

**CUANTIFICACION DE CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AEREA
EN CAUCHO *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. EN EL MUNICIPIO DE MOCOA,
DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO**

**ANGELA MARIA JURADO PARRA
NANCY EULALIA PEREZ GUERRERO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO
2007**

**CUANTIFICACION DE CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AEREA
EN CAUCHO *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. EN EL MUNICIPIO DE MOCOA,
DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO**

**ANGELA MARIA JURADO PARRA
NANCY EULALIA PEREZ GUERRERO**

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

PRESIDENTE

**DIEGO ANDRÉS MUÑOZ GUERRERO
Ingeniero Agroforestal M. Sc.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGROFORESTAL
SAN JUAN DE PASTO
2007**

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado, son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo 1º del Acuerdo N° 324 del 11 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

DIEGO ANDRÉS MUÑOZ G.
Presidente

JORGE ALBERTO VELEZ L.
Jurado Delegado

JORGE FERNANDO NAVIA E.
Jurado

JAVIER ANIBAL LEÓN G.
Jurado

San Juan de Pasto, abril de 2007.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a:

Diego Andrés Muñoz Guerrero. Ingeniero Agroforestal M. Sc.

Jorge Alberto Vélez Lozano. Ingeniero Agroforestal M. Sc.

Jorge Fernando Navia Estrada. Ingeniero Agrónomo Ph. D.

Javier Aníbal León Guevara. Ingeniero Agroforestal M. Sc.

Por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.

Alvaro Calero Escobar. Licenciado en Biología y Química M. Sc. Director Grupo de Investigación en Biotecnología y Medio Ambiente GIBMA. Director General de Investigaciones Universidad Santiago de Cali.

Alvaro José Castillo Marín. Ingeniero Agrónomo. Secretario Académico, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño.

Jaime Benavides Pazmiño. Ingeniero Agrónomo M. Sc. Laboratorio Diagnóstico Fitosanitario, Instituto Colombiano Agropecuario ICA Seccional Nariño.

Olga Deyanira León Guevara. Bióloga con énfasis en microbiología industrial. Laboratorio Diagnóstico Fitosanitario, Instituto Colombiano Agropecuario ICA Seccional Nariño.

Álvaro Vásquez Rojas. Ingeniero Forestal. Coordinador Centro Experimental Amazónico CEA, Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la amazonía CORPOAMAZONIA.

Raúl Alexander Nizo González. Ingeniero Forestal. Coordinador Técnico, Federación Nacional de Productores de Caucho Natural FEDECAUCHO.

Paola Andrea Bermúdez Sandino. Ingeniera Forestal. Asistente Técnico, Federación Nacional de Productores de Caucho Natural FEDECAUCHO.

Todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en la realización y culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

Este sueño hecho realidad, en especial está dedicado a la memoria de mi padre José Aldemar y a la memoria de mi madre María Idalia, unas personas maravillosas, a quienes extraño mucho, pero siempre los llevo en mi corazón, doy gracias por su amor incondicional y por la formación que me brindaron y a sus enseñanzas que me dejaron antes de partir, donde quiera que estén, este trabajo es para ustedes, sé que si estuvieran conmigo, se sentirían muy orgullosos de mí.

A Juan Carlos, mi hermano que con sus palabras y consejos, me dio fuerza para seguir adelante y terminar satisfactoriamente con mis estudios. A Armando Aldemar, mi otro hermano quien con sus palabras en mis tiempos difíciles, me ayudó a encontrar la luz JESUCRISTO, EL CAMINO, LA VERDAD Y LA VIDA.

A mis sobrinas María Paula, Ana María y Daniela; a mis sobrinos Diego Alejandro, Daniel Mauricio y Nicolás Fernando y a mi ahijado Luís Carlos, su hermano Luís David y a su tía Daniela; a quienes quiero mucho, personitas que me hacen sonreír con sus travesuras y me dejan pensativa con sus preguntas.

A mis familiares y en especial a mi tía Ascensión, quien ha confiado en mí y me ha brindado amor y confianza y me ha ayudado desinteresadamente.

A mi madrina María Mercedes y a su familia, por su amor, por ser mi segunda madre, por su comprensión y apoyo desinteresado, para cumplir satisfactoriamente con este sueño hecho realidad.

A mis amigas y amigos, quienes me han brindado una amistad sincera e incondicional, ellos saben quienes son y están en mi corazón.

