

**ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO DEL SISTEMA  
AGROFORESTAL CACAO *Theobroma cacao* L Y LAUREL *Cordia alliodora*  
(Ruiz & Pavón) Oken EN LA RESERVA INDÍGENA DE TALAMANCA, COSTA  
RICA**

**ANGELA MILENA ORTIZ GUERRERO  
LORENA DAYANA RIASCOS CHALAPUD**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO  
2006**

**ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO DEL SISTEMA  
AGROFORESTAL CACAO *Theobroma cacao* L Y LAUREL *Cordia alliodora*  
(Ruiz & Pavón) Oken EN LA RESERVA INDÍGENA DE TALAMANCA, COSTA  
RICA**

**ANGELA MILENA ORTIZ GUERRERO  
LORENA DAYANA RIASCOS CHALAPUD**

**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  
2006**

**Nota de aceptación.**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del Jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**San Juan de Pasto, marzo de 2006**

**Dedico este trabajo a...**

**Dios**

Por guiarme en cada paso, por darme su fortaleza y por bendecirme con el regalo más valioso... mi familia.

**Mi mami**

El amor mas grande de mi vida...  
Por su constancia, sus grandes sacrificios, por creer en mí, por ser mi ejemplo y por permitirme cumplir uno de mis más grandes sueños...

**Mi padre**

Por intentarlo de nuevo, por sus palabras-consejo y por su apoyo...

**Mis hermanitas Sofita, Xime y Bibi**

Por ser mis grandes amigas, mis consejeras, mis alcahuetas y hasta mis motivos...

**Mis sobrinos Maria José, Santi y Jacobito**

Por llenarme de su ternura y recordarme siempre que sigo siendo una niña...

**Mi abuelita María**

Por ser esa parte de mi vida que significa “respeto”

**Mis amigas y amigos de verdad (ellos saben quienes son)**

Porque la vida no solo es acumular títulos, sino saber vivirla...

**Todas las personas que conocí fuera de casa**

Porque de cada una guardo los mejores recuerdos y enseñanzas, porque me llenaron talvez sin darse cuenta de motivos diarios para seguir luchando en países extraños y por brindarme una sonrisa... no los voy a olvidar.

**Lore**

Porque solo las dos sabemos cuantas lágrimas, sonrisas y nostalgias nos ha costado este sueño que aunque hoy termina, permanecerá en nosotras el resto de la vida... Buen viento y buena mar!!

**ANGELA**

Dedico este trabajo a:  
**Dios** por bendecirme cada día de mi vida.  
Mis **Padres** por su inmenso amor y apoyo.  
Mi hermano **Lalo** por su gran cariño y confianza.  
Mis hermanas y amigas **Maria Luisa** y **Gina**.  
Mi hermoso sobrino **Camilito**.  
Mi **Familia** que tanto me ha apoyado.  
Todos mis incondicionales **Amigos**.  
Y a mi amiga y compañera en esta lucha, **Angela**.

Todo por ustedes...

**LORE**

## AGRADECIMIENTOS

Al líder del *Proyecto Captura de Carbono*, Eduardo Somarriba Chávez Ph. D., por sus valiosos aportes, su tiempo y confianza y por creer en los estudiantes de Ingeniería agroforestal de la Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

A la coordinadora del Proyecto Captura de Carbono, Marilyn Villalobos M. Sc., por guiarnos y apoyarnos durante nuestro trabajo en CATIE.

A nuestros asesores en CATIE, Hernán Andrade C. M. Sc. y Milena Segura Madrigal M. Sc., por orientarnos en el análisis de datos y presentación del documento.

A la profesora Luz Amalia Forero Peña M. Sc., por su confianza, dedicación y paciencia.

A los profesores William Ballesteros Possú M. Sc., Diego Muñoz Guerrero M. Sc. y Hernando Criollo Escobar MsC, miembros del comité asesor de la Universidad de Nariño, por sus sugerencias y recomendaciones.

A Harold Viquez Zamora IF, Simiane Gregori Valentini M. Sc., Vilmar Sánchez y todos los PROMOTORES del Proyecto Captura de Carbono, no solo por el apoyo en las duras jornadas de campo, sino también por su valiosa amistad.

A toda la comunidad de la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica, así como a las familias Lozada y Guerra en Panamá, por su apoyo incondicional, por acogernos y facilitarnos el trabajo de campo.

A todo el personal del departamento de agroforestería en CATIE por su colaboración y paciencia.

A todas las personas que compartieron nuestras alegrías y tristezas durante nuestro paso por Costa Rica, buenos amigos que no vamos a olvidar.

Al profesor Oscar Checa Coral Ph. D., por su ayuda desinteresada y sus valiosos aportes en el análisis estadístico.

Al profesor Alvaro Lema M. Sc. y Javier León M. Sc. por responder nuestras dudas a distancia.

A nuestros compañeros y amigos de Universidad, por tantos momentos compartidos y a todas las personas que de algún modo nos ayudaron a culminar esta etapa de nuestro camino...

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	22
1. MARCO TEÓRICO	24
1.1 SISTEMAS AGROFORESTALES (SAF): CONCEPTO, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACION	24
1.1.1 Concepto.	24
1.1.2 Características de los SAF.	25
1.1.3 Clasificación de los Sistemas Agroforestales.	25
1.1.3.1. Sistemas agroforestales secuenciales.	25
1.1.3.2. Sistemas agroforestales simultáneos.	25
1.1.3.3. Sistemas agroforestales de cercas vivas y cortinas rompevientos.	26
1.2 SISTEMA AGROFORESTAL LAUREL <i>Cordia alliodora</i> – CACAO <i>Theobroma cacao</i>	26
1.2.1 Características generales de los componentes del SAF cacao – laurel.	27
1.2.1.1. Cacao <i>Theobroma cacao</i> L.	27
1.2.1.2. Laurel <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz y Pavón) Oken.	28

1.3 SISTEMAS AGROFORESTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO	29
1.4 CAMBIO CLIMATICO GLOBAL Y GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)	31
1.5 PROTOCOLO DE KIOTO Y MERCADO DE CARBONO	33
1.5.1 Comercio de Emisiones (CE).	33
1.5.2 Implementación Conjunta (IC).	33
1.5.3 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).	34
1.6 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES (PSA)	35
1.7 VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES (PSA) EN COSTA RICA	35
1.8 CRECIMIENTO DE LAS ESPECIES FORESTALES	37
1.8.1 Modelos de crecimiento.	37
1.9 COMPORTAMIENTO DE LA BIOMASA EN ECOSISTEMAS	38
1.9.1 Metodologías para estimar biomasa.	39
1.9.2 Modelos de biomasa.	40
1.10 CICLO DEL CARBONO	41
1.10.1 El carbono en ecosistemas forestales.	41

1.10.1.1. Carbono almacenado (Ca).	42
1.10.1.2. Carbono fijado (Cf).	42
1.11 MODELAJE DE SISTEMAS AGROECOLOGICOS	43
2. DISEÑO METODOLOGICO	44
2.1 MODELOS DE CRECIMIENTO	44
2.1.1 Localización.	44
2.1.2 Depuración de los datos.	45
2.1.3 Ajuste de modelos.	45
2.1.3.1. Ajuste de modelos para <i>Cordia alliodora</i> .	45
2.1.3.2. Ajuste de modelos para <i>Theobroma cacao</i> .	45
2.1.4 Selección y validación de los mejores modelos.	46
2.2 MODELOS DE BIOMASA	46
2.2.1 Localización.	47
2.2.2 Metodología modelos biomasa aérea para cacao y laurel.	48
2.2.2.1. Selección de los árboles.	48

2.2.2.2. Medición y corta de <i>Cordia alliodora</i> .	48
2.2.2.3. Medición y corta de <i>Theobroma cacao</i> .	49
2.2.2.4. Registro y análisis de datos.	49
2.2.2.5. Ajuste y selección de modelos biomasa aérea para cacao y laurel.	49
2.2.3 Modelos de biomasa total para las especies laurel y cacao.	50
2.2.3.1. Ajuste y validación de los modelos.	50
2.2.4 Carbono almacenado en laurel y cacao.	50
2.3 SIMULACIÓN DEL ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO <i>Theobroma cacao</i> – LAUREL <i>Cordia alliodora</i> EN LA RESERVA INDIGENA DE TALAMANCA, COSTA RICA	50
2.3.1 Distancia 6x6m (valle y loma).	51
2.3.2 Distancia 9x9m (valle y loma).	51
2.3.3 Distancia 12x12m (valle y loma).	51
2.3.4 Distancia de siembra para cacao.	51
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3. 1 MODELOS DE CRECIMIENTO	53

3.1.1 Modelos de crecimiento en diámetro (dap) para <i>Cordia alliodora</i> .	53
3.1.1.1. Modelo de predicción.	53
3.1.1.2. Validación del modelo seleccionado.	55
3.1.1.3. Diámetros estimados para <i>Cordia alliodora</i> en valle y loma.	55
3.1.1.4. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) del diámetro (dap) en valle (v) y loma (l).	57
3.1.2 Modelo de crecimiento en diámetro a 30cm del suelo (Diám 30cm) para <i>Theobroma cacao</i> .	59
3.1.2.1. Modelo de predicción.	59
3.1.2.2. Validación del modelo seleccionado.	60
3.1.2.3. Diámetros estimados para <i>Theobroma cacao</i> .	60
3.1.2.4. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro para <i>Theobroma cacao</i> .	61
3.2 MODELOS DE BIOMASA	63
3.2.1 Modelos de biomasa aérea para <i>Cordia alliodora</i> .	63
3.2.2 Modelo de Biomasa total (Bt) para <i>Cordia alliodora</i> .	64
3.2.2.1. Biomasa seca total y carbono almacenado en dos condiciones de sitio para laurel.	66

3.2.2.2. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de biomasa y carbono en valle (v) y loma (l).	67
3.2.3 Modelo de biomasa aérea <i>Theobroma cacao</i> .	69
3.2.3.1. Modelos de biomasa total (Bt) para <i>Theobroma cacao</i> .	69
3.2.3.2. Biomasa seca total y carbono almacenado en <i>Theobroma cacao</i> .	71
3.2.3.3. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de biomasa y carbono en <i>Theobroma cacao</i> .	72
3.3 SIMULACIÓN DEL ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL LAUREL <i>Cordia alliodora</i> Y CACAO <i>Theobroma cacao</i>	73
3.3.1 Carbono almacenado en los componentes del SAF.	73
3.3.2 Carbono almacenado (Ca) y fijado (Cf) en el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL).	74
3.3.3 Comparación con otros estudios.	76
4. CONCLUSIONES	79
5. RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFIA	82
ANEXOS	93

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Resumen de las opciones para la captura de Carbono.	<b>30</b>
Cuadro 2. Modelos de crecimiento de mejor ajuste con sus estadígrafos más importantes para <i>Cordia alliodora</i> en valle (v) y loma (l).	<b>54</b>
Cuadro 3. Ecuación de regresión para estimar diámetro (Diám 30cm) en función de la edad para <i>Theobroma cacao</i> , con sus estadígrafos más importantes.	<b>59</b>
Cuadro 4. Modelos alométricos de biomasa total (Bt) en condiciones de valle (v) y loma (l) para <i>Cordia alliodora</i> .	<b>64</b>
Cuadro 5. Modelo alométrico para estimar biomasa total (Bt) en función de la edad para <i>Theobroma cacao</i> , con sus estadígrafos más importantes.	<b>70</b>
Cuadro 6. Carbono almacenado en los compartimientos necromasa, vegetación herbácea y suelo de los cacaotales en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica.	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1a. Relación diámetro a la altura del pecho (dap) – edad (E) para condiciones de valle (v) en laurel (L) Modelo de la forma $Dap_{Lv} = \exp(3.98806 - 41.4216/E)$ .	<b>54</b>
Figura 1b. Relación diámetro a la altura del pecho (dap) – edad (E) para condiciones de loma (l) en laurel (L). Modelo de la forma $Dap_{Ll} = \exp(3.823 - 37.8206/E)$ .	<b>55</b>
Figura 2. Crecimiento estimado del diámetro a la altura del pecho (dap) en condiciones de valle (v) y loma (l) para <i>Cordia alliodora</i> .	<b>56</b>
Figura 3. Incremento Corriente Anual (ICA) y Medio Anual (IMA) del dap en condiciones de valle (v) y loma (l) para <i>Cordia alliodora</i> .	<b>57</b>
Figura 4. Relación entre el diámetro (Diám 30cm) y la edad (E) para la especie <i>Theobroma cacao</i> . Modelo de la forma $Diám\ 30cm = 0.371689 * E^{0.757871}$ .	<b>60</b>
Figura 5. Crecimiento estimado del Diám 30cm para <i>Theobroma cacao</i> .	<b>61</b>
Figura 6. Incremento Corriente (ICA) y Medio Anual (IMA) del Diám 30cm para <i>Theobroma cacao</i> .	<b>62</b>
Figura 7. Relación a) biomasa total estimada – edad en valle b) biomasa total estimada - edad en loma para <i>Cordia alliodora</i> .	<b>65</b>
Figura 8. Biomasa seca total de <i>Cordia alliodora</i> en valle (v) y loma (l).	<b>66</b>
Figura 9. Carbono almacenado total por <i>Cordia alliodora</i> en valle (v) y loma (l).	<b>66</b>

- Figura 10. Incremento corriente (*ICA*) y medio anual (*IMA*) en biomasa total (*Bt*) en condiciones de valle (*v*) y loma (*l*) para *Cordia alliodora*. **68**
- Figura 11. Incremento corriente (*ICA*) y medio anual (*IMA*) en carbono almacenado (*Ca*) en condiciones de valle (*v*) y loma (*l*) para *Cordia alliodora*. **68**
- Figura 12. Relación biomasa total (*Bt*) - edad (*E*)  $Bt = -2,01539 + 0,191278 * E - 0,000370852 * E^2$  en *Theobroma cacao*. **70**
- Figura 13. Biomasa total (*Bt*) y carbono almacenado (*Ca*) en función de a) Edad y b) Diámetro a 30cm sobre el suelo para *Theobroma cacao*. **71**
- Figura 14. Incremento corriente (*ICA*) y medio anual (*IMA*) en a) biomasa total y b) carbono almacenado para *Theobroma cacao*. **72**
- Figura 15. Carbono almacenado (*Ca*) por *Cordia alliodora* en seis escenarios de simulación en condiciones de valle (*v*) y loma (*l*). **73**
- Figura 16. Carbono almacenado (*Ca*) en el sistema agroforestal cacao – laurel (SAF-CL) en valle (*v*) y loma (*l*). **75**
- Figura 17. Carbono fijado en el sistema agroforestal cacao – laurel en valle (*v*) y loma (*l*). **76**

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Localización geográfica de los ensayos donde se desarrollaron los modelos de crecimiento para las especies *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*, Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá, Centroamérica.

Anexo 2. Características generales de los sitios de estudio donde se desarrollaron los modelos de crecimiento para las especies *Cordia alliodora* y *Theobroma cacao*, Costa Rica y Panamá.

Anexo 3. Localización geográfica del área de estudio donde se desarrollaron los modelos de biomasa para las especies cacao y laurel y la simulación del SAF, Reserva Indígena de Talamanca, Talamanca, Costa Rica.

Anexo 4a. Comparación de medias (prueba T) entre dap reales y dap estimados para *Cordia alliodora* en valle.

Anexo 4b. Comparación de medias (prueba T) entre dap reales y dap estimados para *Cordia alliodora* en loma (l).

Anexo 5. Diámetro a la altura del pecho (dap), Incremento Corriente (ICA) y Medio Anual (IMA) en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Anexo 6. Comparación de medias (prueba T) entre diámetros reales y diámetros estimados para *Theobroma cacao*.

Anexo 7. Diámetro a 30cm del suelo (Diám 30cm), Incremento corriente (ICA) y medio anual (IMA) para *Theobroma cacao*.

Anexo 8. Comparación de medias (prueba T) entre biomasa total real y biomasa total estimada para *Cordia alliodora* en a) valle (v) y b) loma (l).

Anexo 9. Biomasa total (Bt) y carbono almacenado (Ca) por árbol en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Anexo 10. Incrementos corrientes (ICA) y medios anuales (IMA) en biomasa (Bt) y carbono almacenado (Ca) por árbol en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Anexo 11. Comparación de medias (prueba T) entre diámetros reales y diámetros estimados para *Theobroma cacao*.

Anexo 12. Biomasa total (Bt), Carbono almacenado (Ca), Incremento corriente (ICA) medio anual (IMA) por árbol para *Theobroma cacao*.

Anexo 13. Carbono almacenado (Ca) estimado por hectárea para *Cordia alliodora* en seis escenarios de simulación.

Anexo 14. Diagrama de flujo de carbono almacenado en el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL).

Anexo 15. Carbono almacenado (Ca) y fijado (Cf) por el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL) bajo seis escenarios de simulación.

Anexo 16. Comparación estadística entre medias de carbono almacenado en los seis escenarios simulados.

Anexo 17. Comparación estadística entre medias de carbono fijado (CF) en los seis escenarios simulados.

## RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica y tuvo como fin simular la capacidad de almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao *Theobroma cacao* - laurel *Cordia alliodora*, en dos condiciones de relieve (valle y loma), bajo tres densidades de siembra para laurel (6x6, 9x9 y 12x12 m) y una densidad de siembra para cacao, en un período de 25 años. Esta simulación incluyó el carbono almacenado promedio de los compartimientos suelo, necromasa y vegetación herbácea del sistema.

Se probaron modelos lineales y no lineales para predecir el crecimiento en diámetro para laurel (valle y loma) y cacao, con los datos pertenecientes al ensayo "*Moniliasis resistant Hybrid experiment at La Lola farm*" y al *Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ*. Posteriormente, se desarrollaron modelos de biomasa total para cada especie y por condición de relieve, en base a las ecuaciones de biomasa aérea desarrolladas por Segura<sup>3</sup>, en la misma zona. De acuerdo al análisis de varianza, todos los modelos con sus parámetros, resultaron altamente significativos al 99% de confianza ( $P < 0.01$ ).

La simulación de la captura de carbono del sistema se calculó teniendo en cuenta porcentajes de mortalidad durante el primer año (año cero), de 8% para cacao y de 1, 10 y 15% en las densidades de 12x12, 9x9 y 6x6 m, respectivamente, para laurel. En este último escenario (6x6m), además se tuvo en cuenta un porcentaje de raleo de 31% para laurel, por las altas densidades de siembra de esta especie.

La cantidad promedio de carbono almacenado en el sistema agroforestal con cacao y laurel (SAF-CL) fue de 126.4 tnC ha<sup>-1</sup> en valle y de 114.5 tnC ha<sup>-1</sup> en loma bajo la densidad 6x6 m. El carbono promedio almacenado en las densidades 9x9 m y 12x12 m, fue de 109.7 y 97.9 tnC ha<sup>-1</sup>, respectivamente, en un período de 25 años. Las tasa de fijación promedio en los SAF-CL de la Reserva Indígena de Talamanca, fue de 5.1 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en el mismo período de tiempo.

No se encontraron diferencias significativas en el almacenamiento de carbono entre sitios a iguales densidades de siembra, a excepción de la densidad 6x6 m, pero si entre sitios con diferentes densidades de siembra a excepción de 12x12 m valle - 9x9 m loma, 9x9 m loma - 6x6 m loma y 9x9 m valle - 6x6 m loma en un período de 25 años. En el caso del carbono fijado, no se encontraron diferencias

---

<sup>3</sup> SEGURA; Milena. Protocolo de muestreo. Turrialba: Proyecto Captura de Carbono y desarrollo de mercados ambientales en sistemas agroforestales indígenas con cacao en Costa Rica, (TF-052118), 2005. 139 p. (Informe final de consultoría).

estadísticas significativas entre sitios ni tampoco entre densidades de siembra ( $P > 0.05$ ).

Los máximos incrementos de fijación de carbono en el sistema se presentaron durante los primeros ocho años, comportamiento que coincide con los mayores crecimientos en diámetro de las especies cacao y laurel. A partir de esta edad, las tasas de fijación mostraron una tendencia a estabilizarse.

Se estimó que los compartimientos que almacenan mayor cantidad de carbono dentro del sistema, fueron en su orden: suelo, laurel, necromasa, cacao y vegetación herbácea.

De acuerdo a estos resultados, se puede afirmar que la capacidad de almacenamiento de carbono del sistema agroforestal cacao - laurel, no se ve influenciada por las condiciones de relieve, y que factores como densidad de siembra y genética propia de cada especie, afectan más el comportamiento de este componente.

**PALABRAS CLAVES:** *Agroforestería, cambio climático, pago por servicios ambientales, protocolo de Kioto, modelos de crecimiento, modelos de biomasa, ICA, IMA, tasas de fijación, simulación.*

## ABSTRACT

This thesis was carried out in the Indigenous Reserve of Talamanca, Costa Rica, and its purpose was to simulate the carbon's storage and fixation capacity of the *Theobroma cacao* – laurel *Cordia alliodora* agroforestry system, in two relief conditions (valley and hillside), under three laurel seeding densities (6x6, 9x9 and 12x12 m) and one cacao seeding density (3x3 m), in a time of 25 years. This simulation included the average of stored carbon of the soil, necromass and herbaceous vegetation compartments of the system.

Linear and non linear models were proven in order to predict the diameter growing for laurel (valley and hillside) and cacao, with the concerning dates to the “*Moniliasis resistant Hybrid experiment at La Lola farm*” attempt and the CATIE/GTZ Agro forestry Project. Lately, total biomass models were developed for each specie and by relief condition, in base to the aboveground biomass equations developed by Segura<sup>4</sup> in the same zone. According to the variance analysis, all the models with their parameters, were highly significant with 99% of confidence ( $P < 0.01$ ).

The simulation of the system carbon capture was calculated considering mortality averages during the first year (zero year), of 8% for cocoa and of 1%, 10% and 15% in the densities of 12x12, 9x9 and 6x6 m, for laurel, respectively. In the last scenario (6x6 m), it was also considered a average percentage of harvest of 31% for laurel, by high seeding densities of this specie.

The quantity average of carbon capture in the agroforestry system with cocoa and laurel (SAF-CL) was of 126.4 tnC ha<sup>-1</sup> in valley and of 114.5 tnC ha<sup>-1</sup> in hillside under the density 6x6 m. The carbon average capture in the densities 9x9 m and 12x12 m, was of 109.7 and 97.9 tnC ha<sup>-1</sup>, respectively, in a time of 25 years. The rate of fixation average in the SAF-CL of the Indigenous Reserve of Talamanca, was of 5.1 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> in the same period of time.

They weren't found significant differences in the carbon storage and fixation between sites with the same seeding densities, excepting the 6x6 m density, but they were found significant differences between sites with different seeding densities excepting 12x12 m valley – 9x9 m hillside, 9x9 m hillside – 6x6 m hillside and 9x9 m valley – 6x6 m hillside in a 25 years period. In the case of the fixed

---

<sup>4</sup> SEGURA, M. Protocolo de Muestreo. Turrialba: Proyecto Captura de Carbono y desarrollo de mercados ambientales en sistemas agroforestales Indígenas con cacao en Costa Rica, Op. Cit., 139 p.

carbon, were not significant statistical differences between sites and neither between seeding densities ( $P > 0.05$ ).

The maximum carbon fixation rates in the system were presented during the first eight years, behavior that coincides with the diameter biggest increments of the species cocoa and laurel. From this age, the fixation rates showed a tendency to become stabilized.

It was determined that the compartments that store bigger amount of carbon into the system, were in their order: soil, laurel, necromasa, cocoa and herbaceous vegetation.

According these results, it can be affirmed that the carbon storage capacity of the cocoa – laurel agro forestry system isn't influenced by the relief conditions, concluding that factors like seeding density and each specie's proper genetic affect more the behavior of this component.

**KEY WORDS:** *Agroforestry, change climate, payment from environmental services, Kioto protocol, growth models, biomass models, ICA, IMA, fixation rates, simulation.*

## INTRODUCCION

El *cambio climático* representa una de las amenazas más preocupantes para el medio ambiente global, debido al gran impacto negativo que está causando en la salud humana, la seguridad alimentaria, la economía mundial, los recursos naturales y la infraestructura física<sup>5</sup>. Este fenómeno reflejado en el *calentamiento global*, es causado por el aumento en las concentraciones de los *Gases de Efecto Invernadero* (GEI), especialmente del dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), gran parte del cual proviene del cambio en el uso de la tierra, la deforestación en zonas tropicales, el uso de combustibles fósiles y la producción de cemento en países desarrollados<sup>6-7</sup>.

Ante este hecho, los países industrializados responsables de más del 36% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, asumieron el compromiso de estabilizar sus concentraciones de GEI en la atmósfera en los términos de un acuerdo político internacional suscrito durante la *Cumbre de la Tierra* (1992), conocido como la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC por sus siglas en inglés)<sup>8</sup>.

Con la aprobación del *Protocolo de Kioto* (1997), durante la III *Conferencia de las Partes* (COP-3), se establecieron los mecanismos que facilitan a los países comprometidos ante la UNFCCC (también conocidos como partes del anexo I) alcanzar sus metas de reducción hasta el año 2012, despertándose un gran interés sobre el potencial de los sistemas agroforestales (SAF) en la fijación y almacenamiento de Carbono<sup>9</sup>.

---

<sup>5</sup> EGUREN, Lorenzo. El mercado de Carbono en América Latina y el caribe: balance y perspectivas. Santiago de Chile: CEPAL, 2004. 83 p. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo).

<sup>6</sup> DIXON, Robert K. Sistemas agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 2. no. 7, 1995; 22-26.

<sup>7</sup> BROWN, Sandra y LUGO, A.E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian Amazon. En: Interciencia. Vol. 17, no. 1, 1992; 8-18.

<sup>8</sup> PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE PNUMA *et al.* La lucha contra el cambio climático: El compromiso del Parlamento Latinoamericano. Buenos Aires: \_\_\_\_\_, 1998. 174 p. (Serie de Ciudadanía Ambiental).

<sup>9</sup> ANDRADE, Hernán. J. e IBRAHIM, Muhammad. ¿Cómo monitorear el secuestro de Carbono en los sistemas silvopastoriles?. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 10, no. 39-40, 2003; 109-116.

Por esta razón, es necesario desarrollar y promover investigaciones encaminadas a cuantificar con exactitud la cantidad de biomasa y Carbono presente en los SAF, y a determinar con certeza el precio que debería pagarse de acceder a un pago por este servicio en el mercado mundial<sup>10</sup>. Este tema ya forma parte de las legislaciones de algunos países de América Latina (Costa Rica, El Salvador, México, Brasil y Ecuador) y se considera como un mecanismo efectivo en la mitigación del cambio climático, una fuente alternativa de ingresos en zonas rurales y una forma de promover el desarrollo sostenible en la región<sup>11</sup>.

En este sentido, los sistemas agroforestales con cacao además de ofrecer ventajas comparativas en relación a otros usos del suelo, constituyen uno de los más importantes sistemas productivos en las fincas Indígenas Bribri y Cabécar de la región de Talamanca (Costa Rica), no solo por los ingresos económicos que genera al núcleo familiar, sino también por su contribución en la conservación de biodiversidad y últimamente, por su función como sumideros de Carbono<sup>12-13</sup>.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo simular la capacidad de almacenamiento y fijación de Carbono del sistema agroforestal *Theobroma cacao* L- *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken, en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica, bajo dos condiciones de sitio (valle y loma) y tres densidades de siembra para laurel (6x6, 9x9 y 12x12m) en un período de 25 años. Para esto, se desarrollaron modelos de crecimiento en diámetro y biomasa total para cada una de estas especies y se tuvieron en cuenta los compartimientos suelo, necromasa y vegetación herbácea del sistema.

---

<sup>10</sup> SAGE, L.F. y SANCHEZ, O. Evolución esperada para el mercado de pago de servicios ambientales en Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. No. 37, 2002; 72-73.

<sup>11</sup> BENITEZ, P. *et al.* Análisis costo beneficio de usos del suelo y fijación del Carbono en sistemas forestales. En: Informe Técnico del Programa de Apoyo Ecológico de la Cooperativa Técnica Alemana. Eschbom, 2001. p. 290-293.

