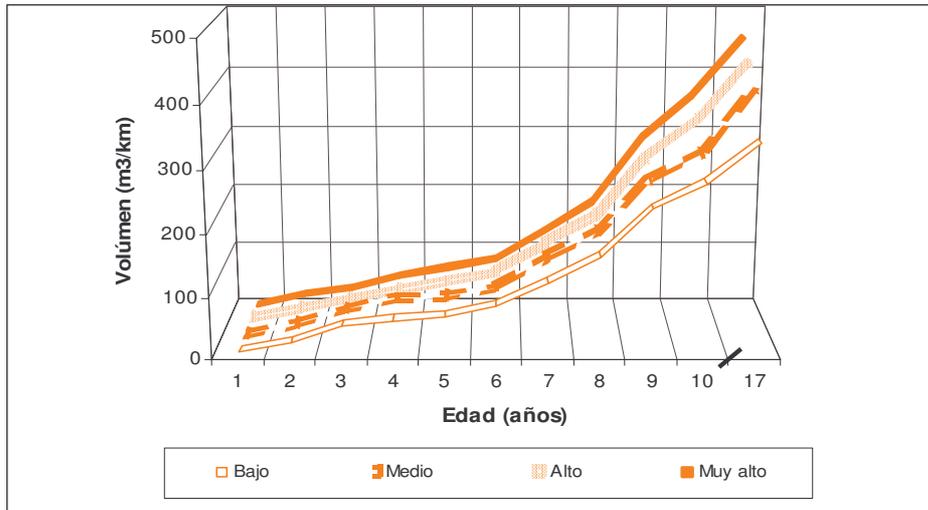
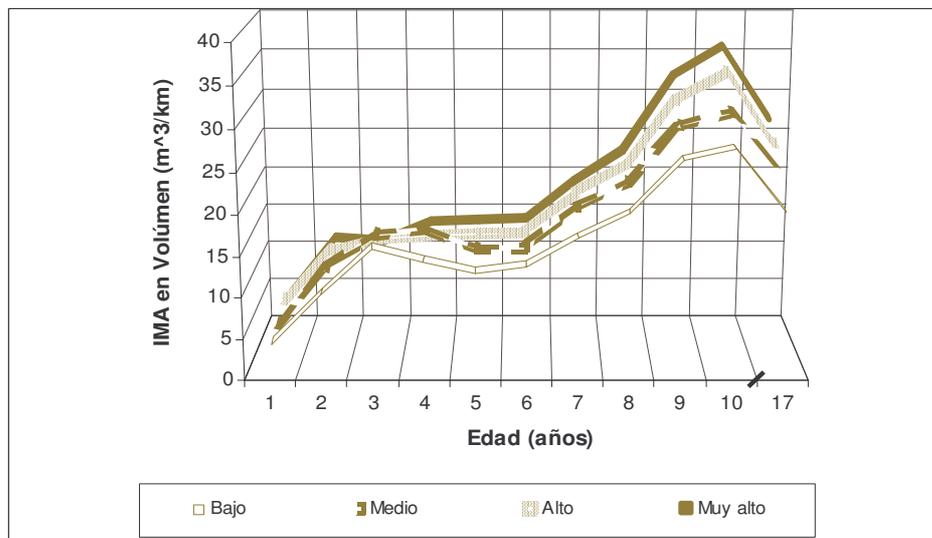


Figura 25. Crecimiento en volumen (Incremento Medio anual en altura-IMAH) de *Tectona grandis*, según la calidad de sitio.



Como se observa en el Anexo 8, se presentó baja dispersión en el volumen promedio de todos los sitios ($CV \leq 25\%$), siendo representativo para la toma de decisiones en este estudio.

3.6 CARBONO ALMACENADO Y FIJADO POR *Acacia mangium* Y *Tectona grandis*, EN LAS CUATRO CALIDADES DE SITIO.

3.6.1 Carbono almacenado y fijado en *Acacia mangium*. Como se puede detallar en la Tabla 22, el carbono almacenado en los linderos de *A. mangium* se vió influenciado por la calidad del sitio a partir del año dos, siendo bajo en Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio (sitio de calidad baja), medio en Guabito 1 (sitio de calidad media), alto en San Rafael (sitio de calidad alta) y, muy alto en Cocles (sitio de calidad muy alta). Su comportamiento en la tasa de fijación de carbono se presenta en la Tabla 23.

Tabla 22. Carbono almacenado por *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Baja | Media | Alta | Muy alta | pro C |
|------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 0,27 | 0,80 | 0,37 | 0,67 | 0,53 |
| 2 | 2,44 | 2,70 | 2,88 | 3,23 | 2,81 |
| 3 | 4,59 | 5,65 | 6,23 | 6,85 | 5,83 |
| 4 | 7,95 | 9,52 | 10,76 | 12,39 | 10,15 |
| 5 | 14,16 | 15,85 | 18,18 | 19,07 | 16,81 |
| 6 | 20,91 | 22,85 | 23,71 | 24,61 | 23,02 |
| 7 | 28,01 | 29,25 | 29,70 | 30,28 | 29,31 |
| 8 | 37,80 | 40,17 | 40,38 | 41,31 | 39,91 |
| 9 | 53,24 | 55,88 | 56,80 | 57,62 | 55,88 |
| 10 | 72,34 | 75,42 | 77,11 | 77,23 | 75,52 |
| 17 | 79,24 | 84,53 | 86,62 | 102,81 | 88,30 |

pro C=Promedio de carbono almacenado de todos los sitios en tn C km⁻¹. **Edad** (años).

Tabla 23. Carbono fijado por *A. mangium*, según la calidad de sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | pro C |
|------|------|-------|------|----------|-------|
| 1 | 0,27 | 0,80 | 0,37 | 0,67 | 0,53 |
| 2 | 1,22 | 1,35 | 1,44 | 1,61 | 1,41 |
| 3 | 1,53 | 1,88 | 2,08 | 2,28 | 1,94 |
| 4 | 1,99 | 2,38 | 2,69 | 3,10 | 2,54 |
| 5 | 2,83 | 3,17 | 3,64 | 3,81 | 3,36 |
| 6 | 3,48 | 3,81 | 3,95 | 4,10 | 3,84 |
| 7 | 4,00 | 4,18 | 4,24 | 4,33 | 4,19 |
| 8 | 4,73 | 5,02 | 5,05 | 5,16 | 4,99 |
| 9 | 5,92 | 6,21 | 6,31 | 6,40 | 6,21 |
| 10 | 7,23 | 7,54 | 7,71 | 7,72 | 7,55 |
| 17 | 4,66 | 4,97 | 5,10 | 6,05 | 5,19 |

pro C=Promedio de carbono fijado de todos los sitios en tn C km⁻¹ año⁻¹.

Desde el año uno hasta el 17, *A. mangium* aumentó progresivamente el carbono almacenado y fijado. La tendencia del carbono almacenado en la especie se puede observar en la Figura 26.

Andrade¹²⁸, menciona que en el primer año de edad, 370 arboles de *A. mangium*, en sistemas silvopastoriles, almacenaron 3.5 tn C ha⁻¹ en Guápiles, Costa Rica. En este estudio, a la misma edad, 400 árboles *A. mangium* almacenaron 0.53 tn C km⁻¹, siendo este valor inferior al encontrado en Guápiles.

En el año dos el carbono almacenado en los sitios fue: 2.44 tn C km⁻¹ en el de calidad baja, 2.70 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 2.88 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y 3.23 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad alta superó en 0.79 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 1.22 y 1.61 tn C km⁻¹ año⁻¹.

En el año tres, el carbono almacenado fue de 4.59 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja y de 6.85 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 2.26 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja, y la tasa de fijación de carbono osciló entre 1.53 y 2.28 tn C km⁻¹ año⁻¹. En el año cuatro, se obtuvo un carbono almacenado de 7.95 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja y de 12.39 tn C km⁻¹ en el de calidad baja, con una tasa de fijación de carbono comprendida entre 1.99 y 3.10 tn C km⁻¹ año⁻¹. En el año cinco el carbono almacenado fue de 14.16 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja y de 19.07 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 4.91 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 2.83 y 3.81 tn C km⁻¹ año⁻¹.