Ángela María Jurado Parra.

DEDICATORIA

Al esfuerzo y dedicación de mis padres
Isaac Pérez y María Guerrero.

A la comprensión de mis hermanos
Lidia, Oscar y Yully Pérez G.

Al apoyo de mi esposo
Enrique Portilla Z.

Al amor e inspiración de mis hijos
Carlos y Juan Portilla P.

A la ternura de mis sobrinos
Camilo Guerrero P. y Wilder Mora P.

A la colaboración desinteresada de mi tía
Socorro Narváez

A mis abuelas, tías, tíos y demás familiares

A todos mis amigos y amigas

Nancy E. Pérez Guerrero.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEORICO	21
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y GASES EFECTO INVERNADERO (GEI)	21
1.2 PROTOCOLO DE KIOTO Y MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL)	22
1.3 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES (PSA)	24
1.4 BIOMASA EN ECOSISTEMAS FORESTALES	24
1.4.1 Metodología para estimar biomasa	25
1.4.2 Modelos para estimación de la biomasa	25
1.5 CARBONO EN BIOMASA	25
1.5.1 Carbono almacenado (Ca)	25
1.5.2 Carbono fijado (Cf).	26
1.5.3 Determinación del contenido de carbono en laboratorio	26
1.6 DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE <i>Hevea brasiliensis</i> Muell. Arg.	26
1.6.1 Clasificación taxonómica	26
1.6.2 Origen y distribución geográfica	26
1.6.3 Morfología	27
1.6.4 Ecología del cultivo	27
1.6.5 Clon FX 3864	28

1.7 AREAS SEMBRADAS DE CAUCHO EN COLOMBIA	28
1.8 ESTUDIOS DE CASO	29
1.8.1 Experiencias de biomasa en <i>Hevea brasiliensis</i>	29
1.8.2 Experiencias de carbono en <i>Hevea brasiliensis</i>	32
2. DISEÑO METODOLOGICO	34
2.1 LOCALIZACION	34
2.2 METODOLOGIA	35
2.2.1 Tamaño de muestra	35
2.2.2 Selección de árboles	36
2.2.3 Medición y apeo de árboles	37
2.2.4 Secado de muestras	39
2.2.5 Registro de datos	41
2.2.6 Estimación de la fracción de carbono	41
2.2.7 Determinación de materia seca	42
2.2.8 Determinación de biomasa seca aérea total	42
2.2.9 Determinación de biomasa seca aérea total por hectárea	43
2.2.10 Estimación del incremento medio anual de la biomasa seca aérea total por hectárea	43
2.2.11 Cálculo de carbono almacenado	43
2.2.12 Tasa de fijación de carbono	44
2.2.13 Determinación de modelos alométricos	44
2.2.14 Selección y validación de los mejores modelos	44
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46

3.1 MEDICION DE BIOMASA SECA AEREA TOTAL	46
3.1.1 Variables dasométricas para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	47
3.1.2 Biomasa seca aérea total para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	49
3.1.3 Biomasa seca aérea total en cada componente para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	50
3.2 CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA SECA AÉREA TOTAL	51
3.2.1 Contenido de carbono en cada componente de la biomasa seca aérea total en <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	51
3.2.2 Contenido de carbono y carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	52
3.3 MODELOS DE BIOMASA SECA AÉREA TOTAL	54
3.3.1 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	55
3.3.1.1 Validación del modelo seleccionado	57
3.3.1.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	57
3.3.2 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función de la altura total para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	58
3.3.2.1 Validación del modelo seleccionado	59
3.3.2.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función de la altura total para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	60
3.3.3 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del área basal para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	61

3.3.3.1 Validación de modelo seleccionado	62
3.3.3.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del área basal para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	63
3.3.4 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	64
3.3.4.1 Validación de modelo seleccionado	65
3.3.4.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro de copa para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	66
3.3.5 Comparación entre modelos alométricos para biomasa seca aérea total en la especie <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo	66
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFIA	71
ANEXOS	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Áreas sembradas de caucho en Colombia. 2006.	29
Tabla 2. Variables dasométricas para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	46
Tabla 3. Contenido de carbono y carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	52
Tabla 4. Descripción de los árboles muestreados de <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	55
Tabla 5. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	55
Tabla 6. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	57
Tabla 7. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función de la altura total para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	58
Tabla 8. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función de la altura total para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	60
Tabla 9. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del área basal para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	61
Tabla 10. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del área basal para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	63
Tabla 11. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	64