<sup>12</sup> BEER, John *et al.* Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 10, no. 37-38, 2003; 80-87.

<sup>13</sup> SOMARRIBA Eduardo y HARVEY, Celia. Cómo integrar simultáneamente producción sostenible y conservación de la biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas?. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 10, no. 37-38, 2003; 12-17.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 SISTEMAS AGROFORESTALES (SAF): CONCEPTO, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACION

**1.1.1 Concepto.** La agroforestería es un sistema complejo de uso de la tierra antiguo y ampliamente practicado, en el que los árboles se combinan espacial y/o temporalmente con animales y/o cultivos agrícolas<sup>14</sup>. Para lograr los beneficios de la diversificación, se requiere que los cultivos asociados respondan diferencialmente a las condiciones que determinan la producción agrícola o económica<sup>15</sup>.

Según el ICRAF (*International Council for Research in Agroforestry*)<sup>16</sup> “La agroforestería es un sistema sustentable de manejo de cultivos y tierra que procura aumentar los rendimientos en forma continua, combinando la producción de cultivos forestales arbolados (que abarcan frutales y otros cultivos arbóreos) con cultivos de campo o arables y/o animales de manera simultánea o secuencial sobre la misma unidad de tierra, aplicando además prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local”.

El objetivo de los SAF es optimizar los efectos benéficos de las interacciones del componente maderable con el componente animal o cultivo, según las condiciones económicas, ecológicas y sociales predominantes<sup>17</sup>. Estos sistemas representan una alternativa para los productores porque reducen la dependencia de un solo cultivo, permiten desarrollar actividades productivas económica y ambientalmente más sostenibles y representan una práctica con gran potencial para la captura de Carbono<sup>18</sup>.

---

<sup>14</sup> FARREL, Jhon y ALTIERI, Miguel. Sistemas agroforestales. En: ALTIERI, Miguel. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: Nordan-Comunidad, 1999. p. 229-243.

<sup>15</sup> SOMARRIBA, Eduardo. Sistemas agroforestales con cacao-plátano-laurel. En: Agroforestería en las Américas. No. 4, 1994; 22-24.

<sup>16</sup> ICRAF. 1982. Citado por: ALTIERI, Miguel. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: Nordan-Comunidad, 1999. p. 229-243.

<sup>17</sup> NAIR, P.K.R. Soil productivity aspects of agroforestry. Nairobi: ICRAF, 1982. Citado por: ALTIERI, Op. Cit., p. 231.

<sup>18</sup> FASSBENDER, H. W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Turrialba, 1993. 49 p. (Serie de materiales de enseñanza no. 29).

**1.1.2 Características de los SAF.** Según Farrell y Altieri<sup>19</sup> la agroforestería incorpora cuatro características:

- **Estructura:** Combina árboles, cultivos y animales en forma conjunta.
- **Sustentabilidad:** Optimiza los beneficios de las interacciones y mantiene la productividad a largo plazo sin degradar la tierra.
- **Incremento en la productividad:** Al mejorar las relaciones complementarias entre los componentes del sistema, la producción será mayor en comparación a los sistemas tradicionales de uso de la tierra.
- **Adaptabilidad cultural/socioeconómica:** Se aplica a una amplia gama de predios y de condiciones socioeconómicas, aunque tiene mayor impacto en zonas donde los agricultores no pueden adaptar tecnologías muy costosas y modernas.

**1.1.3 Clasificación de los Sistemas Agroforestales.** Los SAF se clasifican de varias maneras según su estructura en el espacio, su diseño a través del tiempo, la importancia relativa y la función de los diferentes componentes, los objetivos de la producción y las características sociales y económicas vigentes<sup>20</sup>.

Montagnini *et al*<sup>21</sup> presenta una clasificación descriptiva de acuerdo al tipo de componente incluido y la asociación existente entre ellos. Esta clasificación presenta tres tipos de SAF, los cuales se describen a continuación:

**1.1.3.1. Sistemas agroforestales secuenciales.** En este tipo de SAF los componentes presentan una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos, es decir que los cultivos anuales y las plantaciones de árboles se suceden en el tiempo. En esta clasificación se incluyen los sistemas taungya y la agricultura migratoria.

**1.1.3.2. Sistemas agroforestales simultáneos.** Consisten en la asociación simultánea y continúa de cultivos anuales o perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple, y/o ganadería. Estos sistemas incluyen asociaciones de árboles con cultivos anuales o perennes, huertos caseros mixtos y sistemas agrosilvopastoriles.

---

<sup>19</sup> FARREL y ALTIERI, Op. cit., p. 229.

<sup>20</sup> MONTAGNINI, Florencia, *et al.* Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos. Costa Rica: organización para Estudios Tropicales ET, *et al.*, 1992. 624 p.

<sup>21</sup> *Ibid.*, p. 59-60.

### 1.1.3.3. Sistemas agroforestales de cercas vivas y cortinas rompevientos.

Son hileras de árboles que se utilizan para delimitar propiedades o servir de protección para otros componentes u otros sistemas y se los considera como sistemas complementarios de los sistemas nombrados anteriormente.

## 1.2 SISTEMA AGROFORESTAL LAUREL *Cordia alliodora* – CACAO *Theobroma cacao*

Según Montagnini *et al*<sup>22</sup> este tipo de sistema agroforestal, se clasifica como un SAF simultáneo, donde especies arbóreas (laurel) se encuentran asociadas con cultivos perennes (cacao). Este sistema es implementado en gran parte de Centroamérica, Colombia y Ecuador.

En este sistema, se pueden encontrar algunos árboles de sombra naturales del bosque que incluyen frutales como mango *Mangífera indica*, aguacate *Persea americana*, guayaba *Psidium guajava*, naranja *Citrus reticula* así como árboles maderables como por ejemplo *Cedrela odorata* (cedro). A medida que el cacao y los otros componentes maduran, se desarrolla un sistema de estratos múltiples de dosel cerrado y con la mayoría de las cualidades positivas del bosque natural<sup>23</sup>.

El asocio de árboles y cultivos (bananos, cítricos, entre otros) en la plantación de cacao, da lugar a numerosas interacciones ecológicas, agronómicas y económicas, que incluyen la conservación de biodiversidad, suelos, agua y la generación de servicios ambientales como el secuestro de Carbono<sup>24-25</sup>. Además, cultivos como maíz, plátano o yuca, permite aprovechar mejor los nutrientes del suelo y proveer sombra temporal a las plantas jóvenes de cacao<sup>26-27</sup>.

El establecimiento de maderables en los cacaotales, es una alternativa simple y barata para remplazar la sombra improductiva y difícil de manejar. Los maderables se benefician de la fertilidad de los suelos donde se siembra cacao y de la

---

<sup>22</sup> MONTAGNINI, *et al.* Op. Cit., p. 60.

<sup>23</sup> DUGUMA, B.; GOCKOWSKI, J. y BAKALA, J. Desafíos biofísicos y oportunidades para el cultivo sostenible de cacao (*Theobroma cacao* Linn.) en sistemas agroforestales de Africa Occidental y Central. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 6, no. 22, 1999; 12-15.

<sup>24</sup> BEER, *et al.* Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Op. Cit., p.82.

<sup>25</sup> SOMARRIBA y HARVEY, Op. Cit., p.14.

<sup>26</sup> *Ibid.*, p.8.

<sup>27</sup> DUGUMA, GOCKOWSKI y BAKALA, Op. Cit., p.12.

disponibilidad de agua durante todo el año en la zona. El manejo del cacao que incluye fertilización y podas (al menos dos anuales), y las bajas densidades de los árboles de sombra (70-280 árboles ha<sup>-1</sup>) favorecen el desarrollo maderable<sup>28</sup>.

El laurel por ser una especie de sombra productiva y de fácil manejo, puede asegurar una rápida cobertura del suelo, reducir los costos de manejo e incrementar el desempeño económico de los cacaotales<sup>29</sup>. Cuando esta especie se encuentra asociada de manera permanente con cacao, puede sembrarse entre 200 y 400 árboles ha<sup>-1</sup>, para luego reducir la densidad a través de raleos a 100 - 125 árboles ha<sup>-1</sup> para cosechar al final del turno<sup>30</sup>.

### 1.2.1 Características generales de los componentes del SAF cacao – laurel.

**1.2.1.1. Cacao** *Theobroma cacao* L.. El cacao es una planta originaria de los trópicos húmedos de América y pertenece a la familia Sterculiaceae. Es una especie umbrófila que requiere de 60 a 70% de sombra en los primeros cuatro años y de 30 a 40% en plantaciones adultas o en áreas con una estación seca mayor de dos meses<sup>31</sup>.

Cuando se buscan altos rendimientos se deben mantener buenos niveles de radiación solar y elevada fertilidad del suelo. En suelos de baja fertilidad se recomienda cultivar el cacao bajo sombra para amortiguar las demandas nutricionales del cultivo<sup>32</sup>. Los árboles comienzan a fructificar después de los 5 años de edad; sin embargo el material híbrido es muy precoz y puede comenzar a fructificar a los 2 años de establecido en el campo<sup>33</sup>.

El árbol de cacao generalmente, tiene un tronco recto que puede desarrollar su primer molinillo u horqueta entre los 80 y 120 cm. La raíz principal es pivotante y

---

<sup>28</sup> SOMARRIBA E. y BEER John. Sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica y Panamá. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 6, no. 22, 1999; 7-11.

<sup>29</sup> SOMARRIBA, Eduardo y BEER, John. Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Turrialba: CATIE, 1986. 23 p. (Boletín Técnico no 16).

<sup>30</sup> CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA CATIE. Laurel *Cordia alliodora*. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba: CATIE, 1994. 41p. (Informe técnico no 239).

<sup>31</sup> SÁNCHEZ, J. y DUBÓN, A. Establecimiento y manejo de cacao con sombra. Guía técnica para el extensionista forestal. Turrialba: CATIE, 1994. 82 p. (Serie Técnica. Manual Técnico no 10).

<sup>32</sup> BEER, John. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. En: Agroforestry Systems. Vol 5, 1987; 3-13.

<sup>33</sup> SÁNCHEZ, A. Cultivos de plantación. México D.F.: Trillas, 1982. 122 p.

tiene muchas secundarias, la mayoría de las cuales se encuentran en los primeros 30 cm del suelo. Las hojas son simples y enteras, las flores y frutos se producen en cojines sobre el tejido maduro<sup>34</sup>. En condiciones de cultivo, el follaje se limita con la densidad de siembra y las podas.

El cacao crece, se desarrolla y produce en diferentes pisos térmicos, desde el nivel del mar hasta 1.300 m de altura, como sucede en Colombia. En América Central se cultiva hasta los 650 msnm; sin embargo, en Honduras se han observado pequeñas plantaciones a una altura de 800m<sup>35</sup>. Esta especie requiere temperaturas que van de 20°C a 30°C, una precipitación de 1.200 a 2.500 mm año<sup>-1</sup> y una humedad relativa de 70 a 90%. Los suelos deben ser sueltos, con contenidos mayores del 5% de materia orgánica y provistos de fósforo y potasio, con buen drenaje y profundidad efectiva superior a 1.2 m<sup>36</sup>.

En la actualidad, se recomienda la siembra de injertos en lugar de plantas provenientes de semilla, con el fin de reducir la altura de las plantas, facilitar las labores de control fitosanitario (monilia y escoba de bruja), incrementar los rendimientos y homogeneizar la calidad del grano de cacao<sup>37-38</sup>.

**1.2.1.2. Laurel** *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. El laurel (o nogal cafetero en Colombia) es una especie neotropical, que pertenece a la familia de las Borragináceas. En regiones húmedas tropicales, el laurel es generalmente alto, delgado, de copa angosta, rala y abierta, con mínima bifurcación, formando un único fuste de 15 a 20m. Su corteza es de color gris a café claro, con un sistema radical amplio y profundo, hojas simples-alternas y flores blancas<sup>39</sup>.

Su crecimiento difiere entre sistemas de producción, ya sea en plantaciones puras, en rodales de regeneración natural o en sistemas agroforestales<sup>40</sup>. Generalmente, es una especie que crece rápidamente y puede alcanzar alturas hasta de 45m con

---

<sup>34</sup> HARDY, F. Manual de cacao. Edición español. Turrialba: Hardy, 1961. p. 28-29.

<sup>35</sup> SÁNCHEZ y DUBÓN, Op. Cit., p.79.

<sup>36</sup> MEJIA, L. y PALENCIA, G. Manejo integrado del cultivo de cacao. En: RAMÍREZ, N. s.t. Bucaramanga: CORPOICA, 2000. 24 p.

<sup>37</sup> Ibid., p.20.

<sup>38</sup> SOMARRIBA y HARVEY, Op. Cit., p.15.

<sup>39</sup> LEAD-FAO CATIE. Laurel o Nogal cafetero *Cordia alliodora*. [en línea]. s.f. [Citado el 10 dic. de 2004]. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/silvopastoral/menu/cordia.htm>

<sup>40</sup> CATIE. Laurel *Cordia alliodora*. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Op.cit., p.31.

un diámetro a la altura del pecho (dap) de 90 cm. Los árboles presentan abundante regeneración natural y se autopodan, aún en campo abierto<sup>41-42</sup>.

El laurel se encuentra desde los 25° de latitud N, hasta los 25° Sur. Puede alcanzar un buen desarrollo con precipitaciones entre 1000 y 2000 mm anuales y una temperatura media anual de 25°C. Se desarrolla en zonas costeras, con arenas profundas e infértiles, hasta en tierras altas montañosas muy escarpadas, con unos suelos volcánicos profundos, fértiles y ricos en materia orgánica<sup>43</sup>.

*C. alliodora* es una de las especies de mayor demanda en el mercado maderero de Costa Rica y es actualmente una de las especies empleadas en proyectos de reforestación<sup>44</sup>. Se adapta muy bien a ser intercalada con plantaciones agrícolas y representa una alternativa de reforestación biológicamente factible y económicamente ventajosa, en comparación con plantaciones forestales puras<sup>45</sup>.

### 1.3 SISTEMAS AGROFORESTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO

En principio, la capacidad de secuestrar Carbono de cualquier ecosistema terrestre depende principalmente de dos componentes: el área total de esos ecosistemas y el número de árboles por unidad de área. Los SAF pueden contener sumideros considerablemente grandes de Carbono y en algunos casos se asemejan a los encontrados en bosques secundarios (Cuadro 1). Asimismo, la cantidad de Carbono acumulada en el suelo aumenta en los sistemas agroforestales<sup>46</sup>.

---

<sup>41</sup> SOMARRIBA y BEER, Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Op. Cit., p.5.

<sup>42</sup> HERNÁNDEZ, R. *et al.* Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. El Nogal Cafetero *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. Manizales: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2004. 32 p. (Serie cartillas divulgativas).

<sup>43</sup> CATIE, Laurel *Cordia alliodora*. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Op. Cit., p.36.

<sup>44</sup> CÓRDOBA, Rafael. Características, propiedades y usos de la madera del laurel *Cordia alliodora*. En: Revista Forestal Centroamericana. No. 20, 1997; 8-23.

<sup>45</sup> SOMARRIBA. y BEER, Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Op. Cit., p.7.

**Cuadro 1.** Resumen de las opciones para la captura de Carbono (C).

Opción	Densidad de Carbono	Secuestro (Corto plazo)	Costo de C
Reducir deforestación y protección de bosques	Alta	Bajo	Bajo
Reforestación	Moderada	Alto	Moderado
Silvicultura	Alta	Moderado	Bajo
Agroforestería	Baja	Moderado	Moderado
Plantaciones de Madera para Leña	Moderada	Alto	Alto
Productos Forestales	Baja	Bajo	Bajo

**Fuente:** KANINEN, 1997.

Dixon<sup>47</sup> afirma que los sistemas agroforestales pueden ser manejados para estabilizar la emisión de gases en tres maneras: 1) por el secuestro de CO<sub>2</sub> en las plantas y captura de Carbono y nitrógeno en la vegetación perenne y suelo a largo plazo, 2) por la producción de alimentos y fibra, lo cual ayuda a reducir la deforestación y degradación de las tierras y 3) por la producción sostenida de leña, lo cual puede contribuir en la reducción del uso de combustible fósil.

Brown *et al.*,<sup>48</sup> sugieren que 245 millones de hectáreas (Mha) de 700Mha globales de tierra, podrían estar disponibles para conservación y secuestro de C en plantaciones y agroforestería. Sin embargo, la disponibilidad real de tierra para estos programas depende de factores económicos, sociales, culturales e institucionales, que influyen en el uso del suelo<sup>49</sup>.

---

<sup>46</sup> KANNINEN, Markku. Los bosques y el cambio global. En: Tercer CONGRESO FORESTAL CENTROAMERICANO. (2º.: 1997 San José). Resúmenes de ponencias del III CONGRESO FORESTAL CENTROAMERICANO. Heredia (Costa Rica):Impresos Belén, 1997. p. 2-5.

<sup>47</sup> DIXON, Op. Cit., p. 22.

<sup>48</sup> BROWN, Sandra, *et al.* Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. En: Commonwealth Forestry Review, no. 75, 1996.

<sup>49</sup> GODOY, J.C. *et al.* Análisis económico y financiero de los incentivos a la reforestación implementados en Costa Rica. En: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO (1o.: Valdivia, 1998) Actas del I Congreso Latinoamericano IUFRO Chile: IUFRO, 1998.

Estudios realizados por Dixon<sup>50</sup>, revelan que el almacenamiento de Carbono en SAF, incluyendo el Carbono del suelo, oscila entre 12 y 228 tnC ha<sup>-1</sup> y que el potencial para la acumulación de Carbono a través de la biomasa es mayor en el trópico húmedo. Mientras tanto, Alegre<sup>51</sup> quien evaluó las reservas de Carbono en diferentes sistemas de uso de la tierra, encontró que los cultivos de árboles perennes basados en sistemas de multiestratos alcanzan el 20-46% del Carbono secuestrado en bosques primarios comparado con solo 10% de los sistemas de cultivos anuales o bi-anuales.

Otros autores<sup>52-53</sup> demostraron que en plantaciones bajo cacao *Theobroma cacao* L. y bajo cacao - *Erythrina* sp., se puede fijar entre 10 y 22 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, a los 10 años de edad. Según Avila<sup>54</sup> la cantidad de Carbono secuestrado directamente por los árboles dentro de los diferentes SAF se encuentra entre los valores de 3 a 25 tnC ha<sup>-1</sup>.

#### **1.4 CAMBIO CLIMATICO GLOBAL Y GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)**

El *Cambio Climático Global* o calentamiento global, es un proceso de origen antrópico, que resulta de la aceleración del *efecto invernadero* natural de la tierra. La importancia de este proceso radica en las consecuencias catastróficas que esta generando en todo el mundo como el derretimiento de los polos, incremento del nivel de mar, sequías, huracanes, tormentas, desplazamiento de áreas agrícolas, migración de enfermedades, extinción de especies, entre otras<sup>55</sup>.

---

<sup>50</sup> DIXON, Op. cit., p.25.

<sup>51</sup> ALEGRE, J. y RICSE, A. Reservas de Carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía peruana. [en línea]. s.f. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/vbconfe7.htm>

<sup>52</sup> SOMARRIBA y BEER, Sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica y Panamá. Op. cit., p.10.

<sup>53</sup> FAO. Manejo de la tierras forestales, de pastoreo y cultivadas para aumentar la captura de Carbono en los suelos. [en línea].s.f. [Citado el 1 de mar de 2006]. Disponible en internet: [www.fao.org/DOCREP/005/Y2779S/y2779s07.htm-43k](http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2779S/y2779s07.htm-43k)

<sup>54</sup> AVILA, Op. Cit., p.62.

<sup>55</sup> ARGENTINA. DIRECCIÓN NACIONAL DE POLÍTICAS DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIVIL SIFEM. [en línea]. Cambio climático. 2000. [Citado el 8 de mayo de 2005]. Disponible en internet: <http://www.proteccioncivil.gov.ar/calentamiento.html>

El *efecto invernadero*, es un fenómeno natural que ha permitido mantener la temperatura de la tierra a niveles constantes y apropiados. Este fenómeno ocurre, cuando la radiación solar visible penetra hasta la superficie de la tierra y la calienta, y ésta a su vez emite radiación térmica, parte de la cual es retenida por los denominados *Gases de Efecto Invernadero* (GEI) entre los que se destacan: el dióxido de Carbono, el metano, los clorofluocarbonos y el óxido nitroso. Cuando el sistema climático se encuentra equilibrado, la radiación solar absorbida está en armonía con la radiación emitida al espacio por la tierra, pero cuando la concentración de GEI en la atmósfera aumenta, este equilibrio se rompe y se provoca un aumento artificial en la temperatura media global del planeta<sup>56-57</sup>.

Se estima que el GEI que más influye en el calentamiento climático mundial, es el dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y que la mayor parte del incremento en las concentraciones atmosféricas de este gas, provienen del uso de combustibles fósiles, mientras que el 20-25% proviene de la extensión de la frontera agrícola, la explotación comercial de bosques y el incremento de la oxidación de la materia orgánica en los suelos<sup>58</sup>.

Entre los países desarrollados que contribuyen en mayor parte con la emisión de los gases de efecto invernadero, se encuentran Estados Unidos (EE.UU.) con un 33% del total mundial y Rusia con un 17.4%. También se encuentran países como Brasil, China, India, Japón, Alemania, Reino Unido, Indonesia y Francia<sup>59</sup>.

Según el tercer informe del grupo I del *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*<sup>60</sup> (IPCC por sus siglas en ingles), desde finales del siglo XIX la temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado 0.6°C y las temperaturas mínimas tienden a duplicarse por década en comparación con las máximas (0.2°C y 0.1°C, respectivamente). La superficie de los hielos en el hemisferio norte desde finales de los 60s, se ha reducido entre un 10-15%, así como también se ha observado un aumento ligero (uno a dos centímetros por década) del nivel del mar a lo largo del siglo XX.

---

<sup>56</sup> PNUMA *et al.* Op. Cit., p.11.

<sup>57</sup> ARGENTINA. Op. Cit., p. 2.

<sup>58</sup> ERICKSON, J. El efecto invernadero: el desastre del mañana, hoy. Madrid: Mc Graw-Hill I/ Interamericana, 1992. 217 p.

<sup>59</sup> CIESLA, W. Cambio climático, Bosques y Ordenación Forestal: una visión en conjunto. Roma: Estudios FAO, Montes, no. 120, 1996. 146 p.

<sup>60</sup> INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. [en línea] Technical Summary of the Third Assessment Report. IPCC working Group I. 2001. 63 p. [Citado el 3 de mayo de 2005]. Disponible en internet: <http://home3.worldonline.es/~aguillar/ipcc.html>

## 1.5 PROTOCOLO DE KIOTO Y MERCADO DE CARBONO

El *Protocolo de Kioto* (PK) es el instrumento legal a través del cual se regulan límites y reducciones de emisiones de GEI mandatorias y vinculantes a los países industrializados con obligaciones ante la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC por sus siglas en inglés). Los países industrializados se comprometieron en Kioto a reducir sus emisiones de GEI en al menos un 5.2% con respecto al nivel de emisiones de 1990 y a evaluar resultados durante el período 2008-2012<sup>61</sup>.

En el PK también se establecieron los mecanismos que facilitarían el cumplimiento de las reducciones de emisiones de GEI en los países industrializados (partes del anexo I) de un modo costo-efectivo. Estos mecanismos son: 1) *Comercio de Emisiones* (CE), 2) *Implementación Conjunta* (IC) y 3) *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (MDL)<sup>62</sup>.

**1.5.1 Comercio de Emisiones (CE).** Este mecanismo permite la transferencia de reducciones de Carbono “no usadas”, entre países industrializados que tengan sus derechos de emisión por debajo de los límites permitidos, con aquellos que han excedido sus niveles en un período de cumplimiento dado. Las unidades de venta se denominan *Assigned Amount Units* (AAU's por sus siglas en inglés)<sup>63</sup>.

**1.5.2 Implementación Conjunta (IC).** Como su nombre lo indica, este mecanismo permite la reducción de emisiones de Carbono de manera conjunta entre los países del anexo I. En este caso, se acreditan unidades de reducción de emisiones a favor del o los países que financian proyectos de mitigación de cambio climático. Las unidades de venta se denominan *Emission Reduction Units* (ERU's por sus siglas en inglés)<sup>64</sup>.

Un país desarrollado que para el 2012 tenga emisiones que superen los límites previstos por el Protocolo, puede asociarse con otro país desarrollado que para

---

<sup>61</sup> OFICINA COSTARRICENSE DE IMPLEMENTACIÓN CONJUNTA OCIC. Actividades de Implementación conjunta en Costa Rica. San José, 1998. 6 p.

<sup>62</sup> CASTRO, R.; CORDERO, S. y ACEVEDO, C. Casos latinoamericanos de cambio climático y desarrollo. San José: Copieco de San Pedro, 2002. 320 p.

<sup>63</sup> IPCC. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Inglaterra: Cambridge University Press, 1995.

<sup>64</sup> EGUREN, Op. Cit., 83 p.

ese período cuente con emisiones por debajo de los límites para él establecidos, siempre y cuando en conjunto, no superen los niveles sumados de ambos<sup>65</sup>.

**1.5.3 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).** El MDL es uno de tres mecanismos de mercado que permite que proyectos encaminados a fijar, reducir o evitar emisiones de gases de efecto invernadero en países en desarrollo, obtengan beneficios económicos adicionales a través de la venta de *Certificados de Emisiones Reducidas* (CER's). Este es el único de los tres mecanismos al que pueden acceder estos países, entre ellos, los de América Latina<sup>66</sup>.

Este Protocolo entró en vigencia en febrero de 2005, después de la ratificación de Rusia en septiembre de 2004, con un total de 127 países que suman el 61.6% de la emisión global<sup>67</sup>. Con la aprobación del *PK*, en la tercera Conferencia de las Partes (COP-3) en 1997, se sentaron las bases para desarrollar el *Mercado del Carbono* a nivel internacional. Este mercado, es un conjunto de transacciones donde se intercambian cantidades de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero<sup>68</sup>.

Según Eguren<sup>69</sup> América Latina se ha convertido en la región de países en desarrollo más activa en este mercado emergente, con alrededor de US\$210,6 millones de créditos de Carbono en negociación en el marco del MDL, basada en la convicción de que este mercado puede significar una herramienta útil para promover el desarrollo sostenible de la región.

Aunque el valor de estos certificados aún no es claro en este mercado, se pueden distinguir dos grandes escenarios en donde se están negociando. Uno, definido por las transacciones de Carbono que buscan cumplir con el marco establecido por el Protocolo de Kioto y otro, por las iniciativas paralelas de comercio de emisiones fuera del protocolo, como son las iniciativas voluntarias de restricción de emisiones y las decisiones federales y estatales de EE.UU. para mitigar GEI, país que no hace parte del Protocolo de Kioto<sup>70</sup>.

---

<sup>65</sup> PNUMA *et al.* Op. Cit., p. 23.

<sup>66</sup> OCIC, Op. Cit., 6 p.

<sup>67</sup> GURUS. [en línea]. S.t. 2004. [Citado 2 nov. 2004]. Disponible en internet: [www.gurusblog.com/archives/protocolo-de-Kioto](http://www.gurusblog.com/archives/protocolo-de-Kioto)

<sup>68</sup> ECOS CORPORATION. [en línea]. Australia, s.f. [Citado el 23 de jun de 2005]. Disponible en internet: [www.carbonmarket.com](http://www.carbonmarket.com)

<sup>69</sup> EGUREN, Op. Cit., p. 11.

<sup>70</sup> *Ibid.*, p. 11.

## 1.6 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES (PSA)

En los últimos años, el *Pago por Servicios Ambientales* (PSA) ha permitido promover un uso más eficiente de los recursos naturales, a través del fortalecimiento de la conciencia ambiental y la revaloración del sector forestal en el desarrollo de varios países de América Latina<sup>71</sup>.

Los esquemas de PSA vigentes a nivel mundial, se han desarrollado teniendo en cuenta las condiciones naturales, sociales y económicas propias de cada país y las condiciones específicas de mercado. Algunos *Servicios Ambientales* (SA) que están en discusión mundial son: la protección de biodiversidad, el almacenamiento de Carbono, la protección de la belleza del paisaje natural y los servicios hidrológicos<sup>72</sup>.