En *A. mangium* el carbono almacenado y fijado continuó en aumento hasta el año 10 (año de mayor fijación), obteniendo: 72.34 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja, 75.42 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad media, 77.11 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad alta y de 77.23 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 4.89 tn C km⁻¹. La tasa de fijación de Carbono osciló entre 7.23 y 7.72 tn C km⁻¹ año⁻¹.

En el año 17 el carbono almacenado aumentó, pero en menor proporción que en los demás años y la tasa de fijación fue menor que la obtenida en el año 10.

El carbono almacenado en los sitios fue: 79.24 tn C km⁻¹ en el de calidad baja, 84.53 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 86.62 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y 102.81 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. El sitio de calidad muy alta superó en 23.57 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación estuvo comprendida entre 4.66 y 6.05 tn C km⁻¹ año⁻¹. La tendencia del carbono fijado se puede observar en la Figura 27.

Figura 26. Carbono almacenado por *A. mangium*, según la calidad de sitio.

¹²⁸ ANDRADE, H. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucaliptus deglupta* en el trópico húmedo. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999. 70 p.

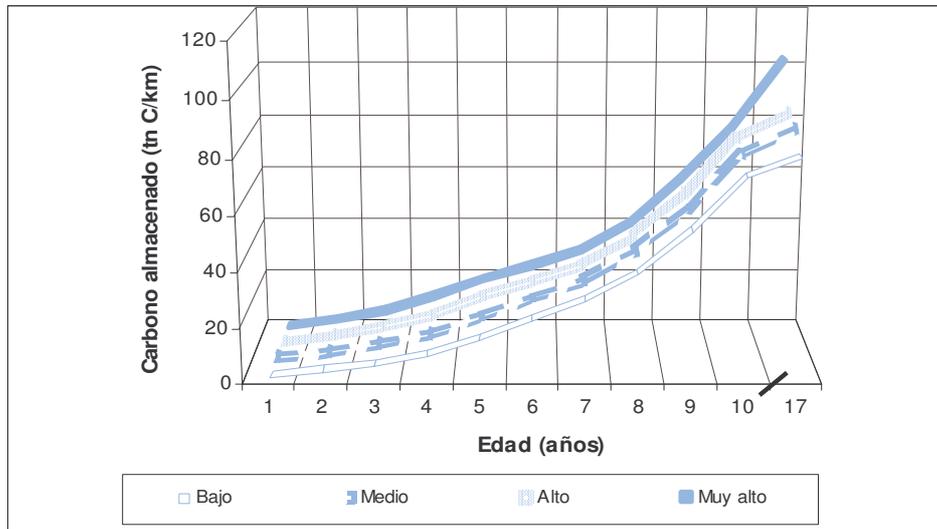
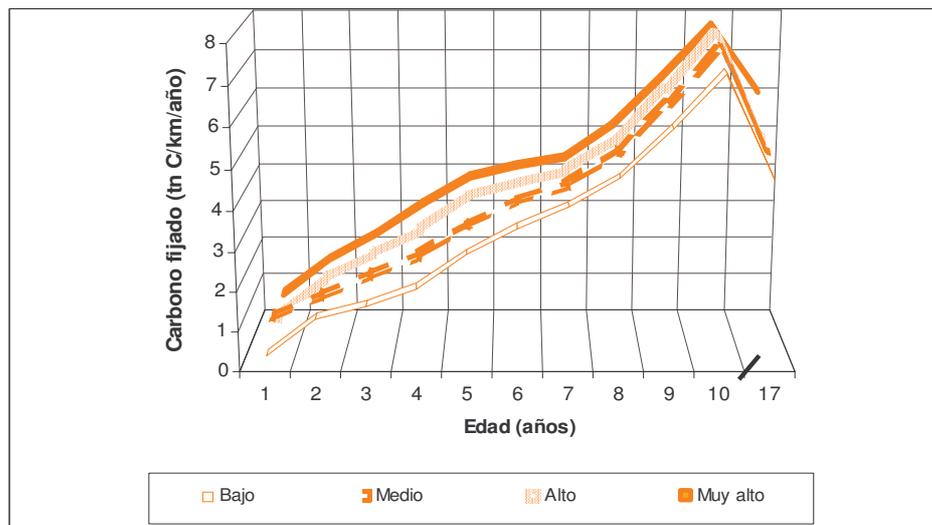


Figura 27. Carbono fijado por *A. mangium*, según la calidad de sitio.



3.6.2 Carbono almacenado y fijado por *Tectona grandis*. Como se puede detallar en la Tabla 24, desde el quinto año de edad, se presentó la influencia de la calidad del sitio en el almacenamiento y la tasa de fijación de carbono de *Tectona grandis*. Desde este año, la especie almacenó y fijó bajo contenido de carbono en el sitio de calidad baja, medio en sitios de calidad media, alto en sitios

de alta calidad y muy alto en sitios de calidad muy alta. El carbono fijado se presenta en la Tabla 25.

Tabla 24. Carbono almacenado por *T. grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | pro C almac |
|------|--------|--------|--------|----------|-------------|
| 1 | 0,85 | 0,74 | 1,01 | 0,86 | 0,86 |
| 2 | 3,48 | 3,73 | 4,01 | 3,89 | 3,78 |
| 3 | 12,24 | 13,48 | 12,96 | 9,72 | 12,10 |
| 4 | 14,03 | 16,78 | 19,17 | 17,34 | 16,83 |
| 5 | 19,07 | 20,53 | 23,50 | 24,56 | 21,91 |
| 6 | 26,95 | 28,25 | 29,68 | 30,66 | 28,89 |
| 7 | 35,68 | 39,67 | 39,94 | 40,26 | 38,89 |
| 8 | 47,99 | 52,97 | 54,76 | 55,60 | 52,83 |
| 9 | 71,32 | 78,36 | 82,87 | 88,95 | 80,37 |
| 10 | 83,62 | 91,79 | 103,05 | 109,93 | 97,10 |
| 17 | 102,74 | 121,87 | 129,82 | 139,59 | 123,50 |

pro C=Promedio de carbono almacenado de todos los sitios en tn C km^{-1} . **Edad** (años).

Tabla 25. Carbono fijado por *T. grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad | Bajo | Medio | Alto | Muy alto | pro C fijado |
|------|------|-------|-------|----------|--------------|
| 1 | 0,85 | 0,74 | 1,01 | 0,86 | 0,86 |
| 2 | 1,74 | 1,86 | 2,01 | 1,94 | 1,89 |
| 3 | 4,08 | 4,49 | 4,32 | 3,24 | 4,03 |
| 4 | 3,51 | 4,19 | 4,79 | 4,33 | 4,21 |
| 5 | 3,81 | 4,11 | 4,70 | 4,91 | 4,38 |
| 6 | 4,49 | 4,71 | 4,95 | 5,11 | 4,81 |
| 7 | 5,10 | 5,67 | 5,71 | 5,75 | 5,56 |
| 8 | 6,00 | 6,62 | 6,85 | 6,95 | 6,60 |
| 9 | 7,92 | 8,71 | 9,21 | 9,88 | 8,93 |
| 10 | 8,36 | 9,18 | 10,31 | 10,99 | 9,71 |
| 17 | 6,04 | 7,17 | 7,64 | 8,21 | 7,26 |

pro C=Promedio de carbono fijado de todos los sitios en $\text{tn C km}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Durante los años de estudio, *Tectona grandis* almacenó y fijó mas carbono que *Acacia mangium* en los sitios de crecimiento. El comportamiento del carbono almacenado, se puede detallar en la Figura 28.

En los cuatro primeros años de edad *Tectona grandis*, aumentó el promedio de carbono almacenado y fijado. En el primer año el promedio de carbono almacenado fue de 0.86 tn C km⁻¹, en el año dos de 6.70 tn C km⁻¹, en el año tres de 12.54 tn C km⁻¹ y en el año cuatro de 17.34 tn C km⁻¹. La tasa promedio de fijación de carbono en los sitios fue de 1.30 tn C km⁻¹ año⁻¹, de 3.35 tn C km⁻¹ año⁻¹, de 4.12 tn C km⁻¹ año⁻¹ y de 4.33 tn C km⁻¹ año⁻¹, respectivamente. La tendencia de fijación de carbono se puede observar en la Figura 29.