Tabla 12. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro de copa para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

66

Tabla 13. Comparación entre modelos alométricos para biomasa seca aérea total en función de las variables predictoras diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total, área basal y diámetro de copa, en la especie *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización de parcelas de estudio. Mocoa. 2006.	34
Figura 2. Parcela de evaluación de caucho <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	36
Figura 3. Medición de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) a los árboles de caucho <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	37
Figura 4. Peso por componentes en campo en árboles de caucho <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	39
Figura 5. Peso de muestras de hojas de caucho <i>Hevea brasiliensis</i> en laboratorio. Pasto. 2006.	40
Figura 6. Secado de muestras en laboratorio. Pasto. 2006.	41
Figura 7. Biomasa seca aérea total en cada componente para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	51
Figura 8. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $2,26623 * D.A.P. (cm.)^{1,37321}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - D.A.P. para <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	56
Figura 9. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $4,72832 * Altura total (m)^{1,28832}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - altura total para <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	59
Figura 10. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $2,67493 * Área basal (cm^2)^{0,686615}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - área basal para <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	62
Figura 11. Modelo alométrico simple de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $\exp(6,62795 - 14,0628 / Diámetro de copa (m^2))$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - diámetro de copa para <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	65

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis de suelo de la plantación de <i>Hevea brasiliensis</i> , en Mocoa departamento de Putumayo. 2006.	77
Anexo B. Análisis de contenido de carbono en cada componente de la biomasa seca aérea total de <i>Hevea brasiliensis</i> . Mocoa. 2006.	78
Anexo C. Datos de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total y área basal de los árboles de <i>Hevea brasiliensis</i> evaluados en campo. Mocoa. 2006.	79
Anexo D. Datos empleados para la obtención de los modelos alométricos para <i>Hevea brasiliensis</i> en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.	80
Anexo E. Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.	81
Anexo F. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 2,26623 \cdot \text{D.A.P. (cm.)}^{1,37321}$.	82
Anexo G. Análisis de Regresión – Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.	83
Anexo H. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 4,72832 \cdot \text{Altura total (m)}^{1,28832}$.	84
Anexo I. Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.	85
Anexo J. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 2,67493 \cdot \text{Área basal (cm}^2\text{)}^{0,686615}$.	86
Anexo K. Análisis de Regresión - Modelo Curva-S: $Y = \exp(a + b/X)$.	87
Anexo L. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = \exp(6,62795 - 14,0628/\text{Diámetro de copa (m}^2\text{)})$.	88

GLOSARIO

APEAR: Cortar o tumbar un árbol a ras del suelo.

ALOMETRIA: Estudia los patrones de crecimiento o sea la proporcionalidad entre razones específicas o relativas del crecimiento.

BIOMASA: Masa seca total, incluye follaje, ramas, tronco y raíces, pero excluye la hojarasca caída y la materia orgánica en descomposición.

CALENTAMIENTO GLOBAL: Aumento de la temperatura de la tierra debido al uso de combustibles fósiles y a otros procesos industriales que llevan a una acumulación de gases invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) en la atmósfera.

CARBONO: De símbolo C, es un elemento crucial para la existencia de los organismos vivos y que tiene muchas aplicaciones industriales importantes. Su número atómico es 6 y pertenece al grupo 14 del sistema periódico.

CARBONO ALMACENADO: Carbono que está acumulado en determinado ecosistema vegetal, se expresa en ton/C/ha^{-1} .

CARBONO FIJADO: Carbono que una unidad de área cubierta por vegetación tiene la capacidad de fijar en un período determinado, se expresa en $\text{ton/C/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$.

CLON: Este término se lo utiliza en caucho para designar los materiales mejorados y recomendados para su fomento con iguales características a su progenitor.

DEHISCENTE: Fruto cuyo pericarpio se abre naturalmente para que salga la semilla.

HEVEICULTOR: Persona que practica el cultivo de hevea o caucho.

LÁTEX: Líquido lechoso que circula por los vasos laticíferos y que brota cuando son cortados con la cuchilla de sangría.

LATICÍFERO: Que contiene o lleva látex.

SERVICIO AMBIENTAL: Se consideran todos los beneficios que prestan los árboles para mejorar el medio ambiente y a la vez generar ingresos económicos.