Existen diferentes metodologías para valorar económicamente estos servicios, como el costo de oportunidad de la tierra y los costos de producción forestal, pero que aún no reflejan su verdadero valor en el mercado internacional. Algunos valores oscilan entre los US\$16 y US\$2.671 por hectárea por año<sup>73</sup>.

## 1.7 VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES (PSA) EN COSTA RICA

El reconocimiento de los servicios ambientales dentro de la legislación costarricense, ha llevado a establecer un sistema que permite a los usuarios de estos servicios, pagar a los proveedores (productores) aplicando el principio de “*e/ que se beneficia paga*”. A través de este pago, se pretende compensar económicamente a las personas naturales o jurídicas que conservan el bosque y establecen plantaciones forestales<sup>74</sup>.

---

<sup>71</sup> CAMACHO, Maria A. *et al.* Gestión local y participación en torno al pago por servicios ambientales: Estudios de caso en Costa Rica. Costa Rica: FORD-PRISMA, 2002. 111 p.

<sup>72</sup> MAYRAND, K. y PAQUIN, M. Pago de servicios ambientales: estudio y evaluación de esquemas vigentes. Citado por: Experiencias de servicios ambientales en países de Centroamérica y del cono sur. [en línea] S.f. 58 p. [Citado el 1 de mar. de 2006]. Disponible en internet: [www.conafor.gob.mx/.../PSA\\_CABSA1.pdf](http://www.conafor.gob.mx/.../PSA_CABSA1.pdf)

<sup>73</sup> ARAYA, Vinicio. [en línea]. Algunas experiencias en el Pago de Servicios Ambientales con énfasis en Captura de Carbono. Proyecto Centroamericano PROCAFOR, S.f. 6 p. [Citado el 10 de ene de 2005]. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo2.htm>

El esquema de PSA que utiliza este país, se fundamenta en los acuerdos de la *Convención de Río de 1992* y en la *Ley Forestal 7575 de 1996*, donde se definen los SA como: "Los que brindan los bosques y plantaciones forestales en la protección y mejoramiento del medio ambiente". Dentro de esta Ley, se consideran como servicios ambientales los siguientes: 1) mitigación de emisiones de GEI, 2) protección del agua para uso urbano, rural o hidroeléctrico, 3) conservación de la biodiversidad para el uso sostenible, científico y farmacéutico, investigación y mejoramiento genético, y 4) protección de ecosistemas, formas de vida y belleza escénica natural para fines turísticos y científicos<sup>75</sup>.

Los recursos económicos destinados para el PSA en Costa Rica, provienen principalmente del impuesto selectivo de consumo a los combustibles (3.5% del impuesto establecido) y otros hidrocarburos, que transfiere el gobierno al *Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO)*. Otros fondos provienen de montos recaudados por la venta de servicios como captura de Carbono y protección de recursos hídricos a clientes locales e internacionales, y de donaciones extranjeras<sup>76</sup>.

A pesar de existir un esquema nacional para comercializar los denominados CER's (*Certificados de Emisiones Reducidas*), los propietarios privados pueden negociar el Carbono evitado, fijado o almacenado con quien mejor pague. Sin embargo, el esquema costarricense vigente es FONAFIFO - Oficina Costarricense de Implementación Conjunta OCIC - Sistema Nacional de Áreas de Conservación SINAC - Propietario<sup>77</sup>.

En consecuencia, la cuantificación y valoración de los *servicios ambientales* en Costa Rica, se ha convertido en un tema relevante de investigación en los últimos años, no solo para determinar la gama de servicios que genera un ecosistema, sino para valorar económicamente cada servicio o "bien ambiental", de acuerdo a las necesidades de los productores más pequeños<sup>78</sup>.

---

<sup>74</sup> COSTA RICA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA MINAE Y FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO FORESTAL FONAFIFO. Costa Rica: Hacia la sostenibilidad de sus recursos naturales. San José, 1998.

<sup>75</sup> COSTA RICA. Ley Forestal y su Reglamento. San José: Asamblea Legislativa, 1999. 116 p.

<sup>76</sup> Ibid., p. 84.

<sup>77</sup> ÁVILA V., Gabriela. Fijación y almacenamiento de Carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Turrialba, Costa Rica, 2002. 99 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

<sup>78</sup> CAMACHO, Op. cit., p. 3.

## 1.8 CRECIMIENTO DE LAS ESPECIES FORESTALES

El crecimiento de un árbol es su aumento de tamaño en el tiempo y se puede expresar en términos del diámetro, altura, área basal o volumen<sup>79</sup>. Según Louman, Valerio y Jiménez “El crecimiento es producto de los procesos de anabolismo o síntesis, y catabolismo. El primer proceso captura la energía necesaria para producir tejidos y para cumplir con las funciones del organismo. El segundo mantiene los tejidos y en este proceso consume y libera parte de la energía mediante la respiración”.

El crecimiento diamétrico (sin incluir la corteza), es el incremento que presenta el árbol cuando se acumulan capas de xilema alrededor del eje central del mismo. Éste puede ser continuo o periódico dependiendo del ambiente climático y la genética de la especie<sup>80</sup>.

A la magnitud del crecimiento se denomina *incremento*. Todo crecimiento implica un estado inicial mensurable y cambios en ese estado con respecto al tiempo. De allí se puede hablar del *Incremento Corriente Anual* (incremento del último año de medición ICA) y el incremento medio anual (incremento promedio por año desde el año cero IMA)<sup>81</sup>.

El crecimiento de las especies forestales está determinado por factores internos y externos. Los internos son principalmente genéticos y fisiológicos; los externos son fundamentalmente climáticos, edáficos y de competencia con los demás árboles o cultivos asociados<sup>82</sup>.

**1.8.1 Modelos de crecimiento.** Un modelo de crecimiento, es una representación de una realidad a través de funciones, ecuaciones o gráficas. Se consideran herramientas prácticas en la transformación de datos empíricos y conocimientos

---

<sup>79</sup> LOUMAN, B; VALERIO, J. y JIMÉNEZ W. En: LOUMAN, B; QUIRÓS, D. y NILSSON M. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba: CATIE, 2000. p. 68-69.

<sup>80</sup> JIMENEZ, W. Evolución del crecimiento de *Quercus copeyensis* M. en un bosque de roble no intervenido de San Gerardo de Dota, Costa Rica. San José, 1984. 192 p. Trabajo de grado (Lic. Ciencias Forestales). Universidad Nacional.

<sup>81</sup> LOUMAN, VALERIO y JIMÉNEZ, Op. Cit., p.69.

<sup>82</sup> LOJAN, Leoncio. Periodicidad del clima y del crecimiento de especies forestales en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Vol. 17, no. 1, 1967. p. 71-83.

silviculturales, en información clave para realizar análisis financieros y programar el manejo de las plantaciones forestales<sup>83</sup>.

Al modelar el crecimiento de un árbol, representamos el desarrollo de ciertas variables (volumen, área basal, diámetro, altura) en función de los factores que influyen en estas (edad, densidad de árboles, condición inicial del rodal o sistema, especie, clima, entre otros). Además, mediante las curvas de crecimiento podemos observar la gráfica de tamaños acumulados y representar la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación<sup>84</sup>.

## 1.9 COMPORTAMIENTO DE LA BIOMASA EN ECOSISTEMAS

La biomasa de una comunidad de plantas se define como su masa seca total, considerándose dentro de esta, a la biomasa aérea como el compartimiento más importante en proyectos de captura de Carbono, tanto en peso como en su tasa de cambio<sup>85</sup>.

Su acumulación se produce cuando la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado en el proceso de fotosíntesis, es exactamente igual a la cantidad de energía liberada durante la respiración (*punto de compensación de la luz*) y va hasta un límite en el cual un aumento en la intensidad de la luz, no ocasiona un aumento en la tasa fotosintética (*punto de saturación lumínica*). Ambos puntos dependen de la especie, el tipo de follaje del árbol, condiciones ambientales, nivel de nutrientes disponible y potencial hídrico<sup>86</sup>.

---

<sup>83</sup> HUGHELL, David. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de: *Eucalyptus camaldulensis*, *Glicicidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en America Central. Turrialba: CATIE, 1990. 57 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico No. 22).

<sup>84</sup> ROJO, Gustavo, *et al.* Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas. En: Ra Ximhai. Vol. 1, no. 1 (ene-abr), 2005; 153-166.

<sup>85</sup> ZAPATA, Mauricio; COLORADO, G.J. y DEL VALLE, Jorge. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.A; DEL VALLE, J.I. y MORENO F.H. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. p. 87-119.

<sup>86</sup> VASQUEZ, Guillermo. Crecimiento de un bosque de guandal explotado en el litoral pacífico colombiano. Medellín, 1987. 212 p. Trabajo de grado (Ing. Forestal). Universidad Nacional de Colombia.

Los estudios sobre crecimiento de biomasa, tienen como fin entender los ciclos de energía y de los nutrientes. También se usan para estudiar el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO<sub>2</sub><sup>87</sup>.

**1.9.1 Metodologías para estimar biomasa.** Según Segura y Kanninen<sup>88</sup>, para estimar la biomasa sobre el suelo se pueden emplear dos métodos: 1) *los métodos directos* o destructivos, y 2) *los métodos indirectos*, que generalmente se aplican cuando los árboles son de grandes dimensiones<sup>89</sup>. En los dos casos, los valores obtenidos se extrapolan a una hectárea.

Los métodos destructivos incluyen mediciones en campo, cosecha y toma de muestras de la totalidad de la vegetación, teniendo en cuenta algunos criterios de evaluación. Aunque este método es más costoso y requiere de mayor tiempo, arroja resultados de alta confiabilidad, en comparación con el segundo método<sup>90</sup>.

Entre los métodos indirectos para estimar biomasa, se encuentra el *uso de modelos de biomasa específicos para cada especie*, donde los valores de inventarios forestales como diámetro (dap) y altura, se transforman a términos de biomasa con la ayuda de modelos generales<sup>91</sup>.

Andrade e Ibrahim<sup>92</sup>, aconsejan emplear modelos específicos para cada especie y que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las del lugar donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea.

Dentro de los estudios de biomasa, la medición de raíces representa un trabajo más amplio y tedioso con niveles bajos de precisión<sup>93</sup>. Por esta razón, algunos

---

<sup>87</sup> BROWN, Sandra. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. Roma: FAO, Montes 134, 1997. 55 p.

<sup>88</sup> SEGURA, Milena y KANNINEN, Markku. Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. En. OROZCO, L. y BRUMÉR, C. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba: CATIE, 2002. p. 202-22.

<sup>89</sup> PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass. A review with examples and critical comparisons. En: Forestal. Science. Vol. 45, no. 4, 1999; 573-593.

<sup>90</sup> SEGURA y KANNINEN, Op. Cit., p.210.

<sup>91</sup> MACDIKEN, K.G. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Program. S.L.: Winrock International Institute for Agricultural Development, 1997. 84 p.

<sup>92</sup> ANDRADE e IBRAHIM, Op. Cit., p.111.

<sup>93</sup> MACDIKEN, Op. cit., 84 p.

autores recomiendan utilizar valores reportados en literatura para bosques tropicales, donde el porcentaje de biomasa radical puede encontrarse en un rango entre 11 y 54%, aportando en promedio 18% de la biomasa total<sup>94</sup>.

**1.9.2 Modelos de biomasa.** Los modelos de biomasa son modelos matemáticos (o alométricos) donde se relaciona la masa seca de algún componente o del árbol completo, con variables del tamaño del árbol (diámetro, altura, área basal y volumen)<sup>95</sup>. Según Zapata, Colorado y Del Valle<sup>96</sup> el procedimiento más recomendado para estimar la biomasa en bosques tropicales, consiste en relacionar estas variables en una regresión lineal bajo las escalas logarítmicas, lo cual simplifica los cálculos e incrementa la validación estadística al homogeneizar la varianza sobre el rango de los datos.

Ortiz<sup>97</sup>, recomienda construir gráficos de puntos entre la variable dependiente y cada una de las variables independientes, para probar cuales modelos o ecuaciones de regresión explican mejor esta relación. Después se debe aplicar un análisis de varianza y escoger el o los modelos de mejor ajuste con la ayuda de algunos estadígrafos. Según MacDiken<sup>98</sup>, estos modelos pueden ser construidos usando como mínimo una muestra representativa de 30 árboles.

Los estadígrafos más conocidos y ampliamente usados en el campo forestal son: el *Coefficiente de Determinación* ( $R^2$ ), el *Coefficiente de determinación ajustado* ( $R^2$ -ajust), el *Coefficiente de variación* (CV%), la raíz del cuadrado medio del error o *error estándar de estimación* (RMSE) y el *Índice de furtival* (IF), donde los valores del  $R^2$  y del  $R^2$ -ajust deben ser altos, en tanto que los valores del CV% y del IF deben procurarse bajos<sup>99</sup>.

---

<sup>94</sup> SIERRA, C.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J. y MORENO, F. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. p 169-188.

<sup>95</sup> ZAPATA, COLORADO y DEL VALLE, Op. Cit., p. 90.

<sup>96</sup> Ibid., p. 92.

<sup>97</sup> ORTIZ, Edgar. Técnicas para la estimación del crecimiento y rendimiento de árboles individuales y bosques. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, no. 16,1993. 71 p.

<sup>98</sup> MACDIKEN, Op. Cit., p.122.

<sup>99</sup> 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. Turrialba, 1999. 46 p. (Serie Técnica no. 306).

## 1.10 CICLO DEL CARBONO

El ciclo del Carbono comienza con la fijación del anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis realizados por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el CO<sub>2</sub> y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera. Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta y el CO<sub>2</sub> así formado, se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales que también respiran y liberan CO<sub>2</sub>. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo lo que da como resultados que el Carbono de sus tejidos se oxide en CO<sub>2</sub> y regrese a la atmósfera<sup>100</sup>.

**1.10.1 El Carbono en ecosistemas forestales.** El CO<sub>2</sub> atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO<sub>2</sub> participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco).

Según Snowdon *et al.*<sup>101</sup>, los agroecosistemas acumulan Carbono en cuatro grandes componentes: biomasa aérea (o biomasa sobre el suelo), hojarasca, sistema radical y Carbono orgánico del suelo. La influencia de la vegetación herbácea en el almacenamiento y fijación de Carbono es muy baja, por lo que puede omitirse dentro de un estudio de Carbono<sup>102</sup>.

Durante el tiempo en que el CO<sub>2</sub> se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera *almacenado*. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo del Carbono<sup>103</sup>.

Entre los métodos empleados para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la biomasa total, se encuentra el *método del factor de conversión*. Este consiste en multiplicar los datos de biomasa por un factor de conversión o *fracción de Carbono*

---

<sup>100</sup> ORDOÑEZ, José. Captura de Carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. México D:F: Instituto Nacional de Ecología, 1999. 81 p.

<sup>101</sup> SNOWDON *et al.* Protocol for sampling tree and stand biomass. En: National carbon accounting system technical report, no. 3. Australia: Greenhouse Office, 2001. 114 p.

<sup>102</sup> MACDIKEN, Op. Cit., p.181.

<sup>103</sup> PNUMA *et al.* Op. Cit., p.34.

que involucra la relación entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> y el peso del átomo de Carbono (C). Este factor generalmente, asume un valor de 0.5g de C con respecto a un gramo de biomasa<sup>104</sup>.

**1.10.1.1. Carbono almacenado (Ca).** Hace referencia a la cantidad de Carbono que se encuentra en un ecosistema vegetal, en un determinado momento. Tiene en cuenta criterios como tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que se basan en datos de biomasa calculada a partir de volúmenes por hectárea de inventarios forestales<sup>105</sup>.

Generalmente, este tipo de Carbono se paga por conservación de bosques y no puede ser liberado a la atmósfera si se accede a un pago por servicios ambientales<sup>106</sup>. El Carbono almacenado se expresa en tnC ha<sup>-1</sup>.

**1.10.1.2. Carbono fijado (Cf).** Se refiere al flujo de Carbono dentro de una unidad de área cubierta con vegetación en un lapso de tiempo dado. Su cuantificación permite predecir el comportamiento del C en cualquier momento durante el crecimiento de la población<sup>107</sup>.

Este tipo de Carbono depende de las características de la especie, la tasa de crecimiento y la longevidad, así como también de las condiciones del sitio, como localización, clima y rotación. Se expresa en tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup><sup>108</sup>.

---

<sup>104</sup> BROWN, Sandra y LUGO, A.E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian Amazon. Op. cit., p.16.

<sup>105</sup> SEGURA Milena. Almacenamiento y fijación de Carbono en *Quercus costarricensis* en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 1997. 34 p. Trabajo de grado (Lic. Ingeniero Forestal). Universidad de Heredia (Costa Rica).

<sup>106</sup> RAMÍREZ, O. y GÓMEZ, M. Estimación y valoración económica del almacenamiento de Carbono. En: Revista Forestal Centroamericana. No 27, (Jul- Sep), 1999; 17-22.

<sup>107</sup> SEGURA, Op. Cit. p.28.

<sup>108</sup> GUTIÉRREZ V.H. y LOPERA G.J. [en línea]. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de Carbono en plantaciones forestales. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL: MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES. (2002, Valdivia). Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2002. [Citado el 17 de jun de 2005]. Disponible en internet: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

## 1.11 MODELAJE DE SISTEMAS AGROECOLOGICOS

Un modelo de simulación matemática, es una representación simplificada de un sistema real, que utilizan ecuaciones para representar las conexiones que existe dentro de este. En muchas ocasiones, es más fácil trabajar con modelos que con sistemas reales<sup>109</sup>. Hoy en día la mayoría de los modelos son implementados como programas de cómputo.

El desarrollo de modelos de simulación en agroecosistemas, a menudo se utiliza para ayudar a la comprensión del funcionamiento de los sistemas naturales y visualizar como pueden comportarse en el futuro<sup>110</sup>. La ciencia ha diseñado y aplicado modelos durante siglos, pero los modelos matemáticos de sistemas medioambientales se han ido desarrollando tan solo en las últimas décadas<sup>111</sup>.

Al modelar se obtiene una percepción total de las relaciones entre las posibles decisiones y las consecuencias. Estas relaciones determinan que procesos deben modelarse y a que nivel de detalle dependiendo de la forma de evaluar la eficiencia de los modelos<sup>112</sup>.

Los modelos de simulación en investigación biológica, pueden llegar a niveles de complejidad altas de acuerdo con los objetivos y el detalle requerido en el sistema que representan. Esta complejidad se justifica siempre y cuando se tenga información suficiente, no solo para la construcción del mismo, sino también para la extrapolación del comportamiento del modelo en condiciones inexploradas donde debe existir información básica mínima.

---

<sup>109</sup> GUTIÉRREZ, y LOPERA, Op. Cit.,

<sup>110</sup> STANDA-GUNDA, W. *et al.* Participatory modelling to enhance social learning, collective action and mobilization among users to the Mafungautsi Forest, Zimbabwe. *Small-scale Forest Economics. En: Management and Policy.* Vol. 2, no. 2, 2003; 313-326.

<sup>111</sup> GORMLEY, H.J. y SINCLAIR, Fergus L. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Central. *En: Agroforestería en las Américas.* Vol. 10, no. 39-40, 2003; 103-108.

<sup>112</sup> MERLO, Froilan. Exploración de herramientas de dinámica de sistemas para la elaboración de un modelo de decisión forestal boliviano. [en línea]. s.f. [Citado el 8 de ene. de 2005]. Disponible en internet: <http://www.infor.cl/webinfor/.../Froil%C3%A1n%20Merlo.%20Bolivia.pdf>

## 2. DISEÑO METODOLOGICO

### 2.1 MODELOS DE CRECIMIENTO

Los modelos de crecimiento de *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*, se realizaron con el fin de estimar con un alto grado de precisión, el diámetro que un árbol alcanzaría a una determinada edad, y posteriormente estimar el crecimiento en biomasa para cada una de estas especies y para el sistema agroforestal.

Para el desarrollo de estos modelos se utilizó los datos de diámetro pertenecientes a dos ensayos localizados en el distrito de Changuinola, Provincia Bocas del Toro, al nor-este de Panamá (uno en la comunidad de Charagre y otro en la comunidad de Ojo de Agua) y a dos ensayos localizados en la Provincia de Limón, al suroeste de Costa Rica (uno en el cantón de Talamanca y otro en el cantón de Matina)(Anexo 1).

**2.1.1 Localización.** Estos ensayos se encuentran ubicados en las regiones comprendidas entre los 9°16' y 9°39' de latitud Norte y los 82°25' y 82°48' de longitud Oeste, entre los 20 y 280msnm, con una temperatura media anual de 25 a 30°C y una precipitación de 2500 a 3.527mm/año<sup>113-114</sup>. Los suelos en su mayoría pertenecen al orden Inceptisol, derivados de depósitos aluviales u originados de rocas volcánicas en las partes altas o lomas<sup>115</sup>. De acuerdo a la clasificación de Holdridge<sup>116</sup>, la formación vegetal de los cuatro ensayos corresponde a la zona de vida de bosque húmedo Tropical (bh-T).

La edad de los sistemas oscila entre 8 a 16 años de edad y han sido objeto de evaluación de diversos estudios<sup>117-118</sup>. En el Anexo 2 se puede observar el resumen de las características más importantes de cada uno.

---

<sup>113</sup> CATIE. Datos meteorológicos. [en línea]. 2003. [Citada el 3 de mar. de 2005]. Disponible en internet: <http://www.catie.ac.cr>

<sup>114</sup> MIRANDA, A. Caracterización de la producción de cacao en Panamá. Santiago: MIDA-PROCACAO, 1992. 53 p.

<sup>115</sup> NIEUWENHUYSE, A. Los suelos de los sitios del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ Cantón de Talamanca, Costa Rica y Distrito de Changuinola, Panamá. Turrialba: CATIE, 1994. 133 p.

<sup>116</sup> HOLDRIDGE, L. Ecología basada en zonas de vida. San José: IICA, 1982. 216 p.

<sup>117</sup> VALDIVIESO, Roberto. Crecimiento de laurel *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken) como componente maderable de sistemas agroforestales en Talamanca, Costa Rica y Changuinola,

**2.1.2 Depuración de los datos.** Antes del ajuste, se realizó una depuración de los datos, eliminando observaciones inconsistentes (mediciones menores con respecto a la anterior), incompletas (mediciones de árboles que no seguían una secuencia) y/o atípicas (crecimientos nulos o negativos), para uniformizar las bases<sup>119</sup>.

**2.1.3 Ajuste de modelos.** El ajuste de los modelos se realizó a nivel de árbol individual, mediante regresiones por mínimos cuadrados<sup>120</sup>, relacionando el diámetro (variable dependiente) con la edad (variable independiente). Se aplicó un análisis estadístico descriptivo a la variable independiente (promedio, coeficiente de varianza CV%, desviación estándar S, valores mínimos y máximos), para conocer su distribución y rangos.

**2.1.3.1. Ajuste de modelos para *Cordia alliodora*.** Para el desarrollo de estos modelos, se utilizó la información de dap de los ensayos “*cacao-plátano-laurel*” y “*cacao nuevo con sombra de maderables*” del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ.

Para esta especie, se desarrollaron modelos de crecimiento en dos condiciones de sitio, tomando como principal criterio el tipo de relieve en el cual se establecieron (valle y loma). Esto se aplica tanto en los modelos de biomasa, como en la simulación del sistema agroforestal.

**2.1.3.2. Ajuste de modelos para *Theobroma cacao*.** Para el desarrollo de este modelo, se utilizó la información del diámetro a 30 cm del suelo (Diám 30cm) pertenecientes a los ensayos del *Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ* y del ensayo “*Moniliasis resistant hybrid experiment at La Lola farm*”.

A diferencia del laurel, para esta especie solo se construyó un modelo general para híbridos, sin tener en cuenta las condiciones de relieve.

---

Panamá. Turrialba, 1997. 70 p. Trabajo de Grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

<sup>118</sup> SOMARRIBA, E.; DOMÍNGUEZ, L. y LUCAS, C. Cacao bajo sombra de maderables en Ojo de Agua, Changuinola, Panamá: manejo, crecimiento y producción de cacao y madera. Turrialba: CATIE, 1996a. 47 p. (Serie Técnica no.276).

<sup>119</sup> HUGHELL, Op. Cit., p. 8.

<sup>120</sup> MACHADO, E.G.; PEREIRA, A. y RIOS, N.A. Tabla de volumen para *Buchenavia capitata*, Vahl. En: Quebracho. Vol. 10, 2003; 76-82.

**2.1.4 Selección y validación de los mejores modelos.** Para escoger los modelos de mejor ajuste, se tuvo en cuenta estadígrafos recomendados por algunos autores<sup>121</sup> como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error estándar de estimación o raíz del cuadrado medio del error ( $RMSE$ ) y la suma de cuadrados del error ( $SSE$ ), así como la lógica biológica del modelo<sup>122</sup>. Además, se realizó la validación de las ecuaciones mediante una prueba de comparación de medias (prueba de T) entre los valores predichos y los reales, según lo recomendado por Moret y Ruiz<sup>123</sup>.

Una vez seleccionado el mejor modelo y obtenida la ecuación de ajuste, se realizó un análisis gráfico de los residuales estudentizados para detectar la presencia de normalidad en los errores y homogeneidad en las varianzas. En base a esto también se eliminaron valores atípicos (*outliers*) que podían estar causando mayores rangos de error en el modelo, teniendo en cuenta los valores cuyos residuales estandarizados superaban tres desviaciones estándar<sup>124</sup>.

El modelo de crecimiento escogido para estas especies, fue desarrollado para un período de 15-16 años, pero los valores fueron extrapolados hasta el año 20 para conocer mejor su comportamiento. Todos los modelos fueron ajustados y transformados utilizando el programa estadístico *STATGRAPHICS Plus 5.0*.

## 2.2 MODELOS DE BIOMASA

Para calcular la biomasa aérea de las especies *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*, inicialmente se aplicó el método destructivo donde se midieron en pie variables de crecimiento en los árboles, se cortó y pesó el árbol en su totalidad y se tomó muestras representativas de cada uno de sus componentes. En base a

---

<sup>121</sup> MORET, A.Y y RUIZ P. Determinación de ecuaciones de volumen para mureillo (*Erisma uncinatum*) en la unidad C4 de la Reserva Forestal Imataca, Bolívar. En: Revista Forestal Venezolana. Venezuela, Vol. 42, no. 2, 1998; 187-197.

<sup>122</sup> SEGURA, M. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de Carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Turrialba, 1999. 119 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). CATIE.

<sup>123</sup> MORET y RUIZ, Op. Cit., p.190.

<sup>124</sup> ZAPATA, M.; DEL VALLE, J. y ORREGO, S. Corrección por sesgos en modelos log-normales alométricos linealizados utilizados para la estimación de la biomasa aérea. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL: MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN SISTEMAS FORESTALES (Valdivia, 2002) Memorias del Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Sistemas Forestales. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2002. 47 p.

estos datos, la consultoría de Segura M. Sc. (Proyecto Captura de Carbono)<sup>125</sup>, desarrolló los modelos de biomasa aérea para cada una de estas especies en la zona de Talamanca, Costa Rica.

A partir de estos modelos, se procedió a estimar la biomasa total de los árboles utilizados en el desarrollo de modelos de crecimiento, mediante el uso de modelos de biomasa específicos para cada especie, recomendado por MacDiken<sup>126</sup>.

Los criterios de selección para los modelos de biomasa de mejor ajuste, fueron los mismos utilizados en la selección de los modelos de crecimiento (...Véase el numeral 2.1.4...).

**2.2.1 Localización.** La recolección de información necesaria para elaborar los modelos de biomasa aérea para las especies cacao y laurel, se llevó a cabo en la región de Talamanca, provincia de Limón, Costa Rica, dentro de las Reservas Indígenas Bribri y Cabécar (Anexo 3).