Desde el año cinco al seis, *Tectona grandis* aumentó su almacenamiento de carbono en menor grado que en años atrás. La tasa de fijación de carbono disminuyó en los sitios de calidad baja y media y aumentó en los sitios de calidad alta y muy alta, respecto al año cuatro.

En el año cinco, el carbono almacenado en los sitios fue: 19.11 tn C km⁻¹ en el de calidad baja, 20.55 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 20.86 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y 21.20 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. En carbono almacenado, el sitio de calidad muy alta superó en 2.09 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 4.06 y 4.24 tn C km⁻¹ año⁻¹.

Para *Tectona grandis*, Cubero y Rojas¹²⁹, reportan en sitios de Cantones Hojancha y Nicoya (Costa Rica) carbono almacenado de 16.47 tn C ha⁻¹ y una tasa de fijación de 3.29 tn C ha⁻¹, a la edad de cinco años. En este estudio el promedio de carbono almacenado de la especie fue de 20.43 tn C km⁻¹ y, el promedio de carbono fijado fue de 4.09 tn C km⁻¹ año.

En el año seis, el carbono almacenado en los sitios fue: 24.35 tn C km⁻¹ en el de calidad baja, 24.85 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 25.23 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y 25.55 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. En carbono almacenado, el sitio de calidad muy alta superó en 1.2 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 3.82 y 4.26 tn C km⁻¹ año⁻¹.

Desde el año siete al diez, la especie aumentó el almacenamiento y la tasa de fijación de carbono en todos los sitios. En el año siete el carbono almacenado en los sitios fue: 35.68 en el de calidad baja, 39.67 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 39.94 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y 40.26 tn C km⁻¹ en el de calidad muy alta. El carbono almacenado en el sitio de calidad muy alta supero en 4.58 tn C km⁻¹ al de calidad baja. La tasa de fijación de carbono estuvo comprendida entre 5.10 y 5.75 tn C km⁻¹ año⁻¹.

¹²⁹ CUBERO, J.; y ROJAS, S. Op. Cit.

Cubero y Rojas¹³⁰, reportan en sitios de Cantones Hojancha y Nicoya (Costa Rica), carbono almacenado en *Tectona grandis* de 22.56 tn C ha⁻¹ y una tasa de fijación de 3.10 tn C ha⁻¹, a los ocho años de edad. En este estudio el promedio de carbono almacenado de la especie fue de 52.83 tn C km⁻¹ y el promedio de carbono fijado fue de 6.60 tn C km⁻¹ año⁻¹.

En el año diez, el carbono almacenado por la especie fue: 83.62 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja, 91.79 tn C km⁻¹ en el de calidad media, 103.05 tn C km⁻¹ en el de calidad alta y de 109.93 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad muy alta. En carbono almacenado, el sitio de calidad muy alta superó en 26.31 tn C km⁻¹ al de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 8.36 y 10.99 tn C km⁻¹ año⁻¹.

En el año 17, *Tectona grandis* aumentó el carbono almacenado y, la tasa de fijación de carbono fue menor respecto a la obtenida en el año 10. La especie , almacenó 102.74 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad baja, 121.87 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad media, 129.82 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad alta y 139.59 tn C km⁻¹ en el sitio de calidad muy alta. En carbono almacenado, el sitio de calidad muy alta superó en 36.85 tn C km⁻¹ al sitio de calidad baja. La tasa de fijación de carbono osciló entre 6.04 y 8.21 tn C km⁻¹ año⁻¹.

Figura 28. Carbono almacenado por *T. grandis*, según la calidad de sitio.

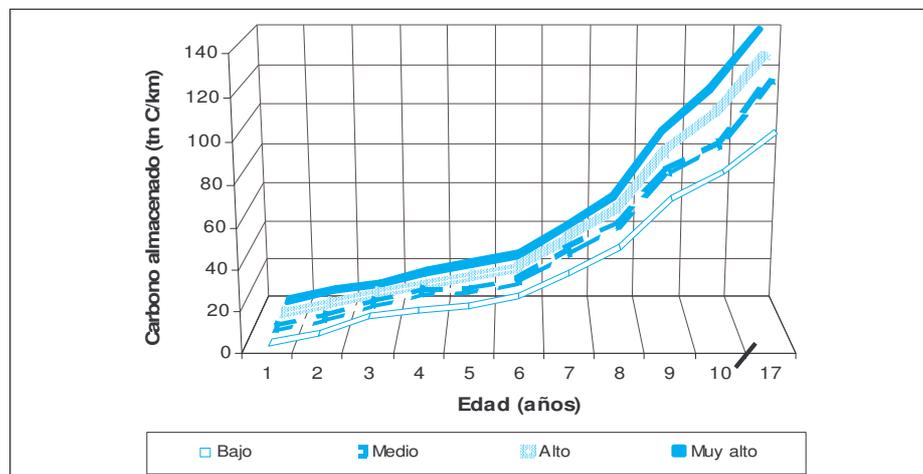
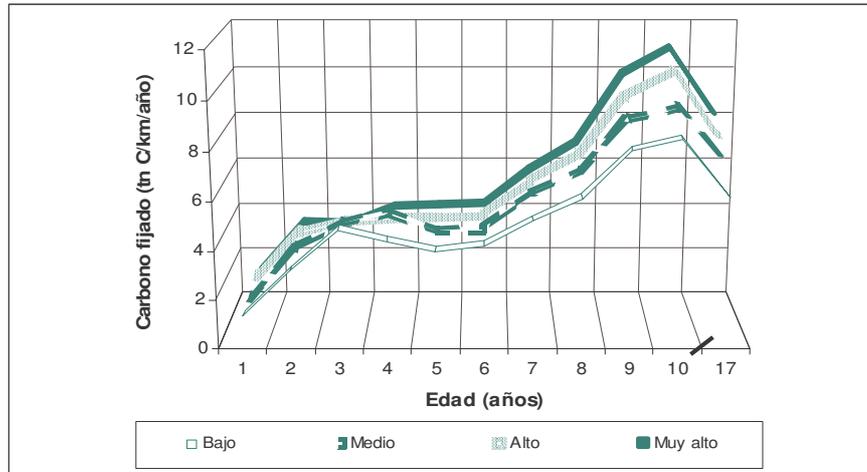


Figura 29. Carbono fijado por *T. grandis*, según la calidad de sitio.

¹³⁰ CUBERO, J.; y ROJAS, S. Op. Cit.



3.7 MODELOS DE RENDIMIENTO Y CRECIMIENTO EN ALTURA, DIÁMETRO, VOLUMEN Y CARBONO PARA *Acacia mangium* Y *Tectona grandis*. Las alturas y diámetros de las especies medidas en 10 años, proporcionaron elementos suficientes para estimar modelos de rendimiento y crecimiento en diámetro, altura, volumen y carbono, los cuales se presentan en la Tabla 26. Los valores de las variables mencionadas se ajustaron muy bien al modelo de rendimiento y crecimiento tipo Shumacher¹³¹.

Tabla 26. Modelos de rendimiento y crecimiento con sus estadígrafos más importantes de *A. mangium* y *T. grandis* en linderos de Costa Rica y Panamá.

| Especies | Variables | Rendimiento ($Y = e^{a-b/edad}$) y Crecimiento ($Y' = a/edad^2 * e^{a-b/edad}$) | | | | |
|-------------------|-----------|---|---------|--------------------|----------|-------|
| | | a | B | R ² (%) | RMSE | Anexo |
| <i>A. mangium</i> | Altura | 3.21066 | 1.94089 | 98.80 | 0.085486 | 9 |
| | Diámetro | 3.15811 | 1.68025 | 81.20 | 0.221369 | 11 |
| | Volumen | 5.31901 | 5.22498 | 89.46 | 0.494179 | 13 |
| | Carbono | 4.11420 | 5.22119 | 89.46 | 0.494738 | 15 |
| <i>T. grandis</i> | Altura | 3.27048 | 1.87359 | 94.60 | 0.123650 | 10 |
| | Diámetro | 3.30468 | 1.74388 | 82.00 | 0.223813 | 12 |
| | Volumen | 5.60425 | 4.99492 | 90.35 | 0.450037 | 14 |
| | Carbono | 4.41760 | 4.99838 | 90.38 | 0.449308 | 16 |

Y= rendimiento en m, **Y'**: crecimiento en m, **edad**: n^o de años (de 1 a 10); **a** y **b**: coeficientes estimados por regresión, **R²**: coeficiente de determinación en %; **RMSE**: raíz del cuadrado medio del error.