TRILOBULAR: Que tiene tres lóbulos.

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en la finca El Porvenir ubicada a 1°03'29" de latitud norte y 76°38'38" de longitud oeste, en la vereda Alto Eslabón, municipio de Mocoa, departamento de Putumayo; durante los meses de abril a diciembre del año 2006 y tuvo como fin cuantificar el carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en caucho *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. clon FX 3864, bajo una distancia de siembra de 2.8 m. entre árboles y 7 m. entre calles, de 15 años de establecido.

Las dos hectáreas de caucho se dividieron en parcelas de 250 m² (25 m x 10 m), de forma rectangular y se seleccionaron al azar ocho de éstas, luego se eligieron 17 árboles, cuyo diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) se aproximó al promedio general de las mismas, para ser apeados a ras del suelo, trozados y seccionados para clasificarlos por componentes: fuste, ramas (> 2.5 cm. de diámetro), ramitas (< 2.5 cm. de diámetro) y hojas.

Se tomaron muestras de 500 gramos de cada componente y se secaron en un horno a 80°C por 72 horas, para determinar el peso seco de los componentes. Posteriormente, se determinó en cada uno de éstos la fracción de carbono promedio, empleando el método de Schollenberger, que estimó 40.68% en el fuste, 39.81% en las ramas, 38.77% en las ramitas y 48.15% en las hojas.

De acuerdo a este estudio, la biomasa seca aérea total de los árboles fue de 79.8 ton/ha⁻¹, y la cantidad de carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* fue 32.45 ton/C/ha⁻¹.

Se modelaron ecuaciones de regresión que permitieran estimar la cantidad de biomasa seca aérea total que puede generar *Hevea brasiliensis*, relacionándola con el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), la altura total, el área basal y el diámetro de copa, para cuantificar la cantidad de carbono almacenado por esta especie.

Se determinó que el mejor modelo para cuantificar la cantidad de biomasa seca aérea total y el carbono almacenado, con el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) como variable predictora, fue el modelo alométrico de la forma: biomasa seca aérea total (kg.) = 2,26623*D.A.P. (cm.)^{1.37321}. La validación del modelo demostró que no hubo diferencia significativa entre la biomasa seca aérea total real y la biomasa seca aérea total estimada.

PALABRA CLAVE: *Hevea brasiliensis*, biomasa seca aérea total, carbono almacenado, modelos alométricos, cambio climático, protocolo de Kioto.

ABSTRACT

This investigation developed in the estate the Porvenir located 1°03'29" of north latitude and 76°38'38" of length west, in the path Alto Eslabon, Mocoa's municipality, department of Putumayo; during nine months of the year 2006 and had as end to quantify the carbon's storage in the dry air total biomass in rubber *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. clon FX 3864, under a distance of sowing of 2.8 m. between trees and 7 m. among streets, of 15 years of established.

Both hectares of rubber were in two places at the same time in plots of 250 m² (25 m x 10 m), of rectangular form and they selected at random eight of these, then there were chosen 17 trees, which diameter at a height of chest (D.A.P.) it came closer the general average of the same ones, to be dismantled to evenness of the soil, long pieces and cut to classify them for components: shaft, branches (> 2.5 cm. of diameter), twigs (<2.5 cm. of diameter) and leaves.

There took samples of 500 grams of every component and dried off in an oven to 80°C for 72 hours, to determine the dry weight of the components. Later, the fraction of carbon decided in each of these I mediate, using Schollenberger's method, which 40.68 % estimated in the shaft, 39.81 % in the branches, 38.77 % in the twigs and 48.15 % in the leaves.

In agreement to this study, the dry air total biomass of the trees was of 79.8 ton/ha⁻¹, and the quantity of carbon stored in the dry air total biomass in *Hevea brasiliensis* was 32.45 ton/C/ha⁻¹.

There modelled themselves equations of regression that were allowing to estimate the quantity of dry air total biomass that *Hevea brasiliensis* can generate, relating her to the diameter at a height of chest (D.A.P.), the total height, the area basal and the diameter of glass, to quantify the quantity of carbon stored by this species.

One determined that the best model to quantify the quantity of biomass air total drought and the stored carbon, with the diameter at a height of chest (D.A.P.) as predicting variable, he was the model allometric of the form: dry air total biomass (kg) = 2,26623*D.A.P. (cm.)^{1.37321}. The validation of the model demonstrated that there was no significant difference between the dry air total real biomass and the dry air total estimated biomass.