Esta Reserva se encuentra entre los 9°21'38'' y 9°39'30'' Norte y entre los 82°50'40'' y 83°50'40'' Oeste. Se distinguen dos tipos de paisaje: valle y laderas. El valle esta constituido por la coalición de los abanicos aluviales de los ríos Telire, Coen, Larí, Urén y Yorkín, con una altitud sobre el nivel del mar entre los 40 y 150 m y con suelos clasificados como Typic Troporthent. Las laderas (piedemonte de la cordillera) se constituyen por materiales del terciario y rocas intrusivas, con altitudes entre los 150 a 400 m, pendientes entre 13 y 60% y suelos del tipo Oxic Palehumults y Aeric Tropaquepts<sup>127</sup>.

Según la clasificación de Holdridge<sup>128</sup>, la formación vegetal corresponde a la zona de vida bosque húmedo (bh-T) y muy húmedo Tropical (bmh-T). La temperatura media anual es de 25.6°C y la precipitación oscila entre 1900 y 2740mm año<sup>-1</sup>.<sup>129</sup>

---

<sup>125</sup> SEGURA, Milena. Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba: Proyecto Captura de Carbono y Desarrollo de Mercados Ambientales en Sistemas Agroforestales Indígenas con Cacao en Costa Rica (TF-052118), 2005.139 p. (Informe final de consultoría).

<sup>126</sup> MACDIKEN, Op. Cit., 84 p.

<sup>127</sup> BORGE, D.H. y CASTILLO, R. Cultura y conservación en la Talamanca Indígena. San José: Universidad Estatal a Distancia, 1997. 259 p.

<sup>128</sup> HOLDRIDGE, Op. Cit., 216 p.

<sup>129</sup> BORGE, C. y VILLALOBOS, V. Talamanca en la encrucijada. San José: Universidad Estatal a Distancia, 1995. 121 p.

Los cacaotales donde se realizó la medición, cosecha y toma de muestras de los árboles de cacao y laurel, se encuentran generalmente manejados como sistemas agroforestales multiestratos con un dosel de sombra que incluye especies frutales, medicinales, maderables y no maderables<sup>130</sup>. En algunos casos se encontraron estratos simples de sombra, constituidos principalmente por *Cordia alliodora* (laurel) en regeneración natural (50 -100 árboles ha<sup>-1</sup>)<sup>131</sup>. El tamaño promedio de estos SAF y la distancia de siembra promedio de cacao es de 1.3ha y 3x3m, respectivamente.

**2.2.2 Metodología modelos biomasa aérea para cacao y laurel.** La metodología para desarrollar los modelos de biomasa aérea, se basó en el protocolo de muestreo desarrollado por la consultoría de Segura M. Sc. del *Proyecto Captura de Carbono*<sup>132</sup>. El procedimiento se describe a continuación:

**2.2.2.1. Selección de los árboles.** La selección de los árboles a muestrear se realizó con previa consulta a los propietarios de las fincas, tratando de abarcar la mayor cantidad de rangos diamétricos por especie, teniendo en cuenta el tipo de manejo dado al sistema y el estado fitosanitario del árbol.

**2.2.2.2. Medición y corta de *Cordia alliodora*.** Los individuos seleccionados fueron medidos en pie, tomando datos de dap (diámetro tomado a 1.30m sobre el suelo), altura total, altura comercial y ancho de copa (dos mediciones perpendiculares para sacar promedio). En el caso de los tocones, se tomaron dos medidas perpendiculares del diámetro superior (para obtener un promedio) y dos medidas de altura. Se utilizó cinta diamétrica y forcípula para medir los diámetros, clinómetro para medir las alturas y cinta métrica para los anchos de copa.

Los árboles se clasificaron por componentes: hojas, ramas pequeñas (d<5 cm), ramas grandes (d>5 cm) y fuste y se cortaron a ras del suelo. Se tomaron dos muestras representativas por cada componente (aprox. 200 g), para determinar en laboratorio el contenido de materia seca, gravedad específica de la madera y fracción de Carbono de la especie. Los árboles con dap<25 cm se pesaron en campo, mientras que ramas y fustes con dap>25 cm, fueron cubicados cada metro de longitud para estimar su volumen por medio de fórmulas (Smalian y Huber).

---

<sup>130</sup> GUIRACOCHA, G. Conservación de la biodiversidad en los sistemas agroforestales cacaoteros y bananeros de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 2000. 128 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

<sup>131</sup> SOMARRIBA y HARVEY, Op. Cit., p.13.

<sup>132</sup> SEGURA; Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., 139 p.

**2.2.2.3. Medición y corta de *Theobroma cacao*.** En cada árbol seleccionado, se realizaron mediciones de diámetro a 30 cm del suelo (Diám 30cm), altura total, altura a la horqueta, ancho de copa (dos mediciones perpendiculares para sacar promedio) y diámetro de ramas (para calcular diámetro cuadrático). La medición de los tocones se realizó de la misma manera que en laurel. Se utilizó cinta diamétrica y forcípula para medir los diámetros, vara telescópica para medir alturas y cinta métrica para los anchos de copa.

Estos árboles, se cortaron a ras del suelo y se clasificaron por componentes: hojas, ramas pequeñas ( $d < 5$  cm), ramas grandes (que incluyen el fuste principal) y frutos. Se pesaron en campo todos los árboles y se tomaron dos muestras por componente de aprox. 200 g cada una, para determinar en laboratorio el contenido de materia seca, gravedad específica de la madera y fracción de Carbono de la especie.

**2.2.2.4. Registro y análisis de datos.** Cada muestra se pesó en una balanza digital y se registró los resultados en formularios diseñados para cada especie. Los análisis de *materia seca* y *gravedad específica* se realizaron en el laboratorio especializado de raíces del *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza* (CATIE), Turrialba, Costa Rica, siguiendo las normas del ASTM<sup>133</sup>.

La *fracción de Carbono* se determinó mediante el método de combustión, en el equipo auto-analizador *ThermoFinnigan* del laboratorio de suelo, tejido vegetal y aguas del CATIE.

**2.2.2.5. Ajuste y selección de modelos biomasa aérea para cacao y laurel.** Con la información recolectada en campo y los datos de materia seca, gravedad específica y volumen, la consultoría de Segura M. Sc.<sup>134</sup> calculó la cantidad de biomasa por árbol y desarrolló los modelos para estimar biomasa aérea en cada una de las especies.

Esta consultoría probó varios modelos con las variables independientes, transformadas y no transformadas, tomando como criterios de selección los modelos que cumplieron con un mejor ajuste estadístico, menores valores de *RMSE*, suma de cuadrados de los residuos (*PRESS*), índice de Furnival (*IF*) y

---

<sup>133</sup> ASTM. Standard test method for specific gravity of wood and wood-base materials. Filadelfia: Edition D2395-83, 1983. p. 353-360. Citado por: SEGURA; Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 5.

<sup>134</sup> SEGURA; Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 23.

mayor coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ -ajust). Además, tuvieron en cuenta la distribución de los residuos, lógica biológica y practicidad en su uso.

**2.2.3 Modelos de biomasa total para las especies laurel y cacao.** A partir de estos modelos, se realizaron las estimaciones de biomasa aérea ( $Ba$ ) con los datos diamétricos de los ensayos utilizados en la elaboración de los modelos de crecimiento de este estudio. En base a estos resultados, se estimó la biomasa de raíces ( $Br$ ), multiplicando la biomasa aérea total por 0.13<sup>135</sup> (porcentaje promedio de  $Br$  con respecto a  $Ba$ ) obteniendo así la biomasa total ( $Bt$ ) por árbol. Con estos datos se generó las ecuaciones predictoras de  $Bt$  para laurel y cacao, en función de la edad.

**2.2.3.1. Ajuste y validación de los modelos.** El ajuste, selección y validación de los modelos, se realizó con los mismos criterios aplicados a los modelos de crecimiento, es decir, alto  $R^2$ , bajos valores de  $PRESS$  y  $RMSE$ , normalidad de los residuos, homogeneidad de las varianzas y diferencias estadísticas no significativas entre las medias de los valores predichos y los observados.

Los modelos de regresión con mejores ajustes estadísticos, se aplicaron en la simulación de Carbono almacenado del sistema agroforestal cacao – laurel.

**2.2.4 Carbono almacenado en laurel y cacao.** Los valores de biomasa total estimados mediante los modelos para cada especie, se multiplicaron por la fracción de Carbono de *T. cacao* y *C. alliodora*, para obtener la cantidad de Carbono almacenado por árbol y después llevarla a términos de  $tn\ ha^{-1}$ .

## **2.3 SIMULACIÓN DEL ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO *Theobroma cacao* - LAUREL *Cordia alliodora* EN LA RESERVA INDIGENA DE TALAMANCA, COSTA RICA**

La simulación del almacenamiento y fijación de Carbono del sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL), se realizó para las condiciones de la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica (...ver Numeral 2.2.1...), en un período productivo de 25 años, en dos condiciones de crecimiento de laurel: valle (v) y loma (l), bajo tres densidades de siembra para laurel (6x6, 9x9 y 12x12m) y una para cacao (3x3m). En cada escenario se asumió que los dos componentes fueron sembrados en el primer año (año cero) y que la mortalidad y/o raleo también se realizan en este año. No se tuvieron en cuenta porcentajes de resiembra.

---

<sup>135</sup> MACDIKEN, Op. Cit., 84 p.

Las principales consideraciones, que se tuvieron en cuenta en los seis escenarios fueron:

**2.3.1 Distancia 6x6 m (valle y loma).** En este escenario se simuló el almacenamiento de Carbono de 278 árboles de laurel de los cuales 150 llegan al final del ciclo productivo. El porcentaje de mortalidad utilizado fue de 15% y un porcentaje de raleo de 31%, teniendo en cuenta los requerimientos ambientales y de manejo de estas especies (laurel y cacao)<sup>136</sup>.

**2.3.2 Distancia 9x9 m (valle y loma).** Se simuló la captura de Carbono de 124 árboles de laurel de los cuales 112 llegan al final del turno. Se asumió un porcentaje de mortalidad de 10% y no se tuvo en cuenta raleos debido a la baja densidad de siembra de esta especie.

**2.3.3 Distancia 12x12 m (valle y loma).** En este escenario se simuló el almacenamiento de Carbono de 70 árboles de laurel de los cuales 69 llegan al final del ciclo productivo. El porcentaje de mortalidad utilizado fue de 1% y no se tuvo en cuenta raleos por la baja densidad de siembra de este componente.

**2.3.4 Distancia de siembra para cacao.** La cantidad de Carbono almacenado en cacao, se simuló para 1111 plantas ha<sup>-1</sup> (3x3 m) a las cuales se restó el porcentaje de mortalidad (8%) de esta especie y el número final de árboles de laurel en cada escenario.

Los valores estimados de Carbono en cacao y laurel, se llevaron a términos de tn ha<sup>-1</sup> (tonelada por hectárea), multiplicando el Carbono almacenado por árbol a una determinada edad, por las respectivas densidades de siembra.

Finalmente, la cantidad de Carbono total del SAF-CL se calculó sumando el Carbono almacenado en cacao y laurel con el Carbono almacenado en la necromasa (n), el suelo (cos) y la vegetación herbácea (vh) (incluye árboles con diámetros <10 cm) del sistema, suponiendo que en estos últimos compartimientos el Carbono se mantiene constante. Los valores de n, cos, y vh, fueron estimados y facilitados por la consultoría de Segura M. del *Proyecto Captura de Carbono*<sup>137</sup>.

---

<sup>136</sup> CATIE. Laurel *Cordia alliodora*. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Op. Cit., p.31.

<sup>137</sup> SEGURA; M. Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 23.

El período para el cual fue simulada la cantidad de Carbono presente en el sistema fue de 25 años, período en el cual se esperaría un diámetro aceptable de corta para laurel (>40 cm)<sup>138</sup> y el final del ciclo productivo del cacao<sup>139</sup>. Se debe tener en cuenta que la simulación de biomasa y Carbono del SAF-CL fue desarrollada para condiciones de bosque húmedo tropical (bh-T) y para árboles de cacao y laurel manejados.

La biomasa y el contenido de Carbono almacenado en raíces, no se estimó en este estudio debido a las dificultades para su extracción y su alto costo, por lo que se asumió un valor promedio de 13% de la biomasa total para cada especie<sup>140</sup>.

La simulación del SAF-CL fue realizada mediante el programa de simulación *Vensim* PLE para Windows versión 5.5d.

---

<sup>138</sup> VALDIVIESO, Op. Cit., 70 p.

<sup>139</sup> PAREDES, Mendis. Manual de cultivo del cacao Perú: MINISTERIO DE AGRICULTURA – PROGRAMA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA, 2003. 100 p.

<sup>140</sup> MACDIKEN, Op. Cit., 84 p.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 MODELOS DE CRECIMIENTO

**3.1.1 Modelos de crecimiento en diámetro (dap) para *Cordia alliodora*.** El ajuste de estos modelos se inició con un grupo de datos de dap de 1535 (130 árboles), de los cuales 1101 datos se utilizaron en el ajuste del modelo en valle (v) y 356 datos en loma (l), después de ser depurados. Esta base de datos pertenece a los ensayos “Cacao – Plátano – Laurel” y “Cacao nuevo con sombra de maderables” (Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ).

Los árboles presentaron en promedio 26.8 cm de dap en valle (2.4-56.1 cm) y 23.1 cm en loma (3-52.4 cm), durante un período de medición de 15-16 años (15-196 meses). La edad de cada árbol incluyó el tiempo al que las plántulas fueron llevadas a campo (3-4 meses).

Los coeficientes de variación (CV%) de esta variable, resultaron altos en los dos sitios (44.4 en valle y 40 en loma), debido al amplio rango de datos generado por valores muy pequeños en los primeros meses y diámetros muy grandes en edades adultas. Los valores de la desviación estándar (S) (11.9 en valle y 9.2 en loma) en los dos modelos, nos muestran una moderada dispersión de los datos en relación a la media.

**3.1.1.1. Modelo de predicción.** Después de los resultados estadísticos obtenidos, se consideró que los modelos que mejor predecían el diámetro en laurel (dap) fueron de tipo exponencial (Cuadro 2), en el cual la variable dependiente (y) es el diámetro y la variable independiente (x) es la edad. De acuerdo al análisis de varianza, los modelos con sus coeficientes de regresión, resultaron altamente significativos al 99% de confianza ( $P < 0.01$ ).

Al realizar el ajuste de los modelos, se encontró problemas de normalidad de los errores (residuos) y aumento en las varianzas a medida que la edad avanzaba (heteroscedasticidad). Por esta razón, se linealizaron las variables (edad y dap) en las dos condiciones de sitio (valle y loma) para satisfacer el supuesto de normalidad de los modelos de regresión. Además, se ha comprobado que los modelos que mejor explican el fenómeno del crecimiento, son de tipo no lineal<sup>141</sup>.

---

<sup>141</sup> HUGHELL, Op. cit., p.23.

**Cuadro 2.** Modelos de crecimiento de mejor ajuste con sus estadígrafos más importantes para *Cordia alliodora* en valle (v) y loma (l).

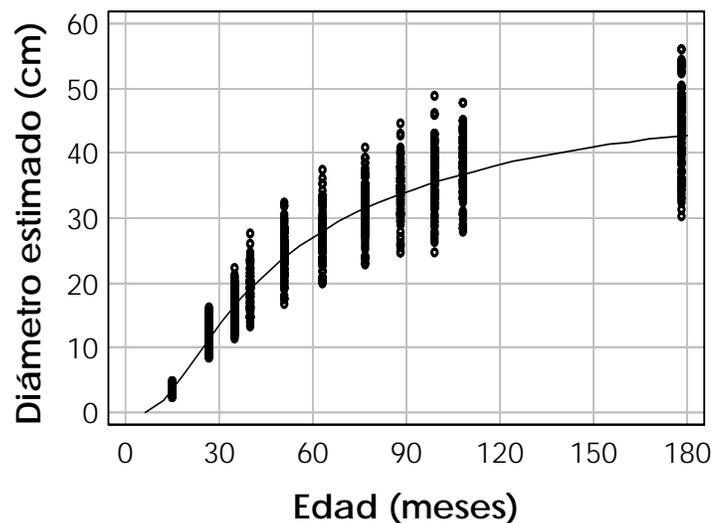
Sitio	Modelo	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	PRESS
Valle (v)	$Y = \exp(a + b/X)$	3,98806	-41,4216	94,8	0,15	23,6
Loma (l)	$Y = \exp(a + b/X)$	3,823	-37,8206	93,2	0,15	8

Y: Diámetro a la altura del pecho (dap) en cm; X: Edad en meses; a y b: coeficientes de regresión; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error.

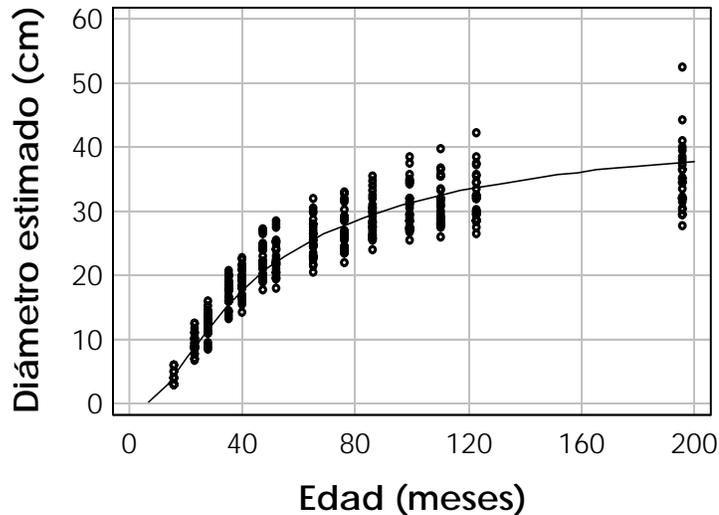
**Fuente:** Este estudio

La relación entre el crecimiento diamétrico y la edad en los dos modelos ajustados fue significativa ( $p < 0.001$ ) (Figura 1), con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que explican más del 93% de la variabilidad de los datos, después de transformarlos a escala logarítmica. Los valores de la raíz del cuadrado medio del error ( $RMSE$ ) y la suma de cuadrados del error ( $PRESS$ ) de los dos modelos, reafirma la confiabilidad de las ecuaciones para predecir el dap con un bajo error de estimación.

**Figura 1a.** Relación diámetro a la altura del pecho (dap) - edad (E) para condiciones de valle (v) en laurel (L) Modelo de la forma  $Dap_{Lv} = \exp(3.98806 - 41.4216/E)$ .



**Figura 1b.** Relación diámetro a la altura del pecho (dap) - edad (E) para condiciones de loma (l) en laurel (L). Modelo de la forma  $Dap_{Ll} = \exp(3.823 - 37.8206/E)$ .



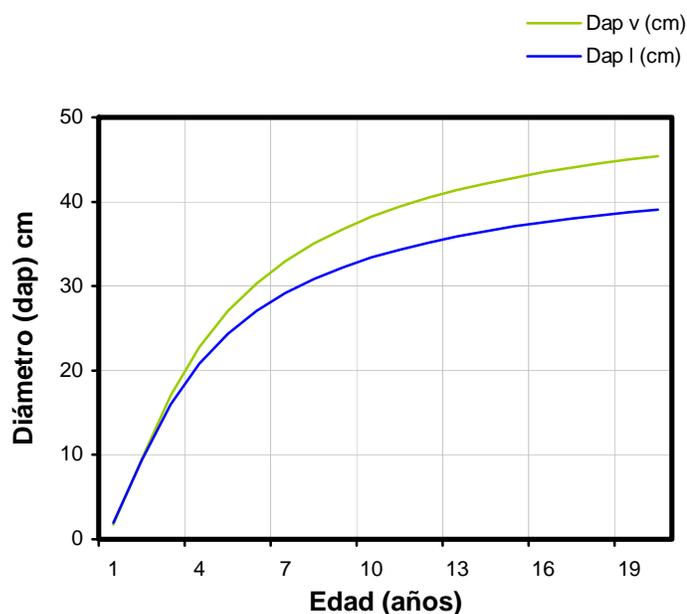
**3.1.1.2. Validación del modelo seleccionado.** La validación de los dos modelos se realizó, comparando las medias de los valores reales frente a las medias de los valores estimados, mediante una *prueba de T*. El P-valor obtenido en esta prueba para cada una de las ecuaciones resultó ser no significativo ( $P > 0.05$ ) (Anexo 4), es decir, que no se presentaron diferencias estadísticas entre las medias comparadas y que los modelos escogidos no subestiman ni sobrestiman el diámetro de estos árboles en función de la edad.

**3.1.1.3. Diámetros estimados para *Cordia alliodora* en valle y loma.** En promedio, un árbol de laurel en valle, presenta un dap de 34 cm (1.7-45.4 cm) y de 29.8 cm en loma (2-39.1 cm) en un período de 20 años. Como se observa en la Figura 2, el crecimiento diamétrico en los dos sitios, se comporta de manera muy similar durante los primeros cuatro años de edad, después del cual se evidencia un mayor crecimiento en los árboles del valle (Charagre).

Sin embargo, al realizar una prueba de comparación de medias entre los diámetros estimados en valle (v) y loma (l), no se encontraron diferencias significativas al 95% de confianza ( $P > 0.05$ ). Esto indica que las diferencias entre las condiciones físicas del suelo (drenaje imperfecto a moderado en valle y pobre en loma) y las densidades de siembra a las cuales fueron sembrados los árboles (12x12 m en valle y 6x6 m en loma), no influyen de manera negativa en el crecimiento de esta especie.

Estudios realizados por Valdivieso<sup>142</sup>, Suárez<sup>143</sup> y CONIF<sup>144</sup>, demuestran que el crecimiento del laurel es superior en sistemas agroforestales respecto a plantaciones puras, así como cuando se encuentra sembrado a bajas densidades. Este hecho se explica porque los árboles al encontrarse asociados con cultivos como café y cacao, se benefician de la fertilización, disponibilidad de agua y manejo del cultivo. Además, se disminuye la competencia por luz, agua y nutrientes del suelo al reducir el número de árboles por unidad de área, lo cual favorece su crecimiento.

**Figura 2.** Crecimiento estimado del diámetro a la altura del pecho (dap) en condiciones de valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.



<sup>142</sup> VALDIVIESO, Op. Cit., p.70.

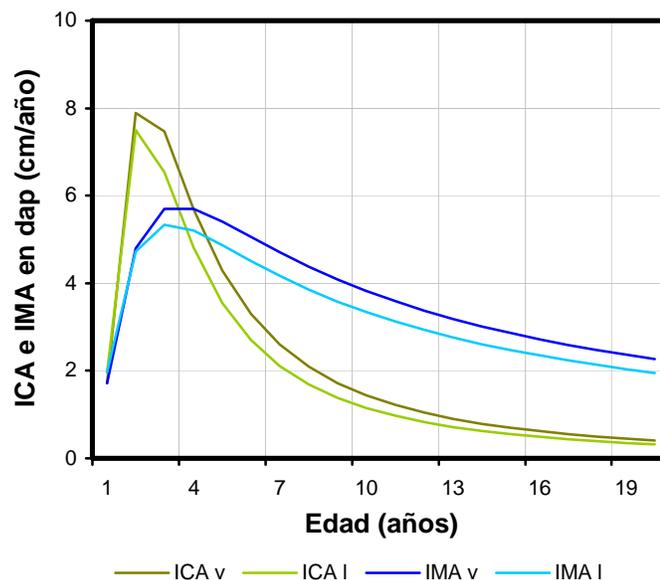
<sup>143</sup> SUÁREZ A. Aprovechamiento sostenible de madera de *Cordia alliodora* y *Cedrella odorata* de regeneración natural en cacaotales y bananales de indígenas de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 2001. 74 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). CATIE.

<sup>144</sup> CORPORACION NACIONAL DE INVESTIGACION Y FOMENTO FORESTAL CONIF. Resumen de investigaciones sobre la especie *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. "Laurel actualización de las investigaciones de CONIF. Colombia, 1983. 17 p. (CONIF Informa no. 2).

En general, los diámetros estimados en este estudio fueron mayores a los estimados por Somarriba, Beer<sup>145</sup>, Aristizabal y Guerra<sup>146</sup>, quienes a la edad de 15 años y en sistemas agroforestales similares o iguales como es el segundo caso, reportaron diámetros de 31.76 y 36.55 cm, respectivamente.

**3.1.1.4. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) del diámetro (dap) en valle (v) y loma (l).** En el Anexo 5 se presentan los datos de dap, incremento corriente (ICA) y medio anual (IMA) en laurel, para las condiciones de donde fueron tomados los datos. Estos últimos fueron calculados a partir de los datos diamétricos estimados con la ecuación de crecimiento.

**Figura 3.** Incremento Corriente Anual (ICA) y Medio Anual (IMA) del dap en condiciones de valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.



Como se observa en la Figura 3, los máximos ICA en diámetro para valle y loma, se presentan al segundo año de edad (7.9 y 7.5 cm año<sup>-1</sup>), en tanto que los máximos IMA se presentan al tercer y cuarto año en valle (5.7 cm año<sup>-1</sup>) y al tercer año en loma (5.3 cm año<sup>-1</sup>).

<sup>145</sup> SOMARRIBA, y BEER, Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Op. Cit., p. 116.

<sup>146</sup> ARISTIZABAL, Javier y GUERRA, Andrés. Estimación de la tasa de fijación de Carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero *Cordia alliodora* - cacao *Theobroma cacao* L -plátano *Musa paradisiaca*. Bogotá, 2002, 108 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital.

En promedio, un árbol de laurel crece 2.3 cm año<sup>-1</sup> en valle y 2 cm año<sup>-1</sup> en loma en un período de 20 años, alcanzando sus máximos incrementos en diámetro a los cuatro años de edad en los dos sitios, a partir del cual el crecimiento en diámetro decrece visiblemente hasta el año 20.

Valdivieso<sup>147</sup>, reportó para esta especie, máximos valores de *ICA* a los dos y tres años de edad y máximos valores de *IMA* a los dos y cuatro años en las mismas zonas. Mientras tanto, en Talamanca, Costa Rica, Suárez<sup>148</sup> reportó máximos valores promedios de *ICA* de laurel en regeneración de 2.9 cm año<sup>-1</sup> a los cinco años en valle y de 2.2 cm año<sup>-1</sup> a los siete años de edad en loma y máximos *IMA* en valle de 2.76 cm año<sup>-1</sup> a los 9 años, y de 2.02 cm año<sup>-1</sup> en loma a los 13 años.

Estos valores son menores a los estimados en este estudio, debido a que las especies forestales tienden a desplegar tasas de crecimiento superiores cuando se encuentran manejadas en plantaciones con respecto a las tasa encontradas en procesos sucesionales naturales<sup>149</sup>.

Para optimizar el crecimiento del laurel, Valdivieso<sup>150</sup> recomienda realizar un raleo entre el máximo *ICA* y el máximo *IMA* en diámetro, teniendo en cuenta otros factores como la densidad de siembra. Entre tanto, Louman, Valerio y Jiménez<sup>151</sup>, plantean que el turno de aprovechamiento ideal, debe coincidir con el momento en el cual el valor del *ICA* comienza a ser menor que el del *IMA*. Esto podría no coincidir con los resultados de este estudio, ya que al cuarto año de edad, la plantación aún se considera joven y no ha alcanzado los diámetros mínimos de corta recomendados<sup>152-153</sup>.

**3.1.2 Modelo de crecimiento en diámetro a 30cm del suelo (Diám 30cm) para *Theobroma cacao*.** En el desarrollo del modelo de crecimiento en diámetro para cacao, inicialmente se utilizó la información de 1932 árboles de cacao (15521 datos) pertenecientes a los ensayos del *Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ* y

---

<sup>147</sup> VALDIVIESO, Op. Cit., 70 p.

<sup>148</sup> SUÁREZ, Op. Cit., 74 p.

<sup>149</sup> DEL VALLE, MORENO y ORREGO, Op. Cit., p.100.

<sup>150</sup> VALDIVIESO, Op. Cit., p.32.

<sup>151</sup> LOUMAN, VALERIO y JIMÉNEZ, Op. Cit., p.71.

<sup>152</sup> VALDIVIESO, Op. Cit., 70 p.

<sup>153</sup> SUÁREZ, Op. Cit., p.41.

“*Moniliasis resistant hybrid experiment at La Lola farm*”\*. El ajuste del modelo final se realizó con 15280 datos después de su depuración.