¹³¹ HUGHELL, D. Op. Cit.

Los modelos tipo Shumacher para *A. mangium* y *T. grandis*, demostraron que la relación entre cada variable (altura, diámetro, volumen, carbono) y la edad, fue significativa ($p\text{-valor} < 0.01$) con un nivel de confianza del 99%.

Se obtuvieron altos coeficientes de determinación (R^2) en los modelos de crecimiento y rendimiento tipo Shumacher, los cuales oscilaron entre 81.20 y 98.90 %. De manera que se demostró que los modelos explicaron en gran medida de la variabilidad en altura, diámetro, volumen y contenido de carbono en los sitios de evaluación.

El valor de de la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) de los modelos, reafirmó la confiabilidad, para la estimación de cada variable, con un error bajo.

Los modelos de rendimiento y crecimiento de las variables altura, diámetro, volumen, y carbono de las especies en estudio, se pueden observar en las Figuras 30, 31, 32 y 33 respectivamente. En cuanto a las variables mencionadas, se puede apreciar como *T. grandis* obtiene un rendimiento mayor que *A. mangium* a lo largo del tiempo. Las especies tienden a aumentar el rendimiento en los primeros años y a medida que se acercan a la edad 10 tienden a estabilizarlo. El crecimiento tiene un comportamiento elevado en los primeros años, este tiende a disminuir y unificarse a medida que la edad aumenta.

Figura 30. Modelos de rendimiento y crecimiento en altura, para *A. mangium* y *Tectona grandis*.

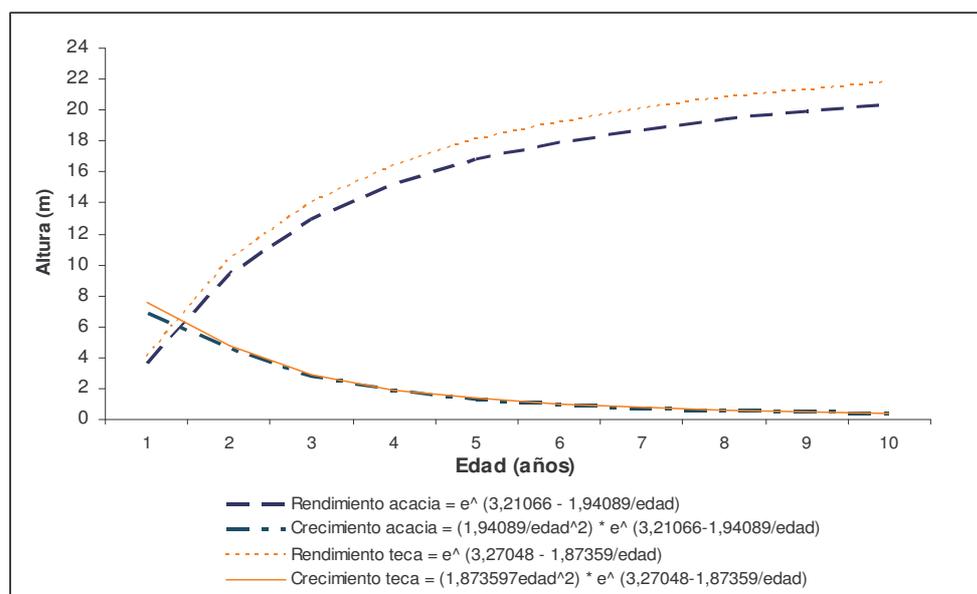


Figura 31. Modelos de rendimiento y crecimiento en diámetro, para *A. mangium* y *Tectona grandis*.

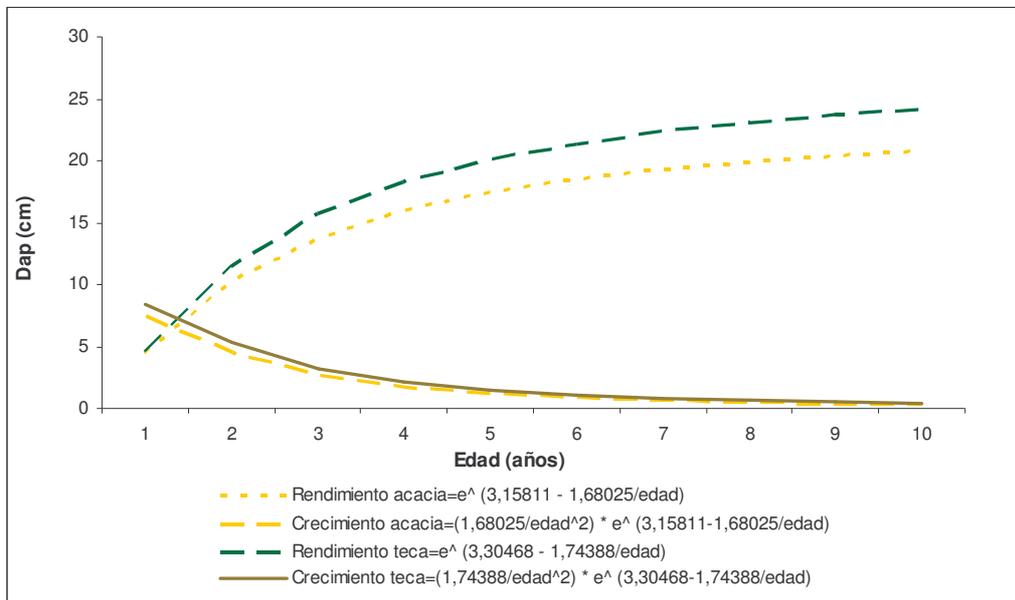


Figura 32. Modelos de rendimiento y crecimiento en volumen, para *A. mangium* y *T. grandis*.