KEY WORD: *Hevea brasiliensis*, dry air total biomass, storage carbon, allometric models, climatic change, Kioto protocol.

INTRODUCCION

Las actividades humanas relacionadas con el cambio de uso del suelo y procesos industriales, han elevado las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, ocasionando el calentamiento global y la contaminación del planeta, generando transformaciones en los ecosistemas terrestres y acuáticos (incrementos en la temperatura de la superficie, precipitación, humedad relativa, vientos y volumen de los glaciares)¹.

En 1992 en la realización de la Cumbre de Río de Janeiro, 155 naciones interesadas por encontrar soluciones a la problemática del cambio climático y mitigar sus consecuencias, firmaron La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y posteriormente en diciembre de 1997 adoptaron el Protocolo de Kioto, para que los países desarrollados se comprometan a reducir las emisiones de gases causantes del efecto invernadero. Las oportunidades generadas por el Protocolo de Kioto y su Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), se han convertido en estrategias para el desarrollo sostenible de muchas regiones de nuestro país².

La especie *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. es una opción para materializar los objetivos específicos del MDL, ya que con la venta de Certificados de Reducción de Emisiones (CER's), se puede suplir parte de los costos de establecimiento y sostenimiento del período improductivo de esta especie y costos en el aprovechamiento de látex³. Además, el proceso de transformación agroindustrial de este cultivo es una cadena que presenta grandes potencialidades agroecológicas, generando empleo rural productivo, construyendo capital social, prestando servicios ambientales como la captura de carbono, cumpliendo

¹ GONZALEZ, M., *et al.* Cambio climático mundial : origen y consecuencias. En : Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León UANL. Monterrey, México. Vol. 6, no. 3 (julio-septiembre 2003); p. 379.

² MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Manual de tratados internacionales en medio ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá D.C.: Ministerio del Medio Ambiente, 2002. p. 191.

³ NIEVES, H. y BUITRAGO, C. Evaluación de los niveles de remoción de CO₂ efectuada por las plantaciones de caucho *Hevea brasiliensis* en Colombia. Bogotá, 2005. p. viii-ix. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

función protectora-productora en el suelo, cuencas hidrográficas, entre otros⁴.

En Mocoa departamento de Putumayo, los productores de caucho, tienen como alternativa después de siete años de establecido el cultivo, el aprovechamiento de látex, transformándolo en lámina de caucho natural; producto que es comercializado por la Asociación de Caucheros del Putumayo ASOCAP con la Federación Nacional de Productores de Caucho Natural FEDECAUCHO*.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de cuantificar el carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en caucho *Hevea brasiliensis* Muell.Arg. clon FX 3864, de 15 años de establecido, en la finca El Porvenir, vereda Alto Eslabón, municipio de Mocoa, departamento de Putumayo, desarrollando los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la biomasa seca aérea total de la especie *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.
- Cuantificar el carbono almacenado en la biomasa seca aérea total.
- Generar modelos alométricos para la determinación de biomasa seca aérea total.

⁴ FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE CAUCHO NATURAL. Cartilla promocional del cultivo de caucho natural. Bogotá D.C.: FEDECAUCHO-Fondo Nacional de Fomento Cauchero, 2006. p. 29.

* ENTREVISTA con José Díaz, secretario Asociación de Caucheros del Putumayo, ASOCAP. Villagarzón, Putumayo, 7 de abril de 2006.

1. MARCO TEORICO

1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y GASES EFECTO INVERNADERO (GEI)

El cambio climático es provocado por el calentamiento global, que a su vez tiene su origen total o parcial en el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, incidiendo en el incremento en la temperatura del planeta y cambios en el clima mundial, lo que a su vez se traduce en aumentos del nivel del mar, transformación de los ecosistemas, modificación de los pisos térmicos y trastornos de los patrones de lluvias y vientos⁵.

El efecto invernadero es un proceso natural, que consiste en la retención por acción de ciertos gases presentes en la atmósfera, de una determinada fracción de la radiación solar que incide sobre la tierra. Del total de energía radiada por el sol que alcanza el planeta, 30% es reflejada al espacio por las capas exteriores de la atmósfera y el 70% restante alcanza la superficie de la tierra. El planeta a su vez irradia esta energía de vuelta al espacio en forma de radiación de onda larga o infrarroja, manteniendo así el equilibrio térmico⁶.