El rango de distribución diamétrica de los cacaoteros fue de 0.9 a 23.6 cm con un promedio de 7.72 cm, medidos durante un período de aprox. 16 años (10-190 meses de edad). La edad de cada árbol incluyó el tiempo al que las plántulas fueron llevadas a campo (4 meses).

El análisis descriptivo de la variable Diám 30cm, mostró que los datos tienen un amplio rango de distribución (CV% 41.91), y su dispersión frente a la media es baja (S 3.23).

**3.1.2.1. Modelo de predicción.** Después de probar varios modelos de regresión, se consideró que el modelo que mejor predijo el crecimiento diamétrico en cacao fue de tipo potencial (Cuadro 3), en el cual la variable dependiente (*y*) es el diámetro y la variable independiente (*x*) es la edad. De acuerdo al análisis de varianza, los modelos con sus coeficientes de regresión, resultaron altamente significativos al 99% de confianza ( $P < 0.01$ ).

**Cuadro 3.** Ecuación de regresión para estimar diámetro (Diám 30cm) en función de la edad para *Theobroma cacao*, con sus estadígrafos más importantes.

Modelo	a	b	$R^2$	RMSE	PRESS
$Y = a \cdot X^b$	0,371689	0,757871	74,9	0,29	1267,81

Y: Diámetro a 30 cm del suelo (Diam 30cm) en cm; X: Edad en meses; a y b: coeficientes de regresión; RMSE: raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

**Fuente:** Este estudio

La relación entre el crecimiento diamétrico y la edad del modelo ajustado fue significativa ( $p < 0.01$ ), con  $R^2$  que explica hasta un 74.9% de la variabilidad de los datos. Los valores de RMSE (0,29) y PRESS (1267,81), demostraron bajos errores de estimación con respecto a otros modelos ajustados.

Entre los modelos probados para predecir el crecimiento diamétrico en cacao, estuvo el propuesto por Aristizabal y Guerra<sup>154</sup> para clones de la casa Luker (Caldas, Colombia), pero en el momento de su validación, se encontró diferencias

<sup>154</sup> ARISTIZABAL y GUERRA, Op. Cit., 108 p.

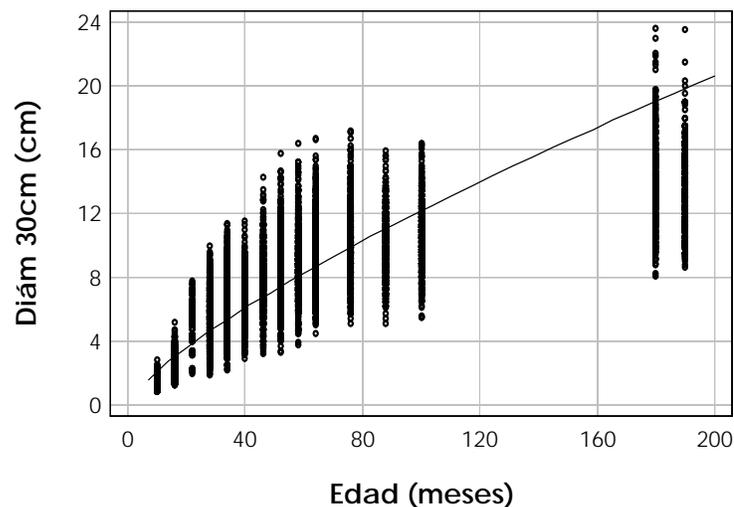
\* Base de datos facilitada por Wilbert Phillips, Ph D. Jefe del Programa de Mejoramiento Genético de Cacao. Costa Rica, CATIE, 2005.

significativas entre los valores reales y los predichos ( $P < 0.05$ ). Por esta razón, el modelo se descartó.

Al graficar los residuales estudentizados, se comprobó que el modelo escogido no presentaba heteroscedasticidad y que la tendencia de los residuos, de acuerdo al histograma de frecuencias, era normal.

La Figura 4 muestra la línea de ajuste del modelo alométrico escogido. Se observa que los datos están distribuidos uniformemente alrededor de la línea guía. El P-valor del análisis de varianza fue menor a 0.01, lo que indica una relación altamente significativa entre las variables dap y edad al 99% de confianza.

**Figura 4.** Relación entre el diámetro (Diám 30cm) y la edad (E) para la especie *Theobroma cacao*. Modelo de la forma  **$Diám\ 30cm = 0.371689 * E^{0.757871}$**



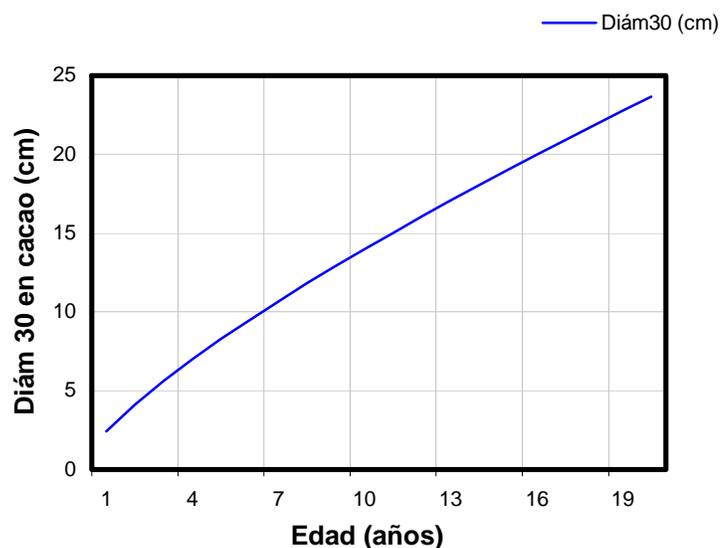
**3.1.2.2. Validación del modelo seleccionado.** Al igual que los modelos de crecimiento de laurel, esta ecuación fue validada mediante una *prueba de T*, encontrándose que no existían diferencias significativas entre las medias de los valores observados y los predichos a un nivel de confianza del 95% (Anexo 6).

**3.1.2.3. Diámetros estimados para *Theobroma cacao*.** En promedio, un árbol de cacao podría presentar un Diám 30cm de 14.04 cm (2.44-23.66 cm) en un período de 20 años (Figura 5), manteniendo un crecimiento constante durante todo su ciclo productivo.

Somarriba *et al*<sup>155-156</sup> reportó diámetros promedios a 30 cm del suelo para híbridos, de 9.6 cm en condiciones de valle y de 8cm en condiciones de loma, a la edad de cuatro años, es decir, 1.8 cm promedio más que los estimados en este estudio (7 cm) a esta misma edad.

Otro estudio realizado en la Casa Luker (Caldas-Colombia) con clones de cacao<sup>157</sup>, reportó un diámetro promedio de 12.34 cm a la edad de 13 años, es decir, 4.76 cm menos que el estimado en este estudio a la misma edad, lo que podría deberse al material genético utilizado en cada sitio (clones e híbridos). Este aspecto debería tenerse en cuenta al momento de aplicar el modelo.

**Figura 5.** Crecimiento estimado del Diám 30cm para *Theobroma cacao*.



**3.1.2.4. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro.** En el Anexo 7 se presentan los datos de crecimiento en Diám 30cm, ICA e IMA, para las condiciones de los sitios donde se tomaron los datos. Su comportamiento se puede observar en la Figura 6.

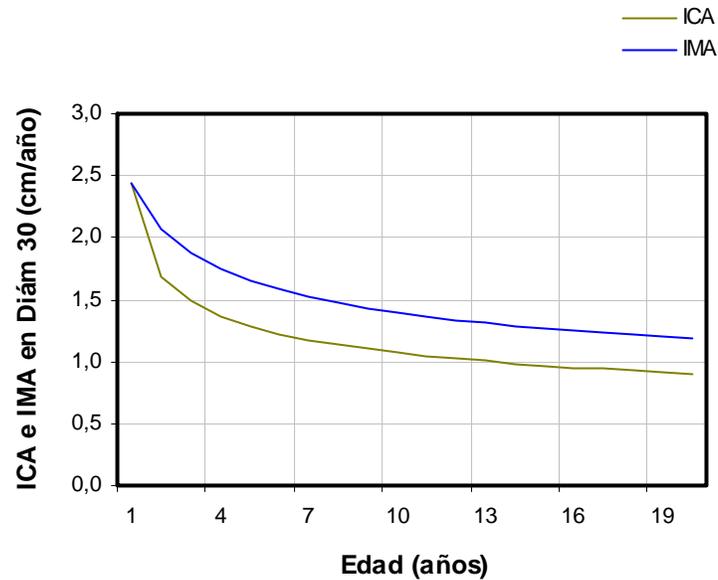
---

<sup>155</sup> SOMARRIBA, E. *et al*. Cacao bajo sombra de leguminosas en Talamanca, Costa Rica. Manejo, fenología, sombra y producción de cacao. Turrialba: CATIE, 1997. 51 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 289).

<sup>156</sup> SOMARRIBA, DOMÍNGUEZ y LUCAS. Cacao bajo sombra de maderables en Ojo de Agua, Changuinola, Panamá: manejo, crecimiento y producción de cacao y madera. Op. Cit., p. 22.

<sup>157</sup> ARISTIZABAL y GUERRA, Op. Cit., 108 p.

**Figura 6.** Incremento Corriente (*ICA*) y Medio Anual (*IMA*) del Diám 30cm para *Theobroma cacao*.



En promedio, un árbol de cacao crece en diámetro  $1.18 \text{ cm año}^{-1}$  en un período de 20 años, alcanzando en el primer año su máximo incremento. Respecto al *ICA*, se observó que la tasa más alta se presenta en el primer año ( $2.44 \text{ cm año}^{-1}$ ), a partir del cual comienza a decrecer hasta  $0.9 \text{ cm año}^{-1}$  en el último año, indicando que el crecimiento en diámetro continua, pero a tasas decrecientes.

Estos valores nos demuestran, que las tasas de crecimiento diamétrico en cacao disminuye a medida que la edad de la plantación aumenta, presentando los mayores incrementos a edades tempranas (<5 años).

El valor del *ICA* comienza a ser menor con respecto al *IMA*, a partir del segundo año, indicando que el cacaotal alcanza su madurez a los dos años de edad, hecho que no coincide con lo afirmado por Somarriba *et al*<sup>158</sup>, quien señala que el cacao alcanza su estado adulto a partir de los cinco años de edad.

---

<sup>158</sup> SOMARRIBA E.; BEER J. y BONNEMANN, A. Árboles leguminosos y maderables como sombra para cacao. El concepto. Turrialba: Proyecto agroforestal CATIE/GTZ, 1996. 51 p.

## 3.2 MODELOS DE BIOMASA

**3.2.1 Modelos de biomasa aérea para *Cordia alliodora*.** En la construcción del modelo de biomasa aérea para esta especie, se utilizó la información de 238 árboles, de los cuales 34 fueron muestreados en la Reserva Indígena de Talamanca (Costa Rica) por el Proyecto Captura de Carbono y 204 árboles pertenecen a la base de datos de Somarriba, Beer<sup>159</sup> y Ryan<sup>160</sup>. Estos árboles presentaron en promedio un dap de 44.2 cm (3.9 – 102 cm) y una biomasa aérea total de 1031 kg ( $\pm$  833.6 kg).

La biomasa aérea no calculada de los 204 árboles, se estimó mediante el factor de expansión de biomasa (FEB relación entre biomasa total arriba del suelo y biomasa del fuste) calculado en los 34 árboles muestreados. El FEB promedio de estos árboles cortados fue de 1.25<sup>161</sup>.

Los modelos de mejor ajuste fueron de tipo logarítmico, utilizando como variables predictoras el dap y altura total (ht). Para efectos de este estudio, se utilizó la ecuación con la variable independiente dap (Ecuación 1) por ser una variable más precisa y de fácil obtención. Los valores promedio de gravedad específica y fracción de Carbono para laurel fueron de 0.45g cm<sup>-3</sup> y 46.4%, respectivamente<sup>162</sup>.

$$\mathbf{Bat = 10^{(-0,51 + 2,08*LOG(dap))}} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

**Bat:** Biomasa aérea total en kg

**LOG:** Logaritmo en base 10

**Dap:** Diámetro a la altura del pecho en cm

---

<sup>159</sup> SOMARRIBA, Eduardo y BEER, Jhon. S.t. 1989. Citado por: SEGURA, Milena. Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 10.

<sup>160</sup> RYAN, Diarmaid. S.t. 2002. Citado por: SEGURA, Milena. Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 10.

<sup>161</sup> SEGURA, Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 10.

<sup>162</sup> Ibid., p. 10.

**3.2.2 Modelo de Biomasa total (Bt) para *Cordia alliodora*.** En base al anterior modelo para predecir biomasa aérea en función del diámetro (Ecuación 1), se desarrollaron los modelos de biomasa total en función de la edad para dos condiciones de sitio: valle y loma.

Los datos con los cuales se ajustó el modelo para valle (1101 datos), presentaron una biomasa promedio de 399.5 kg (2.2 a 1516.8 kg) que van desde los 15 a los 178 meses, mientras que los datos utilizados en el ajuste del modelo para loma (356 datos), presentaron una biomasa promedio de 282.23 kg (3.43 a 1316.1 kg) que van del mes 16 al 196.

Los modelos de mejor ajuste fueron de tipo exponencial (Cuadro 4) que explicaron más del 93% de la variabilidad de la biomasa y los valores de *RMSE* y *SSE* indicaron bajos errores de estimación. Al realizar la validación de los modelos mediante una *prueba de T*, se encontró que no existían diferencias significativas entre los datos observados y los estimados por el modelo al 95% de confianza (Anexo 8).

**Cuadro 4.** Modelos alométricos de biomasa total (Bt) en condiciones de valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Sitio	Modelo	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	PRESS
Valle (v)	$Y = \exp(a + b/X)$	7,24309	-86,1582	94,8	0,31	101,9
Loma (l)	$Y = \exp(a + b/X)$	6,89981	-78,6705	93,2	0,31	34,6

Y: Biomasa total en kg; X: Edad en meses; a y b: coeficientes de regresión; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error.

**Fuente:** Este estudio.

Las variables edad y Bt fueron linealizadas ya que al realizar el ajuste de los modelos, se encontró problemas de normalidad de los residuos y heteroscedasticidad en las varianzas. Las líneas de ajuste de estos modelos (Figura 7), donde el P-valor del análisis de varianza fue menor a 0.01, indican una relación altamente significativa entre las variables biomasa total (Bt) y edad (E) al 99% de confianza.

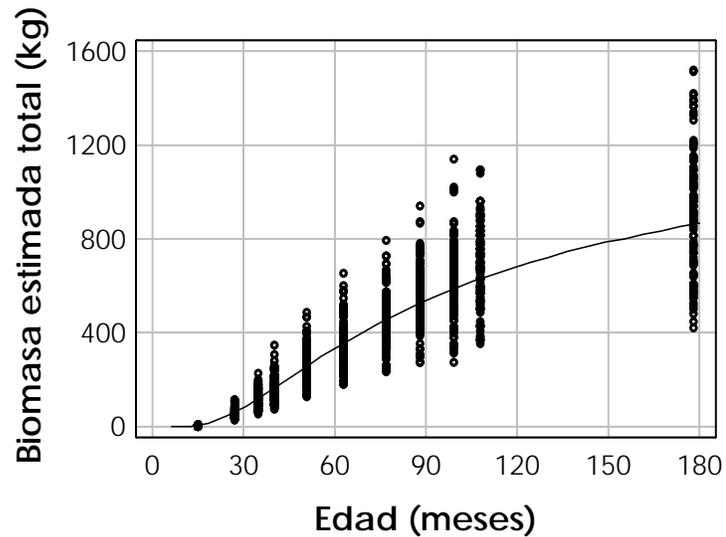
Numerosos estudios en zonas tropicales y templadas, han demostrado que la variable independiente que mejor explica la masa seca de un árbol, es el diámetro normal<sup>163-164</sup>, pero en este caso se puede observar que la edad podría ser un buen

<sup>163</sup> SEGURA, Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de Carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Op. Cit., p. 56.

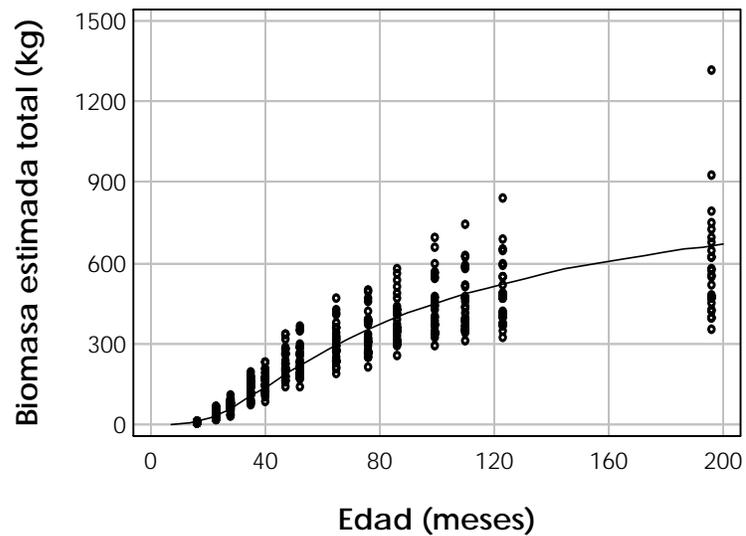
parámetro para predecir biomasa, siempre y cuando se conozca con exactitud esta variable en los árboles.

**Figura 7.** Relación a) biomasa total estimada – edad en valle, b) biomasa total estimada - edad en loma para *Cordia alliodora*.

a)



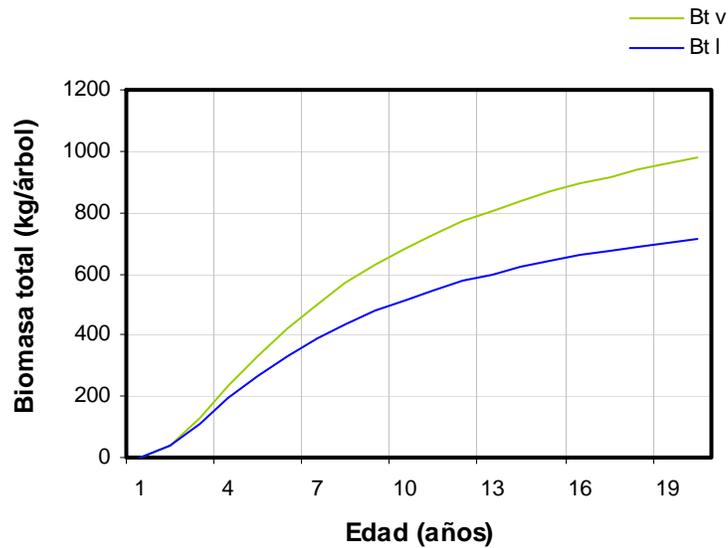
b)



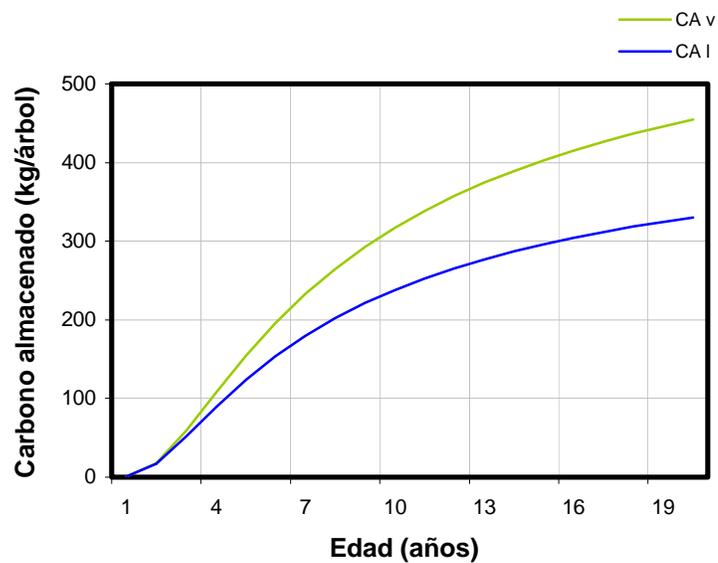
<sup>164</sup> ZAPATA, COLORADO y DEL VALLE, Op. Cit., p. 88.

**3.2.2.1. Biomasa seca total y Carbono almacenado en dos condiciones de sitio para laurel.** Se estimó que en promedio, un árbol de laurel puede tener 611.3 kg de biomasa seca total en condiciones de valle (1.1-976.6 kg) y 459.3 kg de biomasa en loma (1.4-714.8 kg) en un período de 20 años (Figura 8).

**Figura 8.** Biomasa seca total de *Cordia alliodora* en valle (v) y loma (l).



**Figura 9.** Carbono almacenado total por *Cordia alliodora* en valle (v) y loma (l).



En el caso del Carbono, se estimó que un árbol de laurel puede almacenar en promedio 283.7 kg en valle (0.5-453.2 kg), mientras que en loma un árbol de laurel puede almacenar en promedio 213.1 kg (0.7-331.7 kg) en un período de 20 años, incluyendo el Carbono de raíces (Figura 9). En el Anexo 9 se presentan los valores de biomasa total y Carbono almacenado en laurel, con sus respectivos diámetros, en un período de 20 años.

Observamos que el incremento de la biomasa y Carbono del laurel es muy similar en los primeros cuatro años en los dos sitios, pero a partir de éste año en el valle se presentan valores más altos, hecho que coincide con el comportamiento del crecimiento diamétrico de esta especie.

La cantidad de biomasa y Carbono almacenado tienden a estabilizarse a medida que la edad aumenta (aprox. desde el año 10). Esto se explica por el comportamiento típico de las especies forestales, de balancear sus tasas de crecimiento con las tasas de descomposición, a medida que alcanzan su madurez<sup>165</sup>.

A pesar que los valores de biomasa y Carbono almacenado en valle superan en 24.9% al sitio loma, no se presentaron diferencias significativas en la cantidad de biomasa total y de almacenamiento de estos árboles ( $P > 0.05$ ) bajo dos condiciones de relieve.

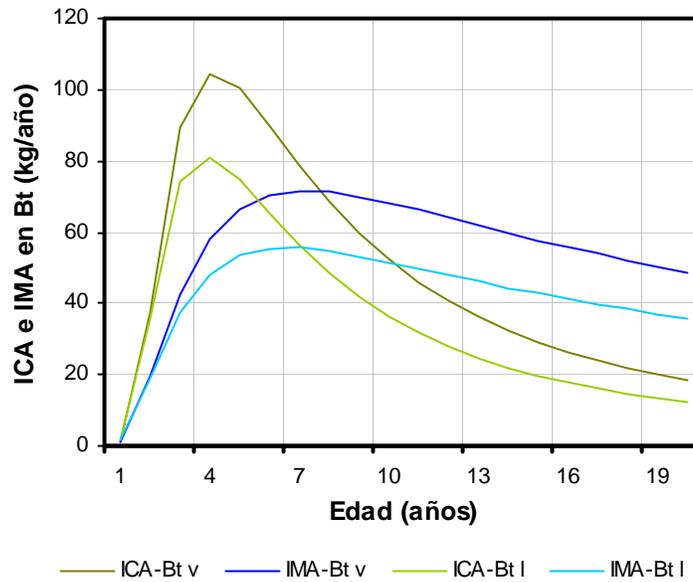
**3.2.2.2. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de biomasa y Carbono en valle (v) y loma (l).** Los mayores *ICA* en biomasa y Carbono, se presentaron a los cuatro años de edad en los dos sitios, en tanto que los mayores valores de *IMA* se presentaron a la edad de siete años (Figura 10 y 11). A partir de estas edades, los árboles continúan aumentando su contenido de biomasa y Carbono, pero a tasas decrecientes.

Un árbol de laurel incrementa su biomasa total a una tasa promedio de 48.8 kg árbol<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en valle y de 35.7 kg árbol<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en loma al cabo de 20 años. Entre tanto, la tasa de fijación de Carbono fue de 22.7 kg C árbol<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en valle y de 16.6 kg C árbol<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en loma, obteniendo entre los siete y ocho años sus máximos incrementos en los dos sitios (Anexo 10).

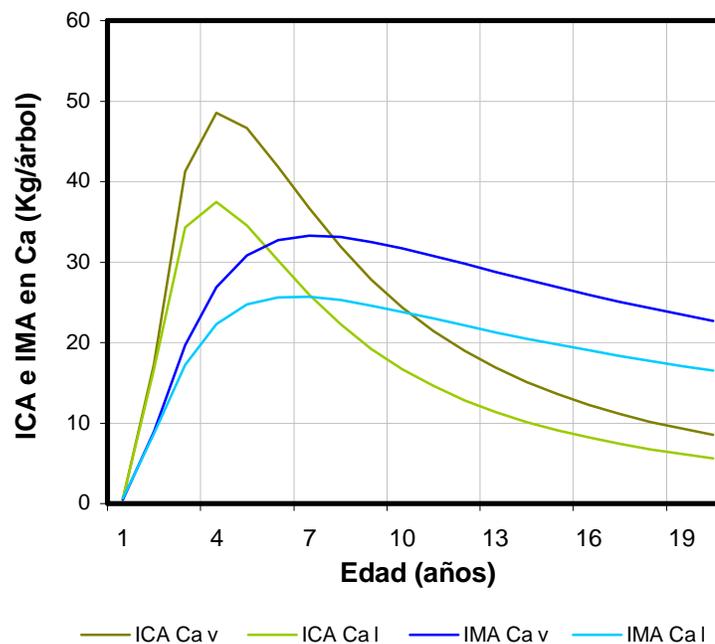
---

<sup>165</sup> CHAPMAN, Hernán y MEYER, Walter. Forest Mensuration. Estados Unidos: McGRAW-HILL Book Company, 1949. 522 p.

**Figura 10.** Incremento corriente (*ICA*) y medio anual (*IMA*) en biomasa total (*Bt*) en condiciones de valle (*v*) y loma (*l*) para *Cordia alliodora*.



**Figura 11.** Incremento corriente (*ICA*) y medio anual (*IMA*) en Carbono almacenado (*Ca*) en condiciones de valle (*v*) y loma (*l*) para *Cordia alliodora*.



**3.2.3 Modelo de biomasa aérea *Theobroma cacao*.** El desarrollo del modelo de biomasa aérea para esta especie, se realizó con un total de 74 árboles de cacao, con valores promedio de diámetro a 30cm del suelo de 12.89 cm (1.3 a 26.8 cm), distribuidos en nueve clases diamétricas de tres centímetros de amplitud (0 a 27 cm) con cuatro a 12 individuos por clase, y con valores promedio de biomasa aérea total de 32.1 kg (0.4 – 102.6 kg)<sup>166</sup>.

Los valores promedio de gravedad específica y fracción de Carbono para cacao fueron de 0.51 g cm<sup>-3</sup> y de 45.8%, respectivamente<sup>167</sup>.

Los modelos de mejor ajuste fueron de tipo logarítmico, utilizando como variables predictoras el diámetro a 30cm sobre el suelo (Diám 30cm), altura total (ht) y diámetro cuadrático medio de las ramas principales (Dg)<sup>168</sup>. Para efectos de este estudio, se utilizó las ecuaciones con la variable independiente Diám 30cm para cacao, por ser una variable más precisa y de fácil obtención (Ecuación 2).

$$Bat = 10^{(-1,625 + 2,626 * LOG(Diám30))} \quad (2)$$

Donde:

**Bat:** Biomasa aérea total en kg

**LOG:** Logaritmo en base 10

**Diám30:** Diámetro a 30cm sobre el suelo (cm)

**3.2.3.1. Modelos de biomasa total (Bt) para *Theobroma cacao*.** En base al anterior modelo para predecir biomasa aérea en función del diámetro (Ecuación 2), se desarrolló el modelo de biomasa total (incluyendo biomasa de raíces) en función de la edad para esta especie.

Los datos con los cuales se desarrolló el modelo general de biomasa total para cacao (14453 datos), presentaron una biomasa promedio de 6.7 kg (0,02-30.1 kg), que van desde los 10 hasta los 190 meses de edad. Para la selección de la ecuación se usaron los mismos parámetros estadísticos de los modelos de crecimiento (Cuadro 5).

---

<sup>166</sup> SEGURA, Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 5-8.

<sup>167</sup> Ibid., p. 5-8.