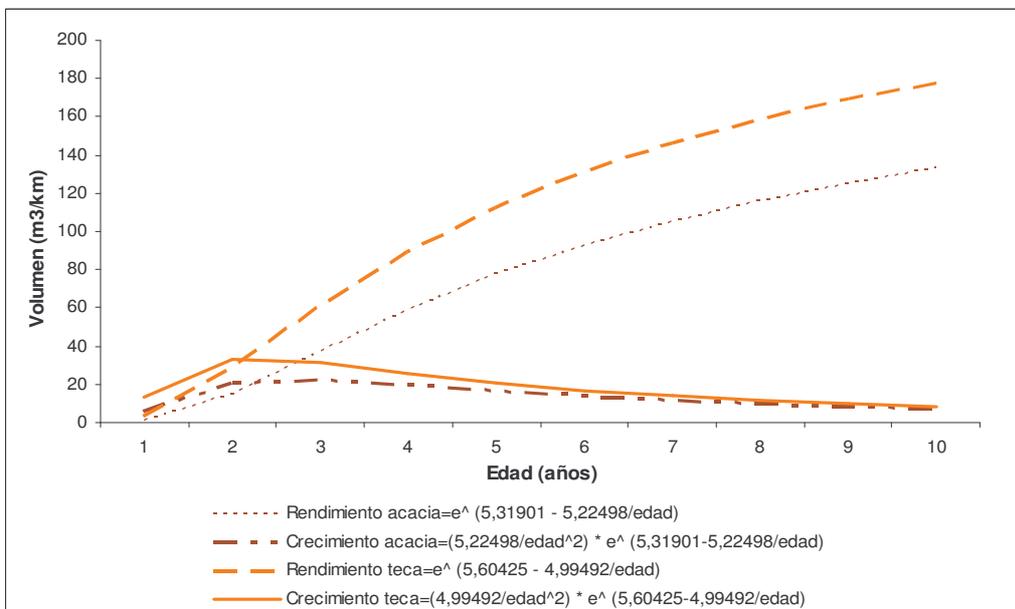
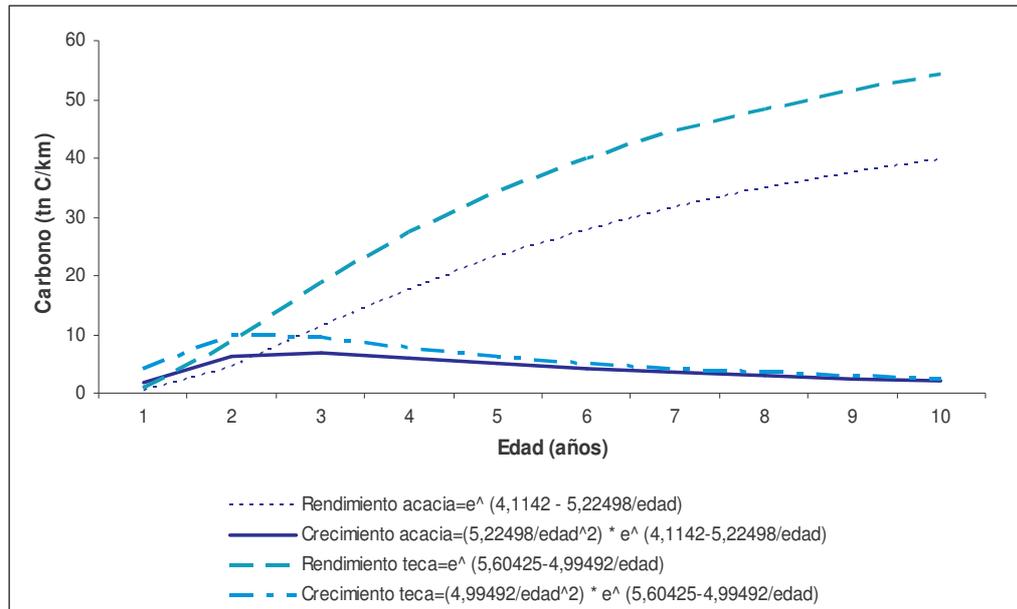


Figura 33. Modelos de rendimiento y crecimiento de carbono, para *A. mangium* y *T. grandis*.



4. CONCLUSIONES

La altura dominante, permitió describir el crecimiento de *Acacia mangium* y *Tectona grandis* en función del índice de sitio, debido a que manifiesta la calidad para producir. La variabilidad relativa de las alturas dominantes, representada por los coeficientes de variación muestran que los datos son altamente confiables ($CV \leq 18\%$).

Desde el año dos, *Acacia mangium* presentó bajos crecimientos en altura, diámetro, volumen y contenido de carbono en Hone Creek, Bordon, Guabito 2 y El Silencio (sitios de calidad baja), medios en Guabito 1 (sitio de calidad media), altos en San Rafael (sitio de calidad alta), y los mejores crecimientos en Cocles (sitio de calidad muy alta).

Desde el año cinco, *T. grandis*, presentó bajos crecimientos en altura, diámetro, volumen y contenido de carbono en San Rafael, Hone Creek, Bordon y Guabito 2 (sitio de calidad baja), media en Guabito 1 (sitio de calidad media), alta en Cocles (sitio de calidad alta), y muy alta en El Silencio (sitio de calidad muy alta).

Los bajos coeficientes de variación ($CV \leq 25\%$) obtenidos, demostraron que los datos de altura, diámetro y volumen, presentan baja dispersión respecto a su valor promedio y por lo tanto representan al lindero de origen.

Este estudio demuestra que la evaluación de servicios ambientales importantes como el almacenamiento y la fijación de carbono, se pueden lograr utilizando datos de medición permanente y métodos relativamente sencillos.

Acacia mangium, aunque tolera sitios con suelos de drenaje pobre como en el caso de Guabito 1 (sitio de calidad media), suelos compactados y de fertilidad media como en el caso de San Rafael (Sitio de calidad alta), crece mejor en sitios de buen drenaje, no compactados, de textura arenosa y de fertilidad alta, como en el caso de Cocles (sitio de calidad muy alta).

Tectona grandis, aunque tolera drenaje imperfecto, como en el caso de Guabito 1 (sitio de calidad media), y drenaje excesivo como en el caso de Cocles (sitio de

calidad alta), crece mejor en sitios de drenaje moderado y tolera ampliamente suelos compactados como en el caso de El Silencio (sitio de calidad muy alta).

El pH del sitio, es una característica importante para el crecimiento de *Tectona grandis*, se observó que entre menos ácido sea, se obtiene un buen crecimiento. Como ocurrió en el caso de El Silencio en donde el mayor crecimiento se logró con un pH de 6.8, con relación al sitio más ácido en donde se obtuvo el menor crecimiento.

Tectona grandis presentó mejor crecimiento que *Acacia mangium*, por lo tanto es la especie más opcionada a elegir para establecerla en buenos sitios.

Los datos de altura, diámetro, volumen y carbono, se ajustaron muy bien al modelo de crecimiento y rendimiento tipo Shumacher, generando modelos con alto grado de precisión y confiabilidad, de acuerdo con los estadígrafos: coeficiente de determinación (81.20 a 98.90%), p-valor < 0.01, y raíz del cuadrado medio del error (0.0 85486 a 0.494738).

El carbono almacenado y fijado en el fuste de las especies evaluadas, varía de acuerdo al sitio y a la edad de las plantaciones.

Los linderos maderables, son sumideros de dióxido de carbono, debido a la capacidad que tienen para almacenarlo y conservarlo. La utilización de este sistema agroforestal es mas eficiente, cuando el producto final es madera para ser transformada en productos duraderos de construcción, mueblería y carpintería, logrando retenener carbono durante periodos más prolongados después del aprovechamiento, de manera que estos se conviertan en sistemas de continuo almacenamiento y fijación de carbono.

5. RECOMENDACIONES

Determinar el índice de sitio, haciendo uso de la altura dominante, ya que esta es una manifestación de la calidad del sitio, relativamente independiente de la densidad, la mezcla de las especies y los tratamientos de manejo.

Seleccionar y plantar *Acacia mangium* y *Tectona grandis* en sitios con alta y muy alta calidad con el fin de obtener los mejores crecimientos.

Para estimar el índice de sitio, tener en cuenta otras variables (edáficas, climáticas, entre otras) disponibles a la hora de evaluar un sitio elegido, ya que estas también contribuyen en el crecimiento de las especies.

Realizar nuevamente un análisis de suelos en los sitios en donde se ubican los linderos, para evaluar el cambio químico y físico de los mismos en el tiempo.

Aplicar la metodología de Is para identificar las calidades de sitio que determinan el crecimiento y el rendimiento de las especies en los terrenos, en especial cuando se tienen definidas especies prioritarias en programas de incentivos forestales, con el fin de garantizar los logros de estos.

Lograr modificar la acidez del suelo, por ejemplo adicionando cal en sitios con pH ácido, permitiendo que se mejore el crecimiento de *Tectona grandis* (especie basófila),

.

Modificar el drenaje a través de estructuras que permitan drenar el sitio y mejorar el crecimiento de teca, con el fin de mejorar la aireación del suelo.

Aplicar los sistemas agroforestales, como los linderos con estas especies, para contribuir a controlar los niveles de dióxido de carbono, debido a que estos además de tener un costo financiero bajo, incrementan carbono en el suelo.

Que en lo posible, el uso de la madera proveniente de las especies, sea destinado a productos duraderos como por ejemplo en construcción y carpintería,

reteniendo de esta manera el carbono durante periodos más prolongados luego del aprovechamiento.

Utilizar el modelo de tipo Shumacher, basado en principios biológicos, ya que produce ecuaciones compatibles de rendimiento y crecimiento, con alto grado de confiabilidad y predicción.