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonados (HFC), perfluorocarbonados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), sin embargo se estima que el GEI que más influye en el calentamiento climático mundial, es el dióxido de carbono (CO₂)⁷. El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo, son considerados a nivel mundial como las fuentes netas de CO₂ a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global⁸.

⁵ GONZALEZ, M., *et al*, Op. cit., p. 379.

⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Efecto invernadero y cambio climático. [en línea]. [Bogotá, Colombia]. MAVDT, 2002 [citado, marzo 10 de 2006]. Disponible en Internet: URL:<http://www.minambiente.gov.co/viceministerios/ambiente/Mitigacion_cambio_climatico/preguntas_frecuentes/efecto_invernadero.asp>.

⁷ ORDOÑEZ, J. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAP, 1999. p. 8.

⁸ *Ibid.*, p. 10.

Según el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés)⁹, uno de los efectos más notorios de la perturbación del equilibrio natural del sistema climático, ha sido el aumento de la temperatura, que en la superficie ha aumentado $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ desde finales del siglo XIX, catalogando la última década del siglo XX como la más cálida y dentro de ella, 1998 el año con las temperaturas más altas.

1.2 PROTOCOLO DE KIOTO Y MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL)

El Protocolo de Kioto se adoptó en la Tercera Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en Kioto, Japón en diciembre de 1997¹⁰.

El Protocolo establece para los países desarrollados incluidos en el Anexo B obligaciones cuantificadas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En su conjunto, los países desarrollados deberán reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5.2%, para el período comprendido entre los años 2008 a 2012¹¹.

Para dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) el cálculo se hace respecto de la “línea de base” de las emisiones de cada país en 1990 y para hidrofluorocarbonados (HFC), perfluorocarbonados (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) en 1995¹².

En el Protocolo de Kioto se establecieron una serie de mecanismos que dan flexibilidad a las partes del Anexo B (países industrializados) para el cumplimiento de sus compromisos de reducciones de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de un modo costo-efectivo. Estos mecanismos son: 1) Mecanismo de desarrollo limpio (MDL); 2) Implementación conjunta (IC) y 3) Comercio de emisiones (CE)¹³.

⁹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Cambio climático 2001 : la base científica. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Ginebra, Suiza: IPCC, 2001. p. 3.

¹⁰ MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Op. cit., p. 191.

¹¹ Ibid., p. 191.

¹² Ibid., p. 191.

¹³ BLACK, T., *et al.* Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia. Santafé de Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente, 2000. p. 36.

En el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), las partes no incluidas en el Anexo B, es decir los países no industrializados, podrán alojar proyectos de reducción o captura de gases de efecto invernadero (GEI), que generen Reducciones de Emisiones Certificadas (CER's). Dichas reducciones certificadas pueden ser adquiridas por aquellas Partes que cuentan con compromisos de reducción de emisiones y ser contabilizadas con el fin de contribuir al logro de sus metas¹⁴.

Los requisitos para que un país no industrializado participe en el MDL, es ser Parte del Protocolo de Kioto y haber designado una autoridad nacional para el mecanismo, Colombia ha designado al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial como autoridad nacional para el Mecanismo de Desarrollo Limpio¹⁵.

Existen múltiples oportunidades para que actores públicos y privados participen en proyectos que reduzcan o capturen las emisiones de gases causantes del efecto invernadero (GEI). Estas actividades pueden ser: energía renovable, transporte, generación, uso y distribución eficiente de energía, cambio a combustibles alternativos, manejo de residuos sólidos y actividades forestales¹⁶.

La Novena Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP 9 - 2003), realizada en Milán (Italia), se constituyó en un importante avance para la participación de proyectos forestales dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), pues en ella se definieron las modalidades y procedimientos que regirán este tipo de actividades durante el primer período de compromiso (2008- 2012)¹⁷.

Dado que la vegetación puede sufrir alteraciones de tipo natural (incendios, inundaciones, plagas, enfermedades, etc) y/o antrópico (sabotaje, hurto, etc), se afirma que la captura de CO₂ por la vegetación no es permanente, este ha sido uno de los principales puntos debatidos para los proyectos forestales; por tanto, en la COP 9 (2003) se decidió que los proyectos forestales podrían generar dos tipos de certificados: los tCER's o certificados temporales y los ICER's o certificados a largo plazo; su diferencia radica, en que los primeros expiran al final del período de compromiso para el cual fueron aprobados, mientras que los segundos expiran al final del período de acreditación del proyecto. El período de acreditación para proyectos forestales puede ser de 20 años con dos posibilidades de renovación, o

¹⁴ Ibid., p. 37.