<sup>168</sup> Ibid., p. 5-8.

Al momento de probar los diferentes modelos, se encontró modelos con valores de  $R^2$  altos, pero que en el momento de su validación presentaban p valores menores a 0.05, por lo que se descartaron.

El modelo escogido fue de tipo polinomial de segundo grado, el cual presentó un análisis estadístico aceptable, representado en el satisfactorio valor del coeficiente de determinación ( $>67$ ), que aunque con errores de estimación relativamente altos ( $RMSE$  y  $PRESS$ ), no presentó diferencias significativas entre los valores observados y los predichos (Anexo 11).

**Cuadro 5.** Modelo alométrico para estimar biomasa total (Bt) en función de la edad para *Theobroma cacao*, con sus estadígrafos más importantes.

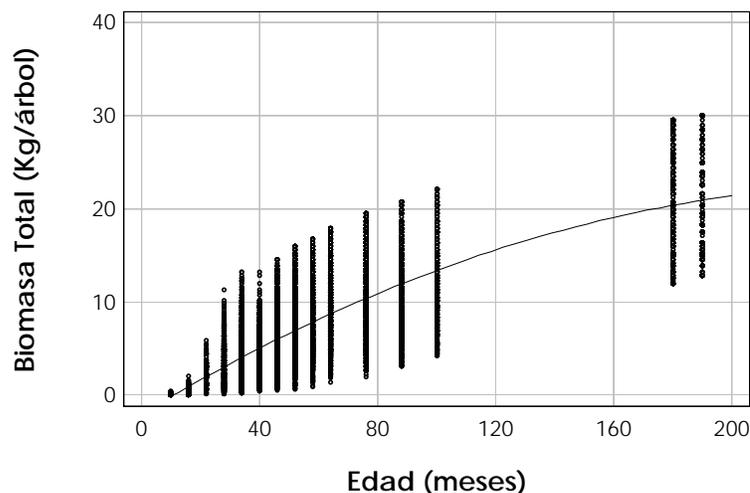
Modelo	a	b	c	$R^2$	RMSE	PRESS
$Y = a + b * X - c * X^2$	-2,01539	0,191278	0,00037085	67,8	3,05	134306

Y: Biomasa total (Bt) en kg; X: Edad en meses; a, b y c: coeficientes de regresión;  $R^2$ : Coeficiente de determinación; RMSE: raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

**Fuente:** Este estudio.

La Figura 12 muestra la línea de ajuste del modelo, donde el P-valor del análisis de varianza menor a 0.01, demostró una alta significancia entre la variable predictora (edad) y la variable predicha (biomasa total).

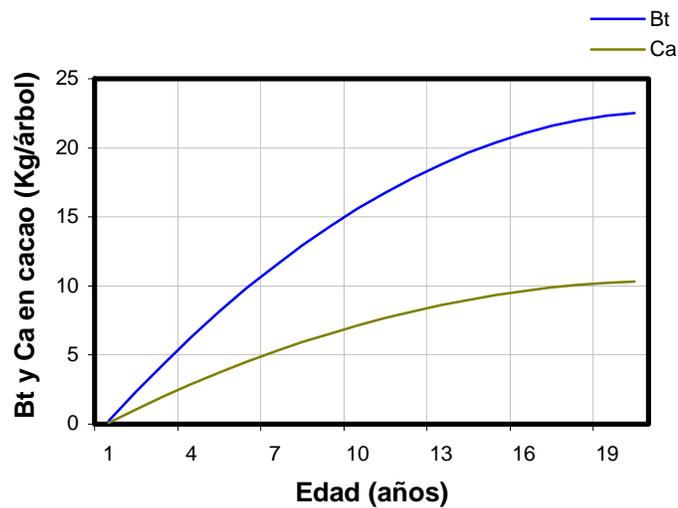
**Figura 12.** Relación biomasa total (Bt) - edad (E)  $Bt = -2,01539 + 0,191278 * E - 0,000370852 * E^2$  en *Theobroma cacao*.



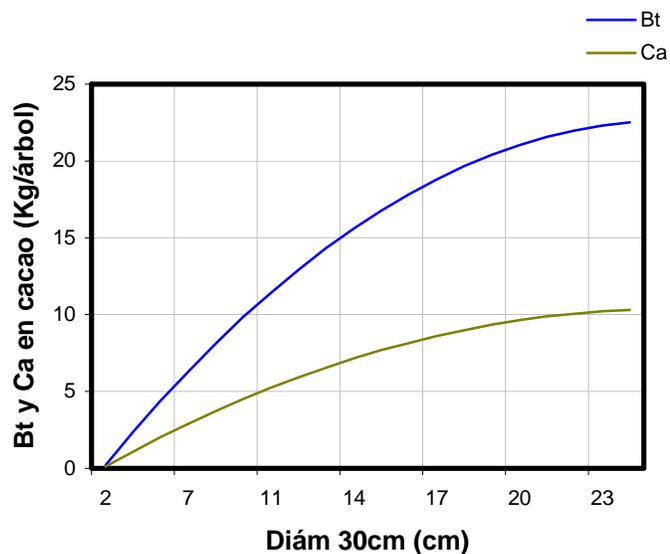
**3.2.3.2. Biomasa seca total y Carbono almacenado en *Theobroma cacao*.** Se estimó que una planta de cacao puede tener en promedio 14.42 kg de biomasa seca total, (0.23-22.53 kg), almacenando en promedio 6.61kg de Carbono (0.1-10.32 kg) en un período de 20 años. En la Figura 13 se observa que la cantidad de biomasa y Carbono tiende a estabilizarse hacia el final de su ciclo productivo, indicando que el secuestro de Carbono en esta especie es constante durante todo su desarrollo.

**Figura 13.** Biomasa total (Bt) y Carbono almacenado (Ca) en función de **a)** Edad y **b)** Diámetro a 30cm sobre el suelo para *Theobroma cacao*.

**a)**



**b)**

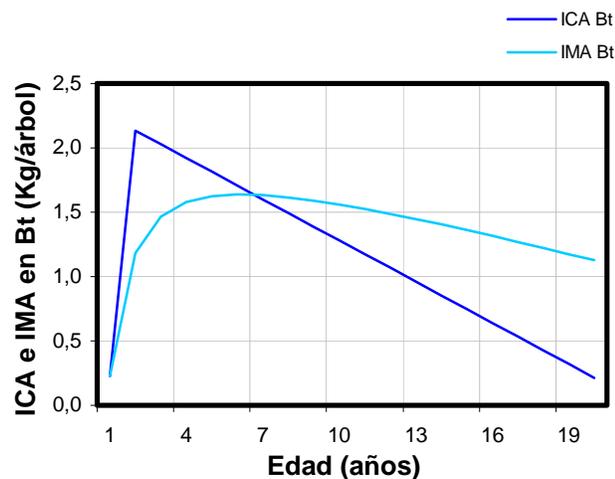


**3.2.3.3. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de biomasa y Carbono en *Theobroma cacao*.** La Figura 14 muestra que el máximo ICA en biomasa total y Carbono acumulado se presenta al segundo año (2.14 y 0.98 kg año<sup>-1</sup>, respectivamente), mientras que el máximo IMA se alcanza al sexto año (1,64 y 0.75 kg año<sup>-1</sup>, respectivamente), a partir del cual la cantidad de biomasa y Carbono decrece visiblemente hasta el año 20.

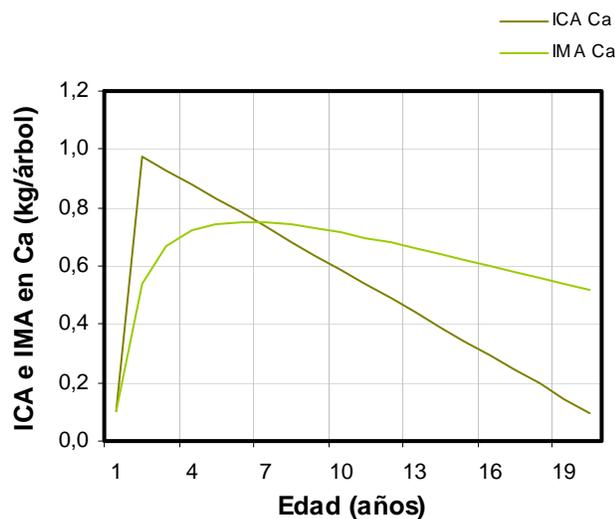
En promedio, un árbol de cacao incrementa su biomasa total y Carbono a una tasa de 1.13 kg año<sup>-1</sup> y 0.52 kg año<sup>-1</sup>, respectivamente, en un período de 20 años (Anexo 12).

**Figura 14.** Incremento corriente (ICA) y medio anual (IMA) en a) biomasa total y b) Carbono almacenado para *Theobroma cacao*.

a)



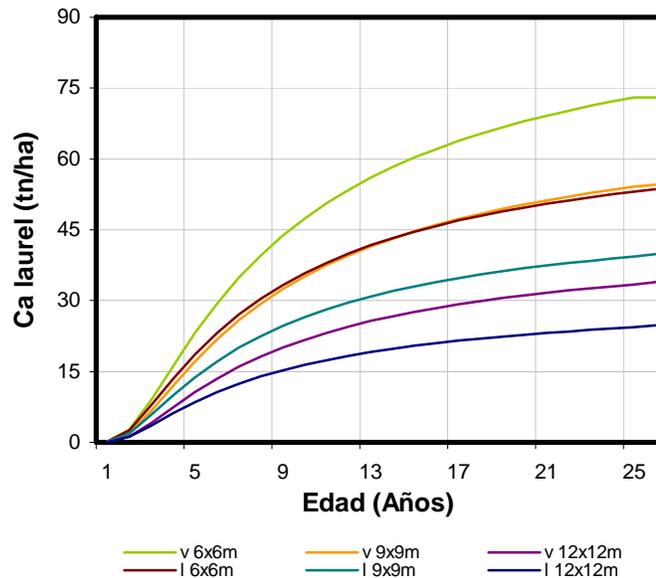
b)



### 3.3 SIMULACIÓN DEL ALMACENAMIENTO Y FIJACION DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL LAUREL *Cordia alliodora* Y CACAO *Theobroma cacao*

**3.3.1 Carbono almacenado en los componentes del SAF.** Se estimó que en promedio, la cantidad de Carbono que el componente laurel almacenó en el sistema fue de 49.2 tnC ha<sup>-1</sup> (0.07-73.03 tnC ha<sup>-1</sup>) en el primer escenario (6x6 m), de 36.48 tnC ha<sup>-1</sup> (0.05-54.6 tnC ha<sup>-1</sup>) en el segundo escenario (9x9 m) y de 22.9 tnC ha<sup>-1</sup> (0.03-33.9 tnC ha<sup>-1</sup>) en el tercer escenario (12x12 m) en el sitio valle (Figura 15, Anexo 13).

**Figura 15.** Carbono almacenado (Ca) por *Cordia alliodora* en seis escenarios de simulación en condiciones de valle (v) y loma (l).



En loma, el secuestro de Carbono de esta especie fue de 36.6 tnC ha<sup>-1</sup> (0.1-53.6 tnC ha<sup>-1</sup>) en el cuarto escenario (6x6 m), de 27.1 tnC ha<sup>-1</sup> (0.07-39.8 tnC ha<sup>-1</sup>) en el quinto escenario (9x9 m) y de 16.9 tnC ha<sup>-1</sup> (0.04-24.8 tnC ha<sup>-1</sup>) en el sexto escenario (12x12 m) (Figura 15, Anexo 13).

En el caso del cacao, el almacenamiento de Carbono en el SAF-CL fue en promedio de 6.5 tnC ha<sup>-1</sup> (0.1-9.2 tnC ha<sup>-1</sup>) en la densidad 6x6 m, de 6.8 tnC ha<sup>-1</sup> (0.1-9.6 tnC ha<sup>-1</sup>) en la densidad 9x9 m y de 7.1 tnC ha<sup>-1</sup> (0.1-10.1 tnC ha<sup>-1</sup>) en la densidad 12x12 m, en las dos condiciones de relieve.

Los valores promedio de Carbono almacenado en necromasa, suelo y vegetación herbácea de los cacaotales de la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica, bajo dos condiciones de relieve (loma y valle)<sup>169</sup>, se relacionan en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Carbono almacenado en los compartimientos necromasa, vegetación herbácea y suelo de los cacaotales en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica.

Compartimiento	*Carbono almacenado		
	loma	valle	Promedio
Vegetación herbácea y árboles con diám. < 10cm	0,6	0,7	0,65
Necromasa (hojarasca y madera caída)	9,5	8	8,75
Carbono orgánico del suelo	61,3	62	61,65

\*Valores promedio de almacenamiento de carbono en cacaotales (tn/ha)

**Fuente:** Proyecto Captura de Carbono, 2006.

**3.3.2 Carbono almacenado (Ca) y fijado (Cf) en el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL).** Después de realizar la simulación del contenido de Carbono almacenado en el SAF-CL (Anexo 14), se encontró que en valle el promedio de Ca fue de 126.4 tnC ha<sup>-1</sup> (70.9-153 tnC ha<sup>-1</sup>) en el primer escenario, de 113.98 tnC ha<sup>-1</sup> (70.9-134.9 tnC ha<sup>-1</sup>) en el segundo escenario y de 100.4 tnC ha<sup>-1</sup> (70.8-114.7 tnC ha<sup>-1</sup>) en el tercer escenario (Figura 16, Anexo 15).

En loma, la cantidad de Carbono almacenado promedio por el SAF-CL fue de 114.5 tnC ha<sup>-1</sup> (71.6-134.2 tnC ha<sup>-1</sup>) en el cuarto escenario, de 105.3 tnC ha<sup>-1</sup> (71.6-120.9 tnC ha<sup>-1</sup>) en el quinto escenario y de 95.3 tnC ha<sup>-1</sup> (71.5-106.3 tnC ha<sup>-1</sup>) en el sexto escenario, en un período de 25 años (Figura 16, Anexo 15).

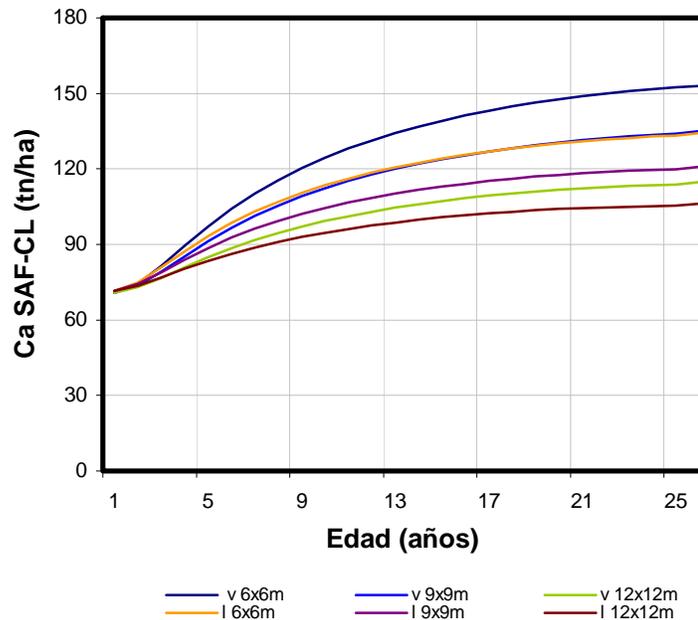
Estos valores incluyen valores promedios de Carbono almacenado en los compartimientos suelo, necromasa y vegetación herbácea facilitados por la consultoría de Segura M. Sc. del Proyecto Captura de Carbono<sup>170</sup>.

Los compartimientos que más secuestraron Carbono en el sistema fueron en su orden: el suelo (54.8% en valle y 58.3% en loma), el laurel (31.8% en valle y 25.6% en loma), la necromasa (7.04% en valle y 9.04% en loma), el cacao (6% en valle y 6.5% en loma) y la vegetación herbácea (0.6% en valle y loma).

<sup>169</sup> SEGURA, Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 5-8.

<sup>170</sup> Ibid., p. 5-8.

**Figura 16.** Carbono almacenado (Ca) en el sistema agroforestal cacao – laurel (SAF-CL) en valle (v) y loma (l).

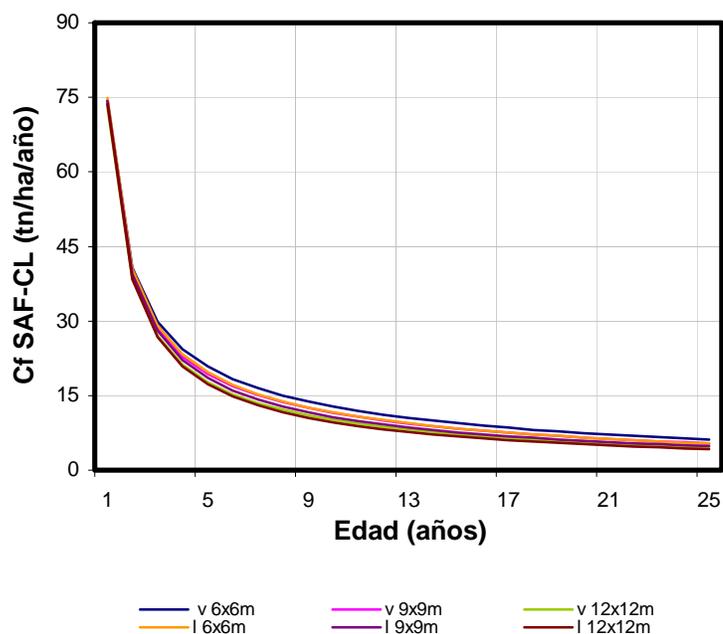


Los valores promedio de Carbono almacenado encontrados en valle, superan apenas en 7.5% al sitio loma con valores entre 5.08-11.9  $\text{tnC ha}^{-1}$  ( $8.54 \text{ tnC ha}^{-1}$ ). Por esta razón, al comparar las medias de cada uno de los escenarios (método LSD al 95% de confianza), no se encontraron diferencias significativas en el almacenamiento de Carbono entre sitios con iguales densidades de siembra, a excepción de la densidad 6x6 m, pero si entre sitios con diferentes densidades de siembra a excepción de 12x12 m valle - 9x9 m loma, 9x9 m loma - 6x6 m loma y 9x9 m valle - 6x6 m loma (Anexo 16 ).

En promedio, las tasas de fijación de Carbono del sistema son muy similares en los dos sitios, encontrándose que en valle puede fijar hasta  $5.4 \text{ tnC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $6.1-4.6 \text{ tnC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y en loma  $4.8 \text{ tnC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $5.4-4.3 \text{ tnC ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) en un período de 25 años (Anexo 15). No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las tasas de fijación de los dos sitios (valle y loma) (Anexo 17).

En la Figura 17 se observa que en todos los escenarios, las máximas tasas de fijación del sistema se presentan en los primeros ocho años, comportamiento que coincide con la edad donde se presentan los máximos incrementos en diámetro de las especies cacao y laurel. A partir de esta edad, las tasas de fijación tienden a estabilizarse.

**Figura 17.** Carbono fijado (Cf) en el sistema agroforestal cacao – laurel (SAF-CL) en valle (v) y loma (l)



**3.3.3 Comparación con otros estudios.** En la línea base del *Proyecto Captura de Carbono*<sup>171</sup>, se encontró que en promedio el almacenamiento de Carbono en sistemas agroforestales de cacao con regeneración natural de laurel en la región de Talamanca (año 2005), puede ser de 132.8 tnC ha<sup>-1</sup> en loma, cifra que coincide con lo simulado en este estudio a los 23 años (6x6 m) en este mismo relieve, y de 112.5 tnC ha<sup>-1</sup> en valle, valor que coincide con lo simulado a los seis (6x6 m), nueve (9x9 m) y 20 años (12x12 m) en estas mismas condiciones de relieve (...ver Anexo 15...).

En Caldas, Colombia<sup>172</sup>, se estimó el almacenamiento de Carbono en un sistema agroforestal laurel – cacao en un período de 15 años, encontrándose valores de 64.54 tnC ha<sup>-1</sup>, y una tasa de fijación de 4.30 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (...ver Anexo 15...). Estos resultados se asemejarían a los encontrados en este estudio, si no se tuvieran en cuenta los compartimientos necromasa, vegetación herbácea y suelo.

<sup>171</sup> SEGURA, Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Op. Cit., p. 23.

<sup>172</sup> ARISTIZABAL y GUERRA, Op. Cit. p. 78.

Además, estimaron que el laurel aporta 49.43 tnC ha<sup>-1</sup> de Carbono al sistema a los 15 años de edad, lo que representaría una tasa de fijación de 3.3 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Estos valores se asemejan a los reportados en este estudio (Anexo 13) bajo distancias de siembra de 9x9 m en valle (112 árboles ha<sup>-1</sup>) y 6x6 m en loma (150 árboles ha<sup>-1</sup>) a esta misma edad, valores que se deben tener en cuenta ya que la densidad de siembra considerada en esta simulación, es menor a la reportada en Colombia por Aristizabal y Guerra<sup>173</sup> (200 árboles ha<sup>-1</sup>).

En el caso del cacao, los mismos autores estimaron que a los 15 años de edad, esta especie aporta hasta 15.1 tnC ha<sup>-1</sup> al sistema, con una tasa de fijación de 1 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, valores que superan a los estimados en este estudio (9.5 tnC ha<sup>-1</sup> y una tasa de fijación de 0.7 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) debido a la diferencia en el número de árboles de cacao simulados en cada investigación.

Otros estudios realizados en Costa Rica<sup>174-175</sup>, donde se evaluó la captura de Carbono en sistemas silvopastoriles y agroforestales con café y cacao a 20 y dos años de edad, respectivamente, determinaron que especies como *Eucalyptus deglupta*, *Acacia mangium* e *Inga densiflora*, pueden fijar entre 1.2 y 1.8 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a altas densidades de siembra (370-400 árboles ha<sup>-1</sup>) lo que ubica al laurel como una de las especies con mayor capacidad de fijar Carbono durante todo su ciclo productivo, aún cuando se establezca a bajas densidades de siembra.

Avila<sup>176</sup> reporta contenidos de Carbono en SAF con café *Coffea arabica* y eucalipto *Eucalyptus deglupta* de 151.7 y 195 tnC ha<sup>-1</sup> a los cuatro y más de 10 años de edad, respectivamente, valores que superan a los reportados en este estudio, debido al alto contenido de Carbono orgánico del suelo estimado por esta autora (139.1 a 184.4 tnC ha<sup>-1</sup>) en comparación al utilizado en esta simulación (61.3-62 tnC ha<sup>-1</sup>).

Este comportamiento nos lleva a afirmar que los suelos de los sistemas agroforestales con cacao y laurel de la Reserva Indígena de Talamanca (Costa Rica), almacenan muy bajos contenidos de Carbono orgánico en comparación a los encontrados en sistemas agroforestales con café y eucalipto (108.6-184.4 tnC

---

<sup>173</sup> ARISTIZABAL y GUERRA, Op. Cit. p.99.

<sup>174</sup> KURSTEN, E. Y BRUSCHEL, P. CO<sub>2</sub> mitigation by agroforestry. En: Water, air and soil. Pollution, no. 70, 1993; 533-544. Citado por: ÁVILA VARGAS, Gabriela, Op. cit., p.52.

<sup>175</sup> ANDRADE, Hernán. Dinámica productiva del sistema silvopastoril con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Turrialba, 1999. 83 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

<sup>176</sup> ÁVILA VARGAS, Gabriela, Op. cit., p.42.

ha<sup>-1</sup>)<sup>177</sup>, silvopastoriles con laurel (180-200 tnC ha<sup>-1</sup>) y en potreros con pasto guinea (233 tnC ha<sup>-1</sup>), en este mismo país<sup>178</sup>.

Debido a que no se encontraron diferencias significativas de almacenamiento entre sitios bajo iguales densidades de siembra, podemos afirmar que la capacidad de secuestrar Carbono en el sistema agroforestal cacao-laurel, se ve poco influenciado por condiciones específicas de sitio como relieve y que quizás factores como densidad de siembra y características genéticas propias de cada especie tengan más relación con este componente.

---

<sup>177</sup> ÁVILA VARGAS, Gabriela, Op. cit., p.42.

<sup>178</sup> LÓPEZ, A. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de Carbono en el suelo. Turrialba, 1998. 50 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

#### 4. CONCLUSIONES

Los modelos que mejor estimaron el diámetro (dap) a partir de la edad (E) en la especie *Cordia alliodora* (laurel) fueron de tipo exponencial, los cuales presentaron altos coeficientes de determinación (>93%) y bajos errores de estimación, después de transformar las variables a escala logarítmica. Así entonces, el modelo escogido para estimar dap en valle fue de la forma  $Dap = \exp(3.98806 - 41.4216/E)$ , mientras que el modelo seleccionado para predecir dap en loma fue de la forma  $Dap = \exp(3.823 - 37.8206/E)$ .

No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre el crecimiento en dap estimado en los árboles establecidos en condiciones de valle y árboles establecidos en loma ( $P > 0.05$ ), encontrándose un dap promedio de 34 cm y de 29.8 cm en valle y loma, respectivamente, en un período de 20 años.

El modelo que mejor predijo el crecimiento diamétrico a partir de la edad (E) en *Theobroma cacao* fue de la forma potencial  $Diám\ 30cm = 0.371689 * E^{0.757871}$ , el cual explicó más del 74% de la variabilidad de los datos y se presentaron bajos errores de estimación con respecto a otros modelos probados. El  $R^2$  de este modelo se considera alto si tiene en cuenta el número de datos con los cuales fue ajustado (más de 15000 datos).

Se encontraron diferencias estadísticas significativas al comparar los diámetros estimados en este estudio para híbridos de cacao, con respecto a los diámetros estimados en clones de cacao de la casa Luker, Caldas, Colombia, aspecto a tener en cuenta en el momento de aplicar el modelo.

En laurel, los modelos que mejor ajustaron la relación entre biomasa total (Bt) y edad (E) fueron de la forma  $Bt = \exp(7.24309 - 86.1582/E)$  en valle y de la forma  $Bt = \exp(6.89981 - 78.6705/E)$  en loma, los cuales presentaron altos coeficientes de determinación y bajos errores de estimación.

En cacao, el modelo para estimar Bt en función de la edad (E) que mejor ajustó los datos, fue de tipo polinomial de segundo grado ( $Bt = -2,01539 + 0,191278 * E - 0,000370852 * E^2$ ) el cual presentó un análisis estadístico aceptable, con alto valor de  $R^2$ , pero con valores de RMSE y PRESS relativamente altos que podrían ocasionar errores en el momento de estimar diámetros a edades superiores (>20 años).

Es posible realizar predicciones de crecimiento diamétrico y biomasa total a partir de la edad, con alto grado de precisión, altos coeficientes de determinación y bajos errores de estimación, siempre y cuando se conozca con exactitud esta variable en los árboles.

La cantidad promedio de Carbono que un sistema agroforestal con cacao y laurel (SAF-CL) puede almacenar bajo la densidad 6x6 m fue de 126.4 tnC ha<sup>-1</sup> en valle y de 114.5 tnC ha<sup>-1</sup> en condiciones de loma. Bajo las densidades 9x9 m y 12x12 m, los promedios de Carbono almacenado fueron de 109.7 y 97.9 tnC ha<sup>-1</sup>, respectivamente, en un período de 25 años. Cabe aclarar que estos últimos valores se calcularon como un promedio entre iguales densidades de siembra bajo los dos tipos de relieve, debido a que no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sus medias.

El almacenamiento de Carbono encontrado en sistemas agroforestales con cacao y laurel de la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica (Proyecto Captura de Carbono), coinciden con el simulado en este estudio y se podría afirmar que estos sistemas en el momento del muestreo tenían entre seis y 23 años de edad.

El Carbono promedio que el cacao almacena dentro del SAF-CL, es bajo (6.25%) con respecto a otros compartimientos como suelo (56.6%), laurel (28.7%) y necromasa (8.04%), en tanto que la especie laurel puede almacenar mayor cantidad de Carbono en relación a los demás compartimientos, a excepción del suelo. La cantidad de Carbono almacenada en la vegetación herbácea es poco representativa dentro del SAF-CL, por lo que podría omitirse en un proyecto de este tipo.