Utilizar los modelos de la presente investigación para las especies evaluadas bajo condiciones agroecológicas similares a la de la zona de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN. *et al*, L. Costos de prácticas agrícolas para la generación de Servicios Ambientales en El Salvador. El Salvador: PRISMA. 2001. 23 p.

ALBRECHT y KANDJI. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems, citado por ROJAS, Jairo. Secuestro de carbono y uso de agua en Sistemas Silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de educación para el desarrollo y la conservación, Escuela de posgrado. Turrialba (Costa Rica), 2005. 71 p.

ALDER. D. Estimación del volumen Forestal y Predicción del rendimiento. En: FAO Montes. Roma (Vol 2), no 22/2; 80 p.

ALFARO, M. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el Valle Central de Costa Rica. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Nacional. Facultad de Ciencias de la Tierra y Mar, Escuela de Ciencias Ambientales, 1983. 132 p.

_____. Revista Forestal Centro Americana. Turrialba, Costa Rica. No 19 Año 6, 1997. p. 11-14.

ANDRADE, H. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999. 70 p.

AUCKLAND, I. *et al*. [En línea]. Colocando los cimientos para el desarrollo limpio: preparando al sector del uso de la tierra. [Citado el 4 de junio de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.capacity.org>. p. 39.

AVILA, G. Costa Rica, Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa Educación para el Desarrollo y la Conservación, 2000. p.11.

BEER, J.; Consideraciones básicas para el establecimiento de especies maderables en linderos. Turrialba, Costa Rica: Centro de Investigación y Enseñanza Tropical CATIE. (Serie generación y transferencia de tecnología; no1), 1993. 11 p.

CALDERO, S.; *et al.* Inventarios forestales para contabilidad de carbono: manual de procedimientos. Valdivia, Chile. UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE-FONDEF- INFOR, 2002. 38 p.

CAMACHO, A.; y GONZALES, J. Linderos maderables. Turrialba, Costa Rica: Centro de Investigación y Enseñanza Tropical CATIE. (Serie materiales de enseñanza; no. 31), 1995. 28 p

CAMPOS, J.; *et al.* Almacenamiento de carbono y conservación de biodiversidad por medio de actividades forestales en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica: potencialidades y limitantes, Turrialba (Costa Rica): CATIE. Unidad de manejo de bosques naturales. (Serie técnica informe técnico; no. 314), 2000. 70 p.

CARPIO, M. Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales, San José, C.R.: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1992. 338 p.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA. Mangium (*Acacia mangium* Willd): especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE. (Serie Técnica. Informe técnico no.196; Colección de Guías Silviculturales no.5), 1992. 58 p.

CONIF. Red nacional en parcelas permanentes de Crecimiento y Rendimiento en plantaciones de especies forestales de uso comercial en el país. Bogotá. Informe anual, 2003. 81 p.

CUBERO, J.; y ROJAS, S. 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. Costa Rica. Trabajo de grado (Licenciado en Ciencias Forestales con énfasis en Desarrollo Forestal). Universidad Nacional. Facultad de Ciencias de la Tierra y El Mar. Escuela de Ciencias Ambientales, 1999. p. 34.

CURTIS, R. y REUKEMA, D. Crown development and site estimates in a Douglas-fir plantation spacing test. En: Forest Science. EE.UU, 16 (3), 1970. p. 287- 300.

Estimados de rendimiento para la plantación de Acacia mangium. [en línea]. 2003. [Citado 23 agosto de 2007]. Disponible en internet: <http://www.3fkanguroid.com>

Estrategia Española sobre el cambio climático para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto. Vol. 3. No.3 (diciembre del 2003). Madrid. Adoptado por la comisión permanente. 220 p.

FUNDACIÓN SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, 2000. 33 p.

HERRERA, B y CAMPOS J. Avances en la investigación sobre la calidad de sitio en bosques secundarios tropicales. En: Revista forestal centroamericana CATIE. Costa Rica, nº 19 (Abr- Jun1997). p. 13-19.

HUGHELL, D. Lineamientos para el desarrollo de modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de árboles de uso múltiple. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido. Turrialba, Costa Rica, 1991.131 p.

INBIO. [en línea]. 2000. [Citado el 16 de julio de 2006]. Disponible en internet: <http://www.inbio.ac.cr/bims.html>

LEON, M. Sistemas agroforestales. Bogotá: Editorial gente nueva, 1993. p.15.

LUJAN, R.; BEER, J.; y KAPP, G. Manejo y crecimiento de linderos de tres especies maderables en el distrito de Changuinola, Panamá. Turrialba, Costa Rica, CATIE, (Serie Técnica, Informe Técnico CATIE, no.242), 1996. 41 p.

LUJAN, R.; y CAMACHO, B. Manejo y crecimiento de linderos, resultados de ensayos del Proyecto agroforestal CATIE/GTZ de tres especies maderables en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, C.R.: Unidad de producción de medios CATIE. (Serie Técnica, Informe Técnico no.224), 1994. 94 p.

Ministerio de Medio Ambiente Español. Convención Marco de las Naciones Unidas: los diez primeros años. [Citado el 1 de Octubre de 2007]. Disponible en Internet: <http://unfccc.int/resource/docs/publications.pdf>. p. 40-41.

MOLLINEDO, M. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona oeste, Cuenca del canal de Panamá. Turrialba, Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 2003. 93 p.

MONTAGNINI, F.; *et al.* Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones. San José, Costa Rica: Organización para estudios Tropicales, 1992. p. 61.

NIEUWENHUYSE, A. Los suelos de los sitios experimentales del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Guápiles, Costa Rica, 1994. 134 p.

OLIVA, E. Comportamiento en Plantación de Mangium (*Acacia mangium* Willd) y Aripín (*Caesalpinia velutina* (B Y R) Standl) en America Central. Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1990. 117 p.

_____ y HUGUELL, D. Modelo de Crecimiento y Rendimiento de mangium (*Acacia mangium* Willd), en Costa Rica, Honduras y Panamá. En: SILVOENERGÍA. N° 35. Octubre. 1990. 8 p.

OSPINA, A. Agroforestería: Aportes conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal. 1 ed. Cali: Asociación del Colectivo de Agroecología del Suroccidente Colombiano, 2003. p.18.

PEREZ, D.; y KANNINEN, M. Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* L.F. en Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. No.39-40, 2002; P 56-59.

PRODAN, M.; *et al.* Mensura forestal. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible / IICA, ISSN 1027-2631; no. A1/SC-97-01, no. 1), 1997. 586 p.

REYES, C. Estimación del incremento en *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* a partir de variables del árbol y factores de sitio en un bosque secundario en Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Facultad de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Turrialba, Costa Rica, 1997. 119 p.

REVOLORIO, A. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de Estudios de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Turrialba, Costa Rica, 1996. 141 p.

RIVAS, C. Plantaciones comerciales en los departamentos de Chinandega y Matagalpa, Nicaragua. Managua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2004. 22 p.

ROJAS, J. Secuestro de carbono y uso de agua en Sistemas Silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de educación para el desarrollo y la conservación, Escuela de postgrado. Turrialba, Costa Rica, 2005. 71 p.

SEGURA, M. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis* en un Bosque de altura en la cordillera de Talamanca. Trabajo de grado (Lic. Ingeniero Forestal). Universidad de Heredia. Costa Rica. Turrialba, 1997. 34 p

_____. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, 1999., 119 p.

SEGURA, M y VENEGAS, G. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. CATIE. (Serie Técnica no. 306); PRESS: Suma de cuadrados del error. Turrialba, 1999. 46 p.

SEMINARIO MERCADO DEL CARBONO (1o. : 2000: Chile). Actas del seminario mercado del carbono: FONDEF, UACH-INFOR, 2000. 61 p.

SOMARRIBA, E. El análisis y mejoramiento de las plantaciones lineales de una finca. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 8, no. 30, 2001. p. 56-57.

_____. *et al.* Linderos de *Tectona grandis* L.F. en el trópico húmedo de Costa Rica y Panamá. En: Revista Forestal Centroamericana (CATIE). oct-dic 1999. (no.28). p. 15-21.

TÖPFER, K.; *et al.* Cambio climático. Suiza: PNUMA-UNFCCC, 2004. 65 p.

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción de mercado mundial: inventario de biomasa y contabilidad de carbono. Valdivia, Chile. 2002. p. 1.

VAIDES, E. Características de sitio que determinan el crecimiento y la productividad de teca (*Tectona grandis* L. F.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, 2004. 81 p.

VALDIVIESO, T. Crecimiento de laurel (*Cordia alliodora* [Ruíz y Pavón] Oken) como componente maderable de sistemas agroforestales en Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá. Trabajo de grado (Magister Scientiae), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, 1997. 70 p.

VALLEJOS, O. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Facultad de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Turrialba, Costa Rica, 1996. 147 p.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de regresión para altura dominante de *Acacia mangium*.

Regresión No lineal

Variable dependiente: LOG(h dom acacia)

Variabes independientes:

edad

Función a estimar: $a+b/edad^k$

Estimaciones del parámetro inicial:

a = 0,1

b = 0,1

k = 0,1

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo después de alcanzar las máximas iteracciones

Número de iteracciones: 31

Número de llamadas de funciones: 151

Resultados de la Estimación

| Parámetro | Estimado | Asintótica Error Estándar | Asintótica 95,0% Intervalos de Confianza | |
|-----------|-----------|------------------------------|---|-----------|
| | | | Inferior | Superior |
| a | -1,24431 | 2,40403 | -6,03445 | 3,54583 |
| b | 2,95559 | 2,35528 | -1,73741 | 7,64859 |
| k | -0,165218 | 0,108969 | -0,382344 | 0,0519083 |

Análisis de Varianza

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio |
|---------------|-------------------|----|----------------|
| Modelo | 561,07 | 3 | 187,023 |
| Residuos | 3,0941 | 74 | 0,0418122 |
| Total | 564,164 | 77 | |
| Total (Corr.) | 21,3655 | 76 | |

R-Cuadrado = 85,5182 porcentaje

R-Cuadrado (adaptado para g.l.) = 85,1268 porcentaje

Error Estándar de la Est. = 0,20448

Error absoluto de la Media = 0,1448

Estadístico Durbin-Watson = 0,334567

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,784794

Análisis de Residuos

| | Estimación | Validación |
|------|--------------|------------|
| n | 77 | |
| MSE | 0,0418122 | |
| MAE | 0,1448 | |
| MAPE | 6,57511 | |
| ME | -0,000289932 | |
| MPE | -1,40908 | |

Anexo 2. Análisis de regresión para altura dominante de *Tectona grandis*.

Regresión No lineal

 Variable dependiente: LOG(hd teca)
 Variables independientes:
 edad

Función a estimar: $a+b/edad^k$
 Estimaciones del parámetro inicial:
 a = 0,1
 b = 0,1
 k = 0,1

Método de estimación: Marquardt
 La estimación se detuvo después de alcanzar las máximas iteraciones
 Número de iteraciones: 31
 Número de llamadas de funciones: 151

Resultados de la Estimación

| Parámetro | Estimado | Asintótica Error Estándar | Asintótica 95,0% Intervalos de Confianza | |
|-----------|-----------|------------------------------|---|----------|
| | | | Inferior | Superior |
| a | 0,0835346 | 4,46089 | -10,2033 | 10,3704 |
| b | 2,08401 | 4,36839 | -7,98955 | 12,1576 |
| k | -0,167359 | 0,288213 | -0,831981 | 0,497263 |

Análisis de Varianza

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio |
|---------------|-------------------|----|----------------|
| Modelo | 90,2499 | 3 | 30,0833 |
| Residuos | 0,171746 | 8 | 0,0214683 |
| Total | 90,4217 | 11 | |
| Total (Corr.) | 1,50144 | 10 | |

R-Cuadrado = 88,5612 porcentaje
 R-Cuadrado (adaptado para g.l.) = 85,7015 porcentaje
 Error Estándar de la Est. = 0,146521
 Error absoluto de la Media = 0,0935966
 Estadístico Durbin-Watson = 1,37119
 Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0679758

Análisis de Residuos

| | Estimación | Validación |
|------|--------------|------------|
| n | 11 | |
| MSE | 0,0214683 | |
| MAE | 0,0935966 | |
| MAPE | 3,67692 | |
| ME | -0,000201294 | |
| MPE | -0,388795 | |

Anexo 3. Coeficientes de variación (CV) de la altura de *A. mangium*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|-------------|------|-------|------|----------|
| 1 | 11% | 11% | 13% | 23% |
| 2 | 6% | 6% | 6% | 5% |
| 3 | 19% | 24% | 25% | 25% |
| 4 | 12% | 13% | 13% | 11% |
| 5 | 14% | 13% | 11% | 8% |
| 6 | 16% | 14% | 11% | 7% |
| 7 | 10% | 8% | 8% | 6% |
| 8 | 6% | 7% | 7% | 8% |
| 9 | 6% | 7% | 7% | 8% |
| 10 | 8% | 9% | 9% | 9% |
| 17 | 9% | 9% | 9% | 9% |

Anexo 4. Coeficientes de variación (CV) de la altura promedio de *T. grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|-------------|------|-------|------|----------|
| 1 | 9% | 9% | 9% | 9% |
| 2 | 6% | 5% | 5% | 4% |
| 3 | 16% | 14% | 12% | 12% |
| 4 | 7% | 8% | 12% | 13% |
| 5 | 6% | 4% | 3% | 4% |
| 6 | 8% | 5% | 5% | 5% |
| 7 | 7% | 9% | 9% | 9% |
| 8 | 4% | 5% | 5% | 4% |
| 9 | 5% | 5% | 5% | 7% |
| 10 | 6% | 5% | 3% | 6% |
| 17 | 8% | 7% | 5% | 2% |

Anexo 5. Coeficientes de variación del diámetro promedio de *A. mangium*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| 1 | 17% | 13% | 11% | 14% |
| 2 | 11% | 11% | 11% | 9% |
| 3 | 15% | 13% | 12% | 12% |
| 4 | 13% | 13% | 13% | 13% |
| 5 | 9% | 8% | 8% | 8% |
| 6 | 9% | 9% | 9% | 9% |
| 7 | 10% | 10% | 9% | 9% |
| 8 | 13% | 10% | 9% | 9% |
| 9 | 6% | 6% | 6% | 7% |
| 10 | 13% | 13% | 13% | 13% |
| 17 | 6% | 5% | 5% | 5% |

Anexo 6. Coeficientes de variación del diámetro promedio de *T. grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| 1 | 15% | 21% | 15% | 15% |
| 2 | 6% | 6% | 6% | 6% |
| 3 | 25% | 24% | 23% | 17% |
| 4 | 10% | 13% | 8% | 9% |
| 5 | 6% | 4% | 4% | 4% |
| 6 | 6% | 7% | 7% | 7% |
| 7 | 7% | 7% | 8% | 8% |
| 8 | 10% | 10% | 10% | 10% |
| 9 | 15% | 15% | 15% | 16% |
| 10 | 9% | 9% | 10% | 10% |
| 17 | 14% | 18% | 18% | 19% |

Anexo 7. Coeficientes de variación del volumen promedio de *A. mangium*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| 1 | 23% | 25% | 18% | 24% |
| 2 | 23% | 24% | 23% | 18% |
| 3 | 22% | 23% | 22% | 22% |
| 4 | 24% | 21% | 23% | 23% |
| 5 | 23% | 25% | 24% | 22% |
| 6 | 23% | 25% | 24% | 21% |
| 7 | 24% | 23% | 22% | 20% |
| 8 | 23% | 22% | 21% | 22% |
| 9 | 15% | 14% | 15% | 16% |
| 10 | 25% | 25% | 25% | 24% |
| 17 | 7% | 5% | 5% | 17% |

Anexo 8. Coeficientes de variación del volumen promedio de *T. grandis*, según la calidad del sitio.

| Edad (años) | Bajo | Medio | Alto | Muy alto |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| 1 | 25% | 24% | 25% | 23% |
| 2 | 13% | 10% | 11% | 23% |
| 3 | 21% | 23% | 25% | 24% |
| 4 | 16% | 11% | 22% | 25% |
| 5 | 13% | 9% | 8% | 22% |
| 6 | 17% | 13% | 13% | 24% |
| 7 | 17% | 20% | 21% | 25% |
| 8 | 18% | 18% | 19% | 25% |
| 9 | 24% | 24% | 25% | 22% |
| 10 | 18% | 19% | 16% | 23% |
| 17 | 20% | 25% | 25% | 16% |

Anexo 9. Análisis de estadístico para el modelo de rendimiento y crecimiento en altura de *A. mangium*.