En promedio, la tasa de fijación de Carbono del SAF-CL en la Reserva Indígena de Talamanca, fue de 5.1 tnC ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en un período de 25 años, alcanzando las máximas tasas en los primeros ocho años de edad, comportamiento que coincide con los mayores incrementos en diámetro de las especies cacao y laurel.

No se encontraron diferencias significativas de almacenamiento de Carbono entre sitios con iguales densidades de siembra, a excepción de la densidad 6x6 m, pero si entre sitios con diferentes densidades de siembra a excepción de 12x12 m valle - 9x9 m loma, 9x9 m loma - 6x6 m loma y 9x9 m valle - 6x6 m (P<0.05). En el caso del Carbono fijado, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre sitios ni tampoco entre densidades de siembra (P>0.05).

Los valores de Carbono acumulado por el SAF-CL se ven poco influenciados por las condiciones de relieve donde se evaluaron. Por lo tanto, factores como densidad de siembra y genética de cada especie, podrían afectar más el comportamiento de este componente.

Los sistemas agroforestales con cacao y laurel en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica, tienen una alta capacidad de almacenamiento y fijación de Carbono y pueden constituirse en un importante mecanismo que permita a los pequeños productores de esta zona, acceder a un pago por servicios ambientales bajo este tipo de uso del suelo.

## 5. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar investigaciones enfocadas a evaluar aspectos económicos del sistema agroforestal cacao *Theobroma cacao* y laurel *Cordia alliodora* (SAF – CL), con el fin de determinar con mayor precisión el monto a ser reconocido a los productores como pago por servicios ambientales de los sistemas agroforestales.

Incentivar el desarrollo de estudios que permitan identificar el potencial de fijación de Carbono en los sistemas agroforestales más importantes del país y de esta manera generar bases para futuras negociaciones por pago de servicios ambientales.

Es preciso realizar estudios encaminados a determinar con mayor exactitud, el porcentaje de biomasa de raíces que aporta el cacao y laurel a la biomasa total de cada una de estas especies.

Se recomienda utilizar los modelos diseñados en esta investigación para el sistema agroforestal evaluado y bajo condiciones agroecológicas similares a la de zona de estudio. Sin embargo, estos modelos pueden constituirse en un punto de referencia para estimar crecimiento y biomasa total en otros sitios donde se implemente este sistema, siempre y cuando se acompañen con estudios de biomasa en campo para garantizar su veracidad.

Promover el establecimiento del sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL), como fuente de recursos financieros, instrumento para mitigar el calentamiento global y como una opción que garantiza la seguridad alimentaria al permitir el asocio con otras especies agrícolas.

Lograr equilibrar la producción de madera y cacao con la captura de Carbono, de tal manera que la calidad y cantidad de los productos no se vea influenciada negativamente por las altas densidades de siembra. En este sentido, una distancia de siembra de 6x6 m para laurel en el SAF-CL podría ser óptima en la captura de Carbono si se ve acompañada de prácticas silviculturales adecuadas que no afecten el desarrollo y producción del componente agrícola.

Planificar una estrategia productiva sostenible que permita a los pequeños productores de la Reserva Indígena de Talamanca acceder a un pago por servicios ambientales por la conservación y establecimiento de sistemas agroforestales.

## BIBLIOGRAFIA

ALEGRE, J. y RICSE, A. Reservas de Carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía peruana. [en línea]. s.f. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/vbconfe7.htm>

ALTIERI, Miguel. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: Nordan-Comunidad, 1999. p. 229-243.

ANDRADE, Hernán. Dinámica productiva del sistema silvopastoril con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Turrialba, 1999. 83p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

ANDRADE, Hernán. J. e IBRAHIM, Muhammad. ¿Cómo monitorear el secuestro de Carbono en los sistemas silvopastoriles?. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 10, no. 39-40, 2003; 109-116.

ARAYA, Vinicio. [en línea]. Algunas experiencias en el Pago de Servicios Ambientales con énfasis en Captura de Carbono. Proyecto Centroamericano PROCAFOR, S.f. 6 p. [Citado el 10 de ene de 2005]. Disponible en internet: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo2.htm>

ARGENTINA. DIRECCIÓN NACIONAL DE POLÍTICAS DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIVIL SIFEM. [en línea]. Cambio climático. 2000. [Citado el 8 de may de 2005]. Disponible en internet: <http://www.proteccioncivil.gov.ar/calentamiento.html>

ARISTIZABAL, Javier y GUERRA, Andrés. Estimación de la tasa de fijación de Carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero *Cordia alliodora* - cacao *Theobroma cacao* L -plátano *Musa paradisíaca*. Bogotá, 2002, 108 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital.

ÁVILA V. Gabriela. Fijación y almacenamiento de Carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol.

Turrialba, Costa Rica, 2002. 99 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

BEER, John. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. En: Agroforestry Systems. Vol 5, 1987; 3-13.

\_\_\_\_\_. *et al.* Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 10, no. 37-38, 2003; 80-87.

BENITEZ, P. *et al.* Análisis costo beneficio de usos del suelo y fijación del Carbono en sistemas forestales. Informe Técnico. Eschbom, Alemania, 2001. p. 290-293.

BORGE, Carlos. y VILLALOBOS, V. Talamanca en la encrucijada. San José: Universidad Estatal a Distancia, 1995. 121 p.

BORGE, D.H. y CASTILLO, R. Cultura y conservación en la Talamanca Indígena. San José: Universidad Estatal a Distancia, 1997. 259 p.

BROWN, Sandra. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. Roma: FAO, Montes 134, 1997. 55 p.

\_\_\_\_\_. y LUGO, A.E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian Amazon. En: Interciencia. Vol. 17, no. 1, 1992; p.8-18.

BROWN, Sandra, *et al.* Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. En: Commonwealth Forestry Review, no. 75, 1996.

CASTRO, R.; CORDERO, S. y ACEVEDO, C. Casos latinoamericanos de cambio climático y desarrollo. San José: Copieco de San Pedro, 2002. 320 p.

CAMACHO, Maria A. *et al.* Gestión local y participación en torno al pago por servicios ambientales: Estudios de caso en Costa Rica. Costa Rica: FORD-PRISMA, 2002. 111 p.

CHAPMAN, Hernán y MEYER, Walter. Forest Mensuration. Estados Unidos: McGRAW-HILL Book Company, 1949. 522 p.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA CATIE. Datos meteorológicos. [en línea]. 2003. [Citada el 3 de mar. de 2005]. Disponible en internet: <http://www.catie.ac.cr>

\_\_\_\_\_. Laurel *Cordia alliodora*. Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba: CATIE, 1994. 41 p. (Informe técnico no 239).

CIESLA, W. Cambio climático, Bosques y Ordenación Forestal: una visión en conjunto. Roma: Estudios FAO, Montes, no. 120, 1996. 146 p.

CÓRDOBA, Rafael. Características, propiedades y usos de la madera del laurel *Cordia alliodora*. En: Revista Forestal Centroamericana. No. 20, 1997; 8-23.

CORPORACION NACIONAL DE INVESTIGACION Y FOMENTO FORESTAL CONIF. Resumen de investigaciones sobre la especie *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. "Laurel actualización de las investigaciones de CONIF. Colombia, 1983. 17 p. (CONIF Informa no. 2).

COSTA RICA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA MINAE, FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO FORESTAL FONAFIFO. Costa Rica: Hacia la sostenibilidad de sus recursos naturales. San José, 1998.

\_\_\_\_\_. Ley Forestal y su Reglamento. San José: Asamblea Legislativa, 1999. 116 p.

DIXON, R. K. Sistemas agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 2. no. 7, 1995; 22-26.

DUGUMA, B.; GOCKOWSKI, J. y BAKALA, J. Desafíos biofísicos y oportunidades para el cultivo sostenible de cacao (*Theobroma cacao* Linn.) en sistemas agroforestales de Africa Occidental y Central. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 6, no. 22, 1999; 12-15.

ECOS CORPORATION. [en línea]. Australia, s.f. [Citado el 23 de jun de 2005]. Disponible en internet: [www.carbonmarket.com](http://www.carbonmarket.com)

EGUREN, Lorenzo. El mercado de Carbono en América Latina y el caribe: Balance y perspectivas. Santiago de Chile: CEPAL, 2004. 83 p. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo).

ERICKSON, J. El efecto invernadero: el desastre del mañana, hoy. Madrid: Mc Graw-Hill I/ Interamericana, 1992. 217 p.

FAO. Manejo de la tierras forestales, de pastoreo y cultivadas para aumentar la captura de Carbono en los suelos. [en línea].s.f. [Citado el 1 de mar de 2006]. Disponible en internet: [www.fao.org/DOCREP/005/Y2779S/y2779s07.htm-43k](http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2779S/y2779s07.htm-43k)

FARREL, Jhon y ALTIERI, Miguel. Sistemas agroforestales. En: ALTIERI, Miguel. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Montevideo: Nordan-Comunidad, 1999. p. 229-243.

FASSBENDER, H. W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Turrialba, 1993. 49 p. (Serie de materiales de enseñanza no. 29).

GODOY, J.C. *et al.* Análisis económico y financiero de los incentivos a la reforestación implementados en Costa Rica. En: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO (1o.: Valdivia, 1998) Actas del I Congreso Latinoamericano IUFRO Chile: IUFRO, 1998.

GORMLEY, H.J. y SINCLAIR, F.L. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Central. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 10, no. 39-40, 2003; 103-108.

GUIRACOCHA, G. Conservación de la biodiversidad en los sistemas agroforestales cacaoteros y bananeros de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 2000. 128 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

GURUS. [en línea]. S.t. 2004. [Citado 2 nov. 2004]. Disponible en internet: <http://www.gurusblog.com/archives/protocolo-de-Kioto>

GUTIÉRREZ V.H. y LOPERA G.J. [en línea]. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de Carbono en plantaciones forestales. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL: MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES. (2002, Valdivia). Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2002. [Citado el 17 de jun de 2005]. Disponible en internet: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)

HARDY, F. Manual de cacao. Edición español. Turrialba: Hardy, 1961. p. 28-29.

HERNÁNDEZ, R. *et al.* Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. El Nogal Cafetero *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken. Manizales: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2004. 32 p. (Serie cartillas divulgativas).

HOLDRIDGE, L. Ecología basada en zonas de vida. San José: IICA, 1982. 216 p.

HUGHELL, David. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de: *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en America Central. Turrialba: CATIE, 1990. 57 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico No. 22).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Inglaterra: Cambridge University Press, 1995.

\_\_\_\_\_. [en línea] Technical Summary of the Third Assessment Report. IPCC working Group I. 2001. 63 p. [Citado el 3 de may de 2005]. Disponible en internet: <http://home3.worldonline.es/jaguilar/ipcc.html>

JIMENEZ, W. Evolución del crecimiento de *Quercus copeyensis* M. en un bosque de roble no intervenido de San Gerardo de Dota, Costa Rica. San José, 1984. 192 p. Trabajo de grado (Lic. Ciencias Forestales). Universidad Nacional.

KANNINEN, Markku. Los bosques y el cambio global. En: CONGRESO FORESTAL CENTROAMERICANO. (2o.: 1997, San José). Resúmenes de ponencias del III Congreso Forestal Centroamericano. Heredia (Costa Rica): Impresos Belén, 1997. p. 2-5.

LEAD-FAO CATIE. Laurel o Nogal cafetero *Cordia alliodora*. [en línea]. s.f. [Citado el 10 dic. de 2004]. Disponible en internet:  
<http://www.virtualcentre.org/silvopastoral/menu/cordia.htm>

LOJAN, Leoncio. Periodicidad del clima y del crecimiento de especies forestales en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Vol. 17, no. 1, 1967. p. 71-83.

LÓPEZ, A. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de Carbono en el suelo. Turrialba, 1998. 50 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

LOUMAN, B; VALERIO, J. y JIMÉNEZ W. En: LOUMAN, B; QUIRÓS, D. y NILSSON M. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba: CATIE, 2000. p. 68-69.

MACHADO, E.G.; PEREIRA, A. y RIOS, N.A. Tabla de volumen para *Buchenavia capitata*, Vahl. En: Quebracho. Vol. 10, 2003; 76-82.

MACDICKEN, K.G. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Program. S.L.: Winrock International Institute for Agricultural Development, 1997. 84 p.

MEJIA, L. y PALENCIA, G. Manejo integrado del cultivo de cacao. En: RAMÍREZ, N. Bucaramanga: CORPOICA, 2000. 24 p.

MERLO, Froilan. Exploración de herramientas de dinámica de sistemas para la elaboración de un modelo de decisión forestal boliviano. [en línea] s.f. [Citado el 8 de ene. de 2005]. Disponible en internet:  
<http://www.infor.cl/webinfor/.../Froil%C3%A1n%20Merlo.%20Bolivia.pdf>

MIRANDA, A. Caracterización de la producción de cacao en Panamá. Santiago: MIDA- PROCACAO, 1992. 53 p.

MONTAGNINI, Florencia, *et al.* Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos. Costa Rica: organización para Estudios Tropicales ET, *et al.*, 1992. 624 p.

MORET, A.Y y RUIZ P. Determinación de ecuaciones de volumen para mureillo (*Erismia uncinatum*) en la unidad C4 de la Reserva Forestal Imataca, Bolívar. En: Revista Forestal Venezolana. Venezuela, Vol. 42, no. 2, 1998; 187-197.

NIEUWENHUYSE, A. Los suelos de los sitios del Proyecto agroforestal CATIE/GTZ Cantón de Talamanca, Costa Rica y Distrito de Changuinola, Panamá. Turrialba: CATIE, 1994. 133 p.

OFICINA COSTARRICENSE DE IMPLEMENTACIÓN CONJUNTA OCIC. Actividades de Implementación conjunta en Costa Rica. San José, 1998. 6 p.

ORDOÑEZ, José. Captura de Carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. México D:F: Instituto Nacional de Ecología, 1999. 81 p.

ORTIZ, Edgar. Técnicas para la estimación del crecimiento y rendimiento de árboles individuales y bosques. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, no. 16, 1993. 71 p.

PAREDES, Mendis. Manual de cultivo del cacao Perú: MINISTERIO DE AGRICULTURA – PROGRAMA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA, 2003. 100 p.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass. A review with examples and critical comparisons. En: Forestal. Science. Vol. 45, no. 4, 1999; 573-593.

PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE PNUMA *et al.* La lucha contra el cambio climático: El compromiso del Parlamento Latinoamericano. Buenos Aires: \_\_\_\_\_, 1998. 174 p. (Serie de Ciudadanía Ambiental).

RAMÍREZ, O. y GÓMEZ, M. Estimación y valoración económica del almacenamiento de Carbono. En: Revista Forestal Centroamericana. No 27, (Jul-Sep), 1999; 17-22.

ROJO, Gustavo, *et al.* Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas. En: Ra Ximhai. Vol. 1, no. 1, (ene-abr) 2005; 153-166.

Experiencias de servicios ambientales en países de Centroamérica y del cono sur. [en línea] S.f. 58 p. [Citado el 1 de mar. de 2006]. Disponible en internet: [www.conafor.gob.mx/.../evaluaciones/evaluaciones/Evaluacion%202004/Anexos/PSA\\_CABSA1.PDF](http://www.conafor.gob.mx/.../evaluaciones/evaluaciones/Evaluacion%202004/Anexos/PSA_CABSA1.PDF)

SAGE, L.F. y SANCHEZ, O. Evolución esperada para el mercado de pago de servicios ambientales en Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. No. 37, 2002; 72-73.

SÁNCHEZ, A. Cultivos de plantación. México D.F.: Trillas, 1982. 122p.

SÁNCHEZ, J. y DUBÓN, A. Establecimiento y manejo de cacao con sombra. Guía técnica para el extensionista forestal. Turrialba: CATIE, 1994. 82 p. (Serie Técnica. Manual Técnico no 10).

SEGURA Milena. Almacenamiento y fijación de Carbono en *Quercus costarricensis* en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 1997. 34 p. Trabajo de grado (Lic. Ing. Forestal). Universidad de Heredia (Costa Rica).

\_\_\_\_\_. Estimación del Carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba: Proyecto Captura de Carbono y desarrollo de mercados ambientales en sistemas agroforestales indígenas con cacao en Costa Rica, (TF-052118), 2005. 139p. (Informe final de consultoría).

\_\_\_\_\_. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de Carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Turrialba, 1999. 119 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). CATIE.

\_\_\_\_\_. y KANNINEN, Markku. Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. En: OROZCO, L. y BRUMÉR, C. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba: CATIE, 2002. p. 202-222.

\_\_\_\_\_. y VENEGAS, Geoffrey. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. CATIE. Turrialba, 1999. 46 p. (Serie Técnica no. 306).

SIERRA, Carlos.; DEL VALLE, Jorge. y ORREGO, Sergio. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J. y MORENO, F. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. p 169-188.

SNOWDON *et al.* Protocol for sampling tree and stand biomass. En: National carbon accounting system technical report, no. 3. Australia: Greenhouse Office, 2001. 114 p.

SOMARRIBA, Eduardo. Sistemas agroforestales con cacao-plátano-laurel. En: Agroforestería en las Américas. No. 4, 1994; 22-24.

\_\_\_\_\_. y BEER, John. Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales. Turrialba: CATIE, 1986. 23 p. (Boletín Técnico no 16).

\_\_\_\_\_. y \_\_\_\_\_. Sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica y Panamá. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 6, no. 22, 1999; 7-11.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. y BONNEMANN, A. Árboles leguminosos y maderables como sombra para cacao. El concepto. Turrialba: Proyecto agroforestal CATIE/GTZ, 1996. 51 p.

\_\_\_\_\_; DOMÍNGUEZ, L. y LUCAS, C. Cacao bajo sombra de maderables en Ojo de Agua, Changuinola, Panamá: manejo, crecimiento y producción de cacao y madera. Turrialba: CATIE, 1996. 47 p. (Serie Técnica no.276).

\_\_\_\_\_. y HARVEY, Celia. Cómo integrar simultáneamente producción sostenible y conservación de la biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas?. En: Agroforestería en las Américas. Vol. 10, no. 37-38, 2003; 12-17.

SOMARRIBA, Eduardo. *et al.* Cacao bajo sombra de leguminosas en Talamanca, Costa Rica. Manejo, fenología, sombra y producción de cacao. Turrialba: CATIE, 1997. 51 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 289).

STANDA-GUNDA, W. *et al.* Participatory modelling to enhance social learning, collective action and mobilization among users to the Mafungautsi Forest, Zimbabwe. Small-scale Forest Economics. En: Management and Policy. Vol. 2, no. 2, 2003; 313-326.

SUÁREZ Alfonso. Aprovechamiento sostenible de madera de *Cordia alliodora* y *Cedrella odorata* de regeneración natural en cacaotales y bananales de indígenas de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, 2001. 74 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). CATIE.

VALDIVIESO, Roberto. Crecimiento de laurel *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken) como componente maderable de sistemas agroforestales en Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá. Turrialba, 1997. 70 p. Trabajo de Grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

VASQUEZ, Guillermo. Crecimiento de un bosque de guandal explotado en el litoral pacífico colombiano. Medellín, 1987. 212 p. Trabajo de grado (Ing. Forestal). Universidad Nacional de Colombia.

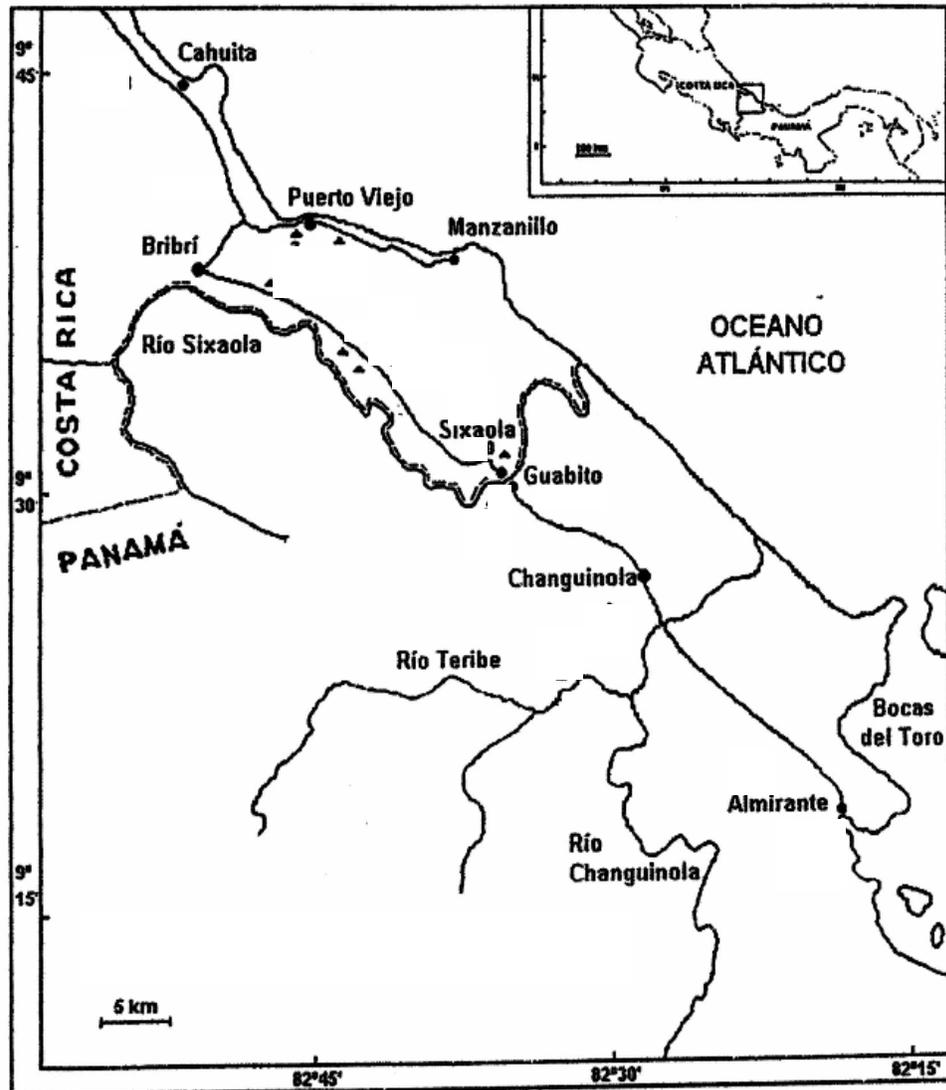
ZAPATA, Mauricio; COLORADO, Gabriel y DEL VALLE, Jorge. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. En: ORREGO, S.; DEL VALLE, J. y MORENO F. Medición de la captura de Carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. p. 87-119.

ZAPATA, Mauricio; DEL VALLE, Jorge y ORREGO, Sergio. Corrección por sesgos en modelos log-normales alométricos linealizados utilizados para la estimación de la biomasa aérea. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL: MEDICIÓN Y MONITOREO

DE LA CAPTURA DE CARBONO EN SISTEMAS FORESTALES (Valdivia, 2002)  
Memorias del Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de  
Carbono en Sistemas Forestales. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2002. 47  
p.

# **ANEXOS**

**Anexo 1.** Localización geográfica de los ensayos donde se desarrollaron los modelos de crecimiento para las especies *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*, Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá, Centroamérica.



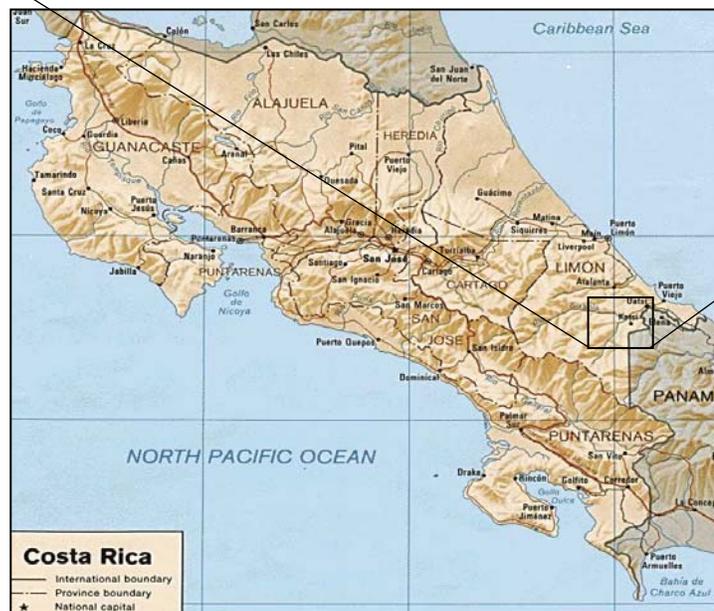
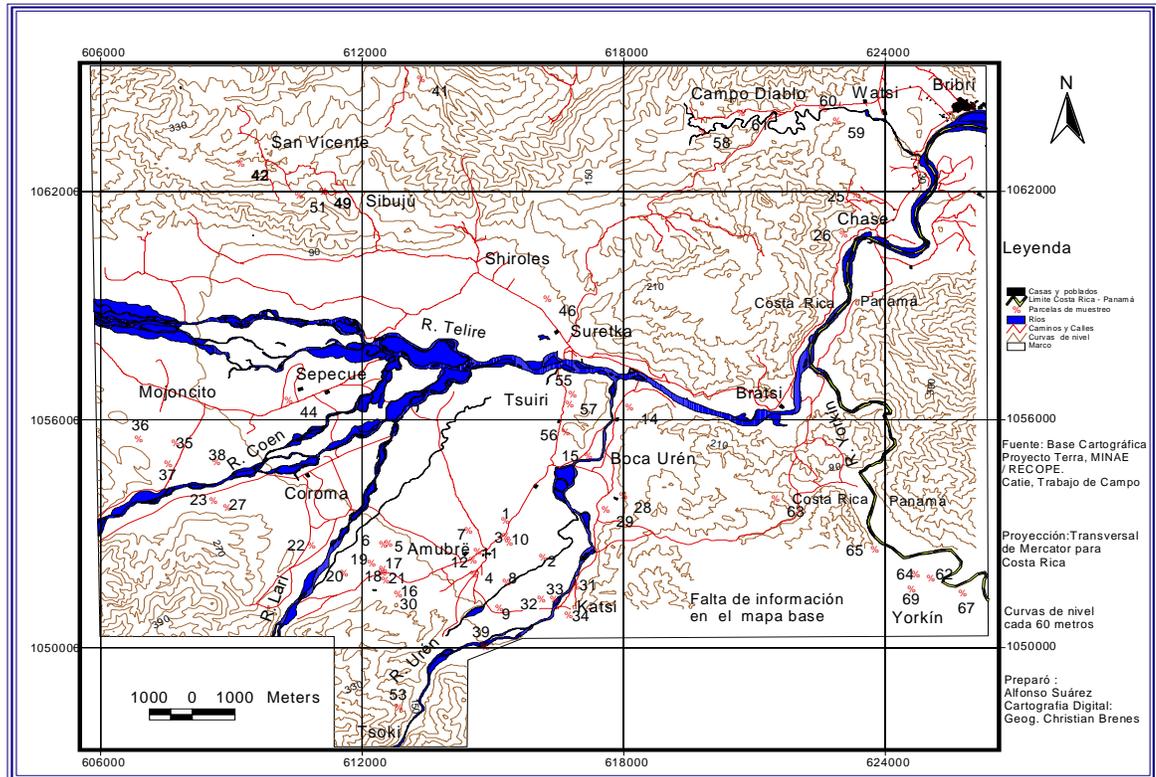
Fuente: Valdivieso, 1997.

**Anexo 2.** Características generales de los sitios de estudio donde se desarrollaron los modelos de crecimiento para las especies *Cordia alliodora* y *Theobroma cacao*, Costa Rica y Panamá.