Nonlinear Regression

 Dependent variable: LOG (H pro acacia)
 Independent variables:
 edad

Function to be estimated: a-b/edad
 Initial parameter estimates:
 a = 0,1
 b = 0,1

Estimation method: Marquardt
 Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.
 Number of iterations: 3
 Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 3,21066 | 0,0404587 | 3,11736 | 3,30396 |
| b | 1,94089 | 0,102773 | 1,70389 | 2,17789 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 72,4173 | 2 | 36,2087 |
| Residual | 0,0584629 | 8 | 0,00730786 |
| Total | 72,4758 | 10 | |
| Total (Corr.) | 2,66482 | 9 | |

R-Squared = 97,8061 percent
 R-Squared (adjusted for d.f.) = 97,5319 percent
 Standard Error of Est. = 0,085486
 Mean absolute error = 0,0555779
 Durbin-Watson statistic = 1,63556
 Lag 1 residual autocorrelation = 0,0232219

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,00730786 | |
| MAE | 0,0555779 | |
| MAPE | 2,56216 | |
| ME | 3,5621E-9 | |
| MPE | 0,0525057 | |

Anexo 10. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en altura de *T. grandis*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (H pro teca)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 3,27048 | 0,058521 | 3,13553 | 3,40543 |
| b | 1,87359 | 0,148655 | 1,53079 | 2,21639 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 76,506 | 2 | 38,253 |
| Residual | 0,122315 | 8 | 0,0152894 |
| Total | 76,6283 | 10 | |
| Total (Corr.) | 2,55106 | 9 | |

R-Squared = 95,2053 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 94,606 percent

Standard Error of Est. = 0,12365

Mean absolute error = 0,0878689

Durbin-Watson statistic = 1,44989

Lag 1 residual autocorrelation = 0,164868

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,0152894 | |
| MAE | 0,0878689 | |
| MAPE | 3,81406 | |
| ME | 3,59438E-9 | |
| MPE | -0,0343882 | |

Anexo 11. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en diámetro de *A. mangium*.

Nonlinear Regression

 Dependent variable: LOG (Dap acacia)
 Independent variables:
 edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 3,15811 | 0,104769 | 2,91651 | 3,3997 |
| b | 1,68025 | 0,266134 | 1,06654 | 2,29396 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 73,0271 | 2 | 36,5135 |
| Residual | 0,392032 | 8 | 0,0490041 |
| Total | 73,4191 | 10 | |
| Total (Corr.) | 2,34538 | 9 | |

R-Squared = 83,2849 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 81,1955 percent

Standard Error of Est. = 0,221369

Mean absolute error = 0,173424

Durbin-Watson statistic = 0,471429

Lag 1 residual autocorrelation = 0,585552

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,0490041 | |
| MAE | 0,173424 | |
| MAPE | 6,79568 | |
| ME | 3,42099E-9 | |
| MPE | -0,340558 | |

Anexo 12. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en diámetro de *T. grandis*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (Dap teca)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 3,30468 | 0,105926 | 3,06041 | 3,54895 |
| b | 1,74388 | 0,269072 | 1,12339 | 2,36436 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 80,1631 | 2 | 40,0816 |
| Residual | 0,400738 | 8 | 0,0500923 |
| Total | 80,5639 | 10 | |
| Total (Corr.) | 2,50482 | 9 | |

R-Squared = 84,0013 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 82,0015 percent

Standard Error of Est. = 0,223813

Mean absolute error = 0,178053

Durbin-Watson statistic = 0,493197

Lag 1 residual autocorrelation = 0,54456

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,0500923 | |
| MAE | 0,178053 | |
| MAPE | 6,41366 | |
| ME | 3,58068E-9 | |
| MPE | -0,291347 | |

Anexo 13. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en volumen de *A. mangium*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (Vp acacia)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 5,31901 | 0,233884 | 4,77968 | 5,85835 |
| b | 5,22498 | 0,594112 | 3,85495 | 6,59501 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 162,426 | 2 | 81,2131 |
| Residual | 1,9537 | 8 | 0,244213 |
| Total | 164,38 | 10 | |
| Total (Corr.) | 20,8424 | 9 | |

R-Squared = 90,6263 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 89,4546 percent

Standard Error of Est. = 0,494179

Mean absolute error = 0,385201

Durbin-Watson statistic = 0,606999

Lag 1 residual autocorrelation = 0,502558

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,244213 | |
| MAE | 0,385201 | |
| MAPE | 17,4864 | |
| ME | 6,69441E-9 | |
| MPE | 4,66443 | |

Anexo 14. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en volumen de *T. grandis*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (Vp teca)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 5,60425 | 0,212993 | 5,11309 | 6,09541 |
| b | 4,99492 | 0,541043 | 3,74727 | 6,24257 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 188,762 | 2 | 94,3809 |
| Residual | 1,62027 | 8 | 0,202533 |
| Total | 190,382 | 10 | |
| Total (Corr.) | 18,8822 | 9 | |

R-Squared = 91,4191 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 90,3465 percent

Standard Error of Est. = 0,450037

Mean absolute error = 0,357783

Durbin-Watson statistic = 0,859893

Lag 1 residual autocorrelation = 0,378963

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,202533 | |
| MAE | 0,357783 | |
| MAPE | 11,8241 | |
| ME | 6,88044E-9 | |
| MPE | 1,30703 | |

Anexo 15. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en carbono de *Acacia mangium*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (C acacia)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 4,1142 | 0,234149 | 3,57425 | 4,65415 |
| b | 5,22119 | 0,594784 | 3,84961 | 6,59277 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 85,6799 | 2 | 42,8399 |
| Residual | 1,95813 | 8 | 0,244766 |
| Total | 87,638 | 10 | |
| Total (Corr.) | 20,8194 | 9 | |

R-Squared = 90,5947 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 89,419 percent

Standard Error of Est. = 0,494738

Mean absolute error = 0,385652

Durbin-Watson statistic = 0,607883

Lag 1 residual autocorrelation = 0,502205

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,244766 | |
| MAE | 0,385652 | |
| MAPE | | |
| ME | 5,5648E-9 | |
| MPE | | |

Anexo 16. Análisis estadístico para modelo de rendimiento y crecimiento en carbono de *T. grandis*.

Nonlinear Regression

Dependent variable: LOG (C teca)

Independent variables:

edad

Function to be estimated: a-b/edad

Initial parameter estimates:

a = 0,1

b = 0,1

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 3

Number of function calls: 11

Estimation Results

| Parameter | Estimate | Asymptotic Standard Error | Asymptotic 95,0% Confidence Interval | |
|-----------|----------|------------------------------|---|---------|
| | | | Lower | Upper |
| a | 4,4176 | 0,212686 | 3,92714 | 4,90805 |
| b | 4,99836 | 0,540263 | 3,75251 | 6,24421 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square |
|---------------|----------------|----|-------------|
| Model | 104,523 | 2 | 52,2614 |
| Residual | 1,61559 | 8 | 0,201949 |
| Total | 106,138 | 10 | |
| Total (Corr.) | 18,9013 | 9 | |

R-Squared = 91,4525 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 90,384 percent

Standard Error of Est. = 0,449388

Mean absolute error = 0,357325

Durbin-Watson statistic = 0,857825

Lag 1 residual autocorrelation = 0,379891

Residual Analysis

| | Estimation | Validation |
|------|------------|------------|
| n | 10 | |
| MSE | 0,201949 | |
| MAE | 0,357325 | |
| MAPE | | |
| ME | 5,77036E-9 | |
| MPE | | |