Ensayo	Lugar	Sps. asociadas	Fecha establ.	Suelos	Topog.	Altura msnm	Precip. mm	No. medic.	Período medic. mes
*Moniliasis resistant hybrid experiment at La Lola farm	Matina (CR)	Cacao (3x3m) Maderables y leguminosas (dis. indefinida)	1997		Planicie aluvial	40	3527	1791	6-96
**Cacao-platano-laurel	Charagre (P)	Laurel <i>Cordia alliodora</i> (12x12m) Cacao y plátano (3x3m) en dif. modalidades	1990	Fluvaquentic Eutropept Alta saturación de bases Drenaje nat. imperfecto a moderado	Planicie aluvial	30	2587	117 504	12-175 27-178
**Cacao nuevo con maderables	Ojo de Agua (P)	Laurel, roble, guaba y terminalia (6x6m) Cacao (3x3m)	1989	Origen volcánico Franco arcillosos a arcillosos Drenaje pobre Prof. efectiva de 60-90cm	Loma			64 576	12-193 12-186
**Comparacion de sps. de sombra para cacao en Talamanca	Margarita (CR)	Cacao 3x3m Leguminosas (poró, guaba y madero negro) (6x6m)	1988	Fluvaquentic Eutropept Buen drenaje Franco limoso	Planicie aluvial	20	2306	324	18-72

\*Base de datos facilitada por Wilbert Philips M. Sc., Jefe del Programa de Mejoramiento Genético de Cacao del CATIE. 2005; \*\*Bases de datos facilitadas por el Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ; CR: Costa Rica; P: Panamá.

**Anexo 3.** Localización geográfica del área de estudio donde se desarrollaron los modelos de biomasa para las especies cacao y laurel y la simulación del SAF, Reserva Indígena de Talamanca, Talamanca, Costa Rica.



Fuente: Suárez, 2001.

**Anexo 4a.** Comparación de medias (prueba T) entre dap reales (DAPr) y dap estimados (DAPe) para *Cordia alliodora* en valle (v)

Edad (meses)	Dap real (cm)	Dap estimado (cm)
15	3,6	3,4
27	11,5	11,6
35	16,1	16,5
40	19	19,2
51	24,3	24
63	28,2	28
77	31,7	31,5
88	34,1	33,7
99	36,2	35,5
108	38	36,8
178	43,7	42,8

Dap: Diámetro a la altura del pecho (1,30 m)

Comparison of Means

-----

95,0% confidence interval for mean of DAPr: 26,846 +/- 0,703947 [26,1421,27,55]

95,0% confidence interval for mean of DAPe: 26,5235 +/- 0,645055 [25,8785,27,1686]

95,0% confidence interval for the difference between the means

assuming equal variances: 0,322519 +/- 0,954797 [-0,632278,1,27732]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2

Alt. hypothesis: mean1 NE mean2

assuming equal variances: t = 0,662053 P-value = 0,507934

**Anexo 4b.** Comparación de medias (prueba T) entre dap reales (DAPr) y dap estimados (DAPE) para *Cordia alliodora* en loma (I).

Edad (meses)	Dap real (cm)	Dap estimado (cm)
16	3,7	4,3
23	9,4	8,8
28	12,7	11,9
35	17,3	15,5
40	18,6	17,7
47	22,5	20,5
52	22,8	22,1
65	25,7	25,6
76	27,2	27,8
86	29,1	29,5
99	30,8	31,2
110	31,4	32,4
123	32,2	33,6
196	35,4	37,7

Dap: Diámetro a la altura del pecho (1,30 m)

Comparison of Means

-----

95,0% confidence interval for mean of DAPr: 23,1014 +/- 0,96339 [22,138,24,0648]  
 95,0% confidence interval for mean of DAPE: 23,0708 +/- 0,987669 [22,0831,24,0585]  
 95,0% confidence interval for the difference between the means  
 assuming equal variances: 0,0306146 +/- 1,37501 [-1,3444,1,40562]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2  
 Alt. hypothesis: mean1 NE mean2  
 assuming equal variances: t = 0,0436387 P-value = 0,965187

**Anexo 5.** Diámetro a la altura del pecho (dap), Incremento Corriente (ICA) y Medio Anual (IMA) en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Edad (años)	Dap-v	ICA-v	IMA-v	Dap-l	ICA-l	IMA-l
1	1,7	1,7	1,7	2,0	2,0	2,0
2	9,6	7,9	4,8	9,5	7,5	4,7
3	17,1	7,5	5,7	16,0	6,5	5,3
4	22,8	5,7	5,7	20,8	4,8	5,2
5	27,1	4,3	5,4	24,4	3,6	4,9
6	30,3	3,3	5,1	27,1	2,7	4,5
7	32,9	2,6	4,7	29,2	2,1	4,2
8	35,0	2,1	4,4	30,8	1,7	3,9
9	36,8	1,7	4,1	32,2	1,4	3,6
10	38,2	1,4	3,8	33,4	1,1	3,3
11	39,4	1,2	3,6	34,3	1,0	3,1
12	40,5	1,0	3,4	35,2	0,8	2,9
13	41,4	0,9	3,2	35,9	0,7	2,8
14	42,2	0,8	3,0	36,5	0,6	2,6
15	42,9	0,7	2,9	37,1	0,6	2,5
16	43,5	0,6	2,7	37,6	0,5	2,3
17	44,0	0,6	2,6	38,0	0,4	2,2
18	44,5	0,5	2,5	38,4	0,4	2,1
19	45,0	0,5	2,4	38,7	0,4	2,0
20	45,4	0,4	2,3	39,1	0,3	2,0
<b>Promedio</b>	<b>34,0</b>	<b>2,3</b>	<b>3,7</b>	<b>29,8</b>	<b>2,0</b>	<b>3,3</b>

Dap: Diámetro a la altura del pecho en cm; v: Valle; l: Loma; ICA: Incremento corriente anual (cm/año); IMA: Incremento medio anual en (cm/año)

**Anexo 6.** Comparación de medias (prueba T) entre diámetros reales (Diám30cmR) y diámetros estimados (Diám30cmE) para *Theobroma cacao*.

Edad (mes)	Diám 30cm real	Diám 30cm estimado
10	1,40	2,13
16	2,47	3,04
22	5,03	3,87
28	5,69	4,64
34	6,61	5,38
40	6,87	6,09
46	7,91	6,77
52	8,42	7,42
58	8,89	8,07
64	9,28	8,69
76	9,92	9,89
88	9,97	11,06
100	10,45	12,19
180	13,82	19,03
190	13,31	19,82

Diám 30cm: Diámetro a 30 cm sobre el suelo en cm

Comparison of Means

-----

95,0% confidence interval for mean of Diam30cmR: 7,7163 +/- 0,0512744 [7,66502,7,76757]  
 95,0% confidence interval for mean of Diam30cmE: 7,64092 +/- 0,0597673 [7,58115,7,70069]  
 95,0% confidence interval for the difference between the means  
 assuming equal variances: 0,0753792 +/- 0,0787476 [-0,00336846,0,154127]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2

Alt. hypothesis: mean1 NE mean2

assuming equal variances: t = 1,87613 P-value = 0,0606372

**Anexo 7.** Diámetro a 30cm del suelo (Diám 30cm), Incremento corriente (ICA) y medio anual (IMA) para *Theobroma cacao*.

Edad (año)	Diám 30cm	ICA	IMA
1	2,4	2,4	2,4
2	4,1	1,7	2,1
3	5,6	1,5	1,9
4	7,0	1,4	1,7
5	8,3	1,3	1,7
6	9,5	1,2	1,6
7	10,7	1,2	1,5
8	11,8	1,1	1,5
9	12,9	1,1	1,4
10	14,0	1,1	1,4
11	15,0	1,0	1,4
12	16,1	1,0	1,3
13	17,1	1,0	1,3
14	18,1	1,0	1,3
15	19,0	1,0	1,3
16	20,0	1,0	1,2
17	20,9	0,9	1,2
18	21,8	0,9	1,2
19	22,8	0,9	1,2
20	23,7	0,9	1,2
<b>Promedio</b>	<b>14,0</b>	<b>1,2</b>	<b>1,5</b>

Diám 30cm: Diámetro a 30cm sobre el suelo en cm; ICA: Incremento corriente anual (cm/año); IMA: Incremento medio anual (cm/año)

**Anexo 8.** Comparación de medias (prueba T) entre biomasa total real (BtR) y biomasa total estimada (BtE) para *Cordia alliodora* en a) valle (v) y b) loma (l).

**a)**

Comparison of Means  
-----

95,0% confidence interval for mean of BtR: 399,473 +/- 17,9127 [381,56,417,386]  
95,0% confidence interval for mean of BtE: 379,563 +/- 15,0517 [364,511,394,614]  
95,0% confidence interval for the difference between the means  
assuming equal variances: 19,9101 +/- 23,397 [-3,48691,43,3071]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2  
Alt. hypothesis: mean1 NE mean2  
assuming equal variances: t = 1,66787 P-value = 0,0953413

**b)**

Comparison of Means  
-----

95,0% confidence interval for mean of BtR: 282,249 +/- 20,2958 [261,953,302,544]  
95,0% confidence interval for mean of BtE: 283,774 +/- 20,3109 [263,463,304,085]  
95,0% confidence interval for the difference between the means  
assuming equal variances: -1,52516 +/- 28,6154 [-30,1406,27,0902]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2  
Alt. hypothesis: mean1 NE mean2  
assuming equal variances: t = -0,104463 P-value = 0,916796

**Anexo 9.** Biomasa total (Bt) y Carbono almacenado (Ca) por árbol en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

<b>Edad (año)</b>	<b>Dap-v</b>	<b>Dap-l</b>	<b>Bt-v</b>	<b>Bt-l</b>	<b>Ca-v</b>	<b>Ca-l</b>
1	1,7	2,0	1,1	1,4	0,5	0,7
2	9,6	9,5	38,6	37,4	17,9	17,4
3	17,1	16,0	127,7	111,6	59,3	51,8
4	22,8	20,8	232,3	192,6	107,8	89,4
5	27,1	24,4	332,7	267,4	154,4	124,1
6	30,3	27,1	422,6	332,7	196,1	154,4
7	32,9	29,2	501,4	388,9	232,6	180,4
8	35,0	30,8	570,0	437,2	264,5	202,8
9	36,8	32,2	629,8	478,8	292,2	222,2
10	38,2	33,4	682,1	515,0	316,5	239,0
11	39,4	34,3	728,1	546,7	337,8	253,6
12	40,5	35,2	768,8	574,5	356,7	266,6
13	41,4	35,9	805,0	599,1	373,5	278,0
14	42,2	36,5	837,4	621,1	388,5	288,2
15	42,9	37,1	866,5	640,8	402,0	297,3
16	43,5	37,6	892,8	658,6	414,3	305,6
17	44,0	38,0	916,7	674,6	425,3	313,0
18	44,5	38,4	938,4	689,2	435,4	319,8
19	45,0	38,7	958,3	702,6	444,7	326,0
20	45,4	39,1	976,6	714,8	453,2	331,7
<b>Promedio</b>	<b>34,0</b>	<b>29,8</b>	<b>611,3</b>	<b>459,3</b>	<b>283,7</b>	<b>213,1</b>

Dap: Diámetro a la altura del pecho en cm; v: valle; l: loma; Bt: Biomasa total que incluye biomasa de raíces (kg/árbol);

Ca: Carbono almacenado (kg/árbol)

**Anexo 10.** Incrementos corrientes (ICA) y medios anuales (IMA) en biomasa (Bt) y Carbono almacenado (Ca) por árbol en valle (v) y loma (l) para *Cordia alliodora*.

Edad (año)	ICA-Bt-v	IMA-Bt-v	ICA-Bt-l	IMA-Bt-l	ICA-Ca-v	IMA-Ca-v	ICA-Ca-l	IMA-Ca-l
1	1,1	1,1	1,4	1,4	0,5	0,5	0,7	0,7
2	37,5	19,3	36,0	18,7	17,4	9,0	16,7	8,7
3	89,1	42,6	74,1	37,2	41,4	19,8	34,4	17,3
4	104,6	58,1	81,1	48,2	48,5	26,9	37,6	22,3
5	100,3	66,5	74,7	53,5	46,6	30,9	34,7	24,8
6	89,9	70,4	65,3	55,4	41,7	32,7	30,3	25,7
7	78,8	71,6	56,2	55,6	36,6	33,2	26,1	25,8
8	68,6	71,2	48,3	54,6	31,8	33,1	22,4	25,4
9	59,8	70,0	41,7	53,2	27,7	32,5	19,3	24,7
10	52,3	68,2	36,2	51,5	24,3	31,6	16,8	23,9
11	46,0	66,2	31,6	49,7	21,3	30,7	14,7	23,1
12	40,7	64,1	27,8	47,9	18,9	29,7	12,9	22,2
13	36,2	61,9	24,7	46,1	16,8	28,7	11,4	21,4
14	32,4	59,8	22,0	44,4	15,0	27,8	10,2	20,6
15	29,1	57,8	19,7	42,7	13,5	26,8	9,1	19,8
16	26,3	55,8	17,7	41,2	12,2	25,9	8,2	19,1
17	23,9	53,9	16,1	39,7	11,1	25,0	7,5	18,4
18	21,8	52,1	14,6	38,3	10,1	24,2	6,8	17,8
19	19,9	50,4	13,3	37,0	9,2	23,4	6,2	17,2
20	18,3	48,8	12,2	35,7	8,5	22,7	5,7	16,6
<b>Promedio</b>	<b>48,8</b>	<b>55,5</b>	<b>35,7</b>	<b>42,6</b>	<b>22,7</b>	<b>25,7</b>	<b>16,6</b>	<b>19,8</b>

Bt: Biomasa total que incluye biomasa de raíces; Ca: Carbono almacenado; v: Valle; l: Loma; ICA: Incremento corriente anual; IMA: Incremento medio anual; ICA e IMA calculados en kg/año

**Anexo 11.** Comparación de medias (prueba T) entre biomasa total real (BtR) y biomasa total (BtE) estimada para *Theobroma cacao*.

Comparison of Means

-----

95,0% confidence interval for mean of BtR: 6,71744 +/- 0,0875585 [6,62988,6,805]  
95,0% confidence interval for mean of BtE: 6,71744 +/- 0,0720862 [6,64535,6,78952]  
95,0% confidence interval for the difference between the means  
assuming equal variances: 0,00000552513 +/- 0,113415 [-0,113409,0,11342]

t test to compare means

Null hypothesis: mean1 = mean2

Alt. hypothesis: mean1 NE mean2

assuming equal variances: t = 0,000095482 P-value = 0,999918

**Anexo 12.** Biomasa total (Bt), Carbono almacenado (Ca), Incremento corriente (ICA) medio anual (IMA) por árbol para *Theobroma cacao*.

Edad (año)	Diám 30cm (cm)	Bt (kg/árbol)	ICA-Bt (kg/año)	IMA-Bt (kg/año)	Ca (kg/árbol)	ICA-Ca (kg/año)	IMA-Ca (kg/año)
1	2,44	0,23	0,23	0,23	0,10	0,10	0,10
2	4,13	2,36	<b>2,14</b>	1,18	1,08	<b>0,98</b>	0,54
3	5,62	4,39	2,03	1,46	2,01	0,93	0,67
4	6,99	6,31	1,92	1,58	2,89	0,88	0,72
5	8,28	8,13	1,81	1,63	3,72	0,83	0,74
6	9,50	9,83	1,71	<b>1,64</b>	4,50	0,78	<b>0,75</b>
7	10,68	11,44	1,60	1,63	5,24	0,73	<b>0,75</b>
8	11,82	12,93	1,49	1,62	5,92	0,68	0,74
9	12,92	14,32	1,39	1,59	6,56	0,64	0,73
10	13,99	15,60	1,28	1,56	7,14	0,59	0,71
11	15,04	16,77	1,17	1,52	7,68	0,54	0,70
12	16,07	17,84	1,07	1,49	8,17	0,49	0,68
13	17,07	18,80	0,96	1,45	8,61	0,44	0,66
14	18,06	19,65	0,85	1,40	9,00	0,39	0,64
15	19,03	20,40	0,75	1,36	9,34	0,34	0,62
16	19,98	21,04	0,64	1,31	9,64	0,29	0,60
17	20,92	21,57	0,53	1,27	9,88	0,24	0,58
18	21,85	22,00	0,43	1,22	10,08	0,20	0,56
19	22,76	22,32	0,32	1,17	10,22	0,15	0,54
20	23,66	22,53	<b>0,21</b>	1,13	10,32	0,10	0,52
<b>Promedio</b>	<b>14,04</b>	<b>14,42</b>	<b>1,13</b>	<b>1,37</b>	<b>6,61</b>	<b>0,52</b>	<b>0,63</b>

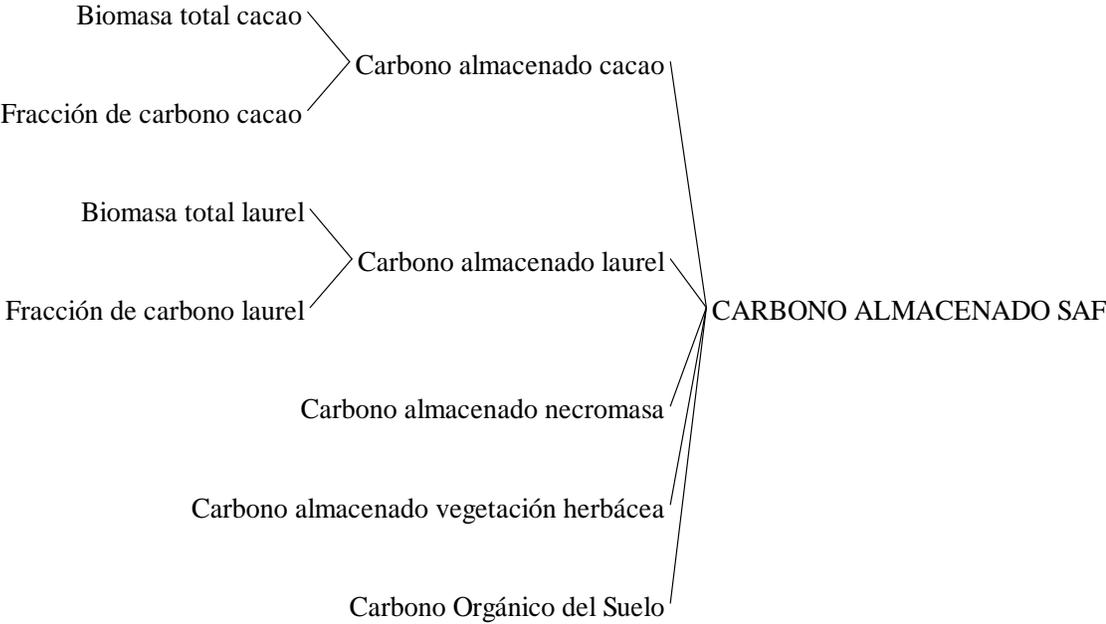
Bt: Biomasa total que incluye biomasa de raíces; ICA-Bt: Incremento corriente anual en Bt; IM- Bt: Incremento medio  
Ca: Carbono almacenado; ICA-Ca: Incremento corriente anual en Ca; IMA-Ca: Incremento medio anual en Ca

**Anexo 13.** Carbono almacenado (Ca) estimado por hectárea para *Cordia alliodora* en seis escenarios de simulación (tnC ha<sup>-1</sup>).

<b>Año</b>	<b>Ca-L-v-6x6</b>	<b>Ca-L-v-9x9</b>	<b>Ca-L-v-12x12</b>	<b>Ca-L-l-6x6</b>	<b>Ca-L-l-9x9</b>	<b>Ca-L-l-12x12</b>
0	0,07	0,05	0,03	0,10	0,07	0,04
1	2,69	1,99	1,23	2,60	1,93	1,19
2	8,89	6,58	4,07	7,76	5,75	3,56
3	16,17	11,98	7,41	13,41	9,93	6,15
4	23,15	17,15	10,61	18,61	13,78	8,53
5	29,41	21,79	13,48	23,15	17,15	10,61
6	34,90	25,85	15,99	27,07	20,05	12,41
7	39,67	29,39	18,18	30,43	22,54	13,95
8	43,83	32,47	20,09	33,33	24,69	15,28
9	47,47	35,16	21,76	35,85	26,55	16,43
10	50,67	37,54	23,22	38,05	28,18	17,44
11	53,51	39,63	24,52	39,98	29,62	18,33
12	56,03	41,50	25,68	41,70	30,89	19,11
13	58,28	43,17	26,71	43,23	32,02	19,81
14	60,31	44,67	27,64	44,60	33,04	20,44
15	62,14	46,03	28,48	45,84	33,95	21,01
16	63,80	47,26	29,24	46,95	34,78	21,52
17	65,31	48,38	29,94	47,97	35,53	21,99
18	66,70	49,41	30,57	48,90	36,22	22,41
19	67,97	50,35	31,15	49,75	36,85	22,80
20	69,14	51,22	31,69	50,53	37,43	23,16
21	70,23	52,02	32,19	51,26	37,97	23,49
22	71,23	52,76	32,65	51,92	38,46	23,80
23	72,16	53,45	33,08	52,54	38,92	24,08
24	73,03	54,10	33,47	53,12	39,35	24,35
25	73,03	54,56	33,94	53,59	39,81	24,81
<b>Promedio</b>	<b>49,22</b>	<b>36,48</b>	<b>22,58</b>	<b>36,62</b>	<b>27,13</b>	<b>16,80</b>

Ca: Carbono almacenado; L: Laurel; v: Valle; l: Loma.

**Anexo 14.** Diagrama de flujo de Carbono almacenado en el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL).



**Anexo 15.** Carbono almacenado (Ca) y fijado (Cf) por el sistema agroforestal cacao-laurel (SAF-CL) bajo seis escenarios de simulación.

Año	Ca Saf-CL-v (tn/ha)			Ca Saf-CL-l (tn/ha)			Cf Saf-CL-v (tn/ha/año)			Cf Saf-CL-l (tn/ha/año)		
	6x6m	9x9m	12x12m	6x6m	9x9m	12x12m	6x6m	9x9m	12x12m	6x6m	9x9m	12x12m
0	70,9	70,8	70,8	71,6	71,6	71,5	--	--	--	--	--	--
1	74,3	73,7	73,0	74,9	74,3	73,6	74,3	73,7	73,0	74,9	74,3	73,6
2	81,3	79,1	76,7	80,9	79,0	76,9	40,7	39,6	38,3	40,5	39,5	38,4
3	89,4	85,3	80,9	87,3	84,0	80,3	29,8	28,4	27,0	29,1	28,0	26,8
4	97,1	91,2	84,9	93,3	88,6	83,5	24,3	22,8	21,2	23,3	22,1	20,9
5	104,0	96,6	88,5	98,5	92,7	86,3	20,8	19,3	17,7	19,7	18,5	17,3
6	110,2	101,3	91,7	103,0	96,2	88,8	18,4	16,9	15,3	17,2	16,0	14,8
7	115,5	105,5	94,5	107,0	99,3	91,0	16,5	15,1	13,5	15,3	14,2	13,0
8	120,3	109,1	97,0	110,4	102,1	92,9	15,0	13,6	12,1	13,8	12,8	11,6
9	124,4	112,4	99,3	113,5	104,5	94,6	13,8	12,5	11,0	12,6	11,6	10,5
10	128,1	115,2	101,2	116,1	106,6	96,2	12,8	11,5	10,1	11,6	10,7	9,6
11	131,3	117,8	103,0	118,5	108,5	97,5	11,9	10,7	9,4	10,8	9,9	8,9
12	134,2	120,0	104,6	120,6	110,1	98,7	11,2	10,0	8,7	10,1	9,2	8,2
13	136,8	122,1	106,0	122,5	111,6	99,8	10,5	9,4	8,2	9,4	8,6	7,7
14	139,2	123,9	107,2	124,1	113,0	100,7	9,9	8,8	7,7	8,9	8,1	7,2
15	141,2	125,5	108,4	125,6	114,1	101,6	9,4	8,4	7,2	8,4	7,6	6,8
16	143,1	127,0	109,4	127,0	115,2	102,3	8,9	7,9	6,8	7,9	7,2	6,4
17	144,8	128,3	110,2	128,2	116,1	103,0	8,5	7,5	6,5	7,5	6,8	6,1
18	146,3	129,4	111,0	129,2	116,9	103,6	8,1	7,2	6,2	7,2	6,5	5,8
19	147,7	130,5	111,7	130,2	117,7	104,0	7,8	6,9	5,9	6,9	6,2	5,5
20	148,9	131,4	112,3	131,0	118,3	104,4	7,4	6,6	5,6	6,5	5,9	5,2
21	150,0	132,2	112,8	131,7	118,8	104,8	7,1	6,3	5,4	6,3	5,7	5,0
22	150,9	132,9	113,2	132,3	119,3	105,0	6,9	6,0	5,1	6,0	5,4	4,8
23	151,8	133,5	113,5	132,9	119,6	105,2	6,6	5,8	4,9	5,8	5,2	4,6
24	152,5	134,0	113,8	133,3	119,9	105,4	6,4	5,6	4,7	5,6	5,0	4,4
25	153,0	134,9	114,7	134,2	120,8	106,3	6,1	5,4	4,6	5,4	4,8	4,3
<b>Promedio</b>	<b>126,4</b>	<b>114,0</b>	<b>100,4</b>	<b>114,5</b>	<b>105,3</b>	<b>95,3</b>	<b>15,7</b>	<b>14,6</b>	<b>13,4</b>	<b>14,8</b>	<b>14,0</b>	<b>13,1</b>

Ca: Carbono almacenado; Saf-CL: Sistema agroforestal cacao-laurel; Cf: Carbono fijado; v: valle; l: Loma

**Anexo 16.** Comparación estadística entre medias de Carbono almacenado en los seis escenarios simulados.

ANOVA Table

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	16473,5	5	3294,71	10,03	0,0000
Within groups	49293,8	150	328,625		
Total (Corr.)	65767,3	155			

Multiple Range Tests

Method: 95,0 percent LSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
L12x12m	26	95,3112	X
v12x12m	26	100,393	XX
L9x9m	26	105,332	XX
v9x9m	26	113,978	X
L6x6m	26	114,535	X
v6x6m	26	126,433	X

Contrast	Difference	+/- Limits
v6x6m - v9x9m	*12,455	9,9345
v6x6m - v12x12m	*26,04	9,9345
v6x6m - L6x6m	*11,8977	9,9345
v6x6m - L9x9m	*21,1012	9,9345
v6x6m - L12x12m	*31,1219	9,9345
v9x9m - v12x12m	*13,585	9,9345
v9x9m - L6x6m	-0,557308	9,9345
v9x9m - L9x9m	8,64615	9,9345
v9x9m - L12x12m	*18,6669	9,9345
v12x12m - L6x6m	*-14,1423	9,9345
v12x12m - L9x9m	-4,93885	9,9345
v12x12m - L12x12m	5,08192	9,9345
L6x6m - L9x9m	9,20346	9,9345
L6x6m - L12x12m	*19,2242	9,9345
L9x9m - L12x12m	*10,0208	9,9345

\* denotes a statistically significant difference.

L: Loma; V: Valle.

**Anexo 17.** Comparación estadística entre medias de Carbono fijado (CF) en los seis escenarios simulados.

ANOVA Table

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	117,39	5	23,478	0,11	0,9908
Within groups	31835,9	144	221,083		
Total (Corr.)	31953,3	149			

Multiple Range Tests

Method: 95,0 percent LSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
CFL12X12M	25	13,096	X
CFV12X12M	25	13,444	X
CF9X9M	25	13,992	X
CFV9X9M	25	14,636	X
CFL6X6M	25	14,828	X
CFV6X6M	25	15,724	X

Contrast	Difference	+/- Limits
CFV6X6M - CFV9X9M	1,088	8,3126
CFV6X6M - CFV12X12M	2,28	8,3126
CFV6X6M - CFL6X6M	0,896	8,3126
CFV6X6M - CF9X9M	1,732	8,3126
CFV6X6M - CFL12X12M	2,628	8,3126
CFV9X9M - CFV12X12M	1,192	8,3126
CFV9X9M - CFL6X6M	-0,192	8,3126
CFV9X9M - CF9X9M	0,644	8,3126
CFV9X9M - CFL12X12M	1,54	8,3126
CFV12X12M - CFL6X6M	-1,384	8,3126
CFV12X12M - CF9X9M	-0,548	8,3126
CFV12X12M - CFL12X12M	0,348	8,3126
CFL6X6M - CF9X9M	0,836	8,3126
CFL6X6M - CFL12X12M	1,732	8,3126
CF9X9M - CFL12X12M	0,896	8,3126

\* denotes a statistically significant difference.

L: Loma; V: Valle