¹⁵ Ibid., p. 38.

¹⁶ Ibid., p. 38.

¹⁷ CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO (CMCC). Novena conferencia de las Partes (COP 9). Decisión 19/COP 9. Milán, Italia: CMCC, 2003. p.10.

de 30 años sin posibilidades de renovación. Antes de su expiración, estos certificados deben renovarse o reemplazarse, por otro tipo de unidades válidas para cumplir con los compromisos de reducción¹⁸.

1.3 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES (PSA)

El pago por servicios ambientales (PSA) es un mecanismo flexible y adaptable a diferentes condiciones, que pretende un pago o compensación directo por el mantenimiento o provisión de un servicio ambiental específico para lograr la sostenibilidad, por parte de los usuarios del servicio, el cual se destina a los proveedores. Un pago por servicios ambientales está orientado a incentivar a los propietarios a implementar prácticas que tengan como uno de sus propósitos, conservar los recursos naturales; es una forma de aceptar la responsabilidad de la sociedad hacia el mantenimiento sustentable de los ecosistemas. El cambio de uso de la tierra, la protección de biodiversidad, el almacenamiento de carbono, la protección de la belleza del paisaje y los servicios hidrológicos, son considerados servicios ambientales¹⁹.

1.4 BIOMASA EN ECOSISTEMAS FORESTALES

La biomasa se define como la suma total de la materia viva que se encuentra en un ecosistema en un momento determinado y se expresa en términos de peso seco, masa o volumen. Esta biomasa puede utilizarse para estimar las cantidades potenciales de varios productos y combustibles, determinación de eficiencia del rodal y en las relaciones suelo- agua-plantas y nutrientes con la productividad del sitio²⁰.

Con la preocupación que ha traído el cambio climático, el estudio de la biomasa ha cobrado importancia, por lo cual, los investigadores han realizado estudios a fondo para determinar la biomasa de los bosques y así conocer la cantidad de carbono almacenado en ella, que podría liberarse en caso de aprovechamiento o quema y la cantidad de carbono que podría removerse con el crecimiento de nuevos bosques²¹.

¹⁸ Ibid., p. 10.

¹⁹ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO) Y RED LATINOAMERICANA DE COOPERACION TECNICA EN MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS (REDLACH). Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas. [en línea]. [Santiago, Chile]. FAO, 2004. [citado, marzo 11 de 2006]. Disponible en Internet: URL:<<http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/infopinpsa.pdf>>.

²⁰ GAYOSO, J.; GUERRA, J. y ALARCON, D. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2002. p.6.

²¹ BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. Roma: FAO, 1997. p. 5.

1.4.1 Metodología para estimar biomasa. En la estimación de biomasa se emplean dos métodos: 1) los métodos directos o destructivos, y 2) los métodos indirectos; los primeros consisten en cosechar una muestra y pesarla para luego aplicar ecuaciones de corrección que permitan conseguir un peso promedio o cantidad de materia seca por unidad de área, los segundos se basan en el cálculo del valor de biomasa en toneladas de materia seca por unidad de área a partir de datos de inventariados de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura, volumen y área basal. En los dos métodos los valores obtenidos se extrapolan a una hectárea²².

1.4.2 Modelos para estimación de la 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 a la altura de pecho (D.A.P.), altura, área basal y volumen)²³.

El procedimiento para proponer los modelos se basa en construir gráficos de puntos entre la variable dependiente y cada una de las variables independientes, para probar a partir de ellos, cuales modelos o ecuaciones de regresión explican mejor la relación entre las variables. Después se debe aplicar un análisis de varianza y escoger el o los modelos de mejor ajuste con la ayuda de algunos estadígrafos²⁴.

Los estadígrafos más conocidos y ampliamente usados en el campo forestal son: el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustado), el coeficiente de variación (CV%), la raíz del cuadrado medio del error o error estándar de estimación (RMSE) y el índice de furnival (IF), donde los valores del R^2 y del R^2 -ajustado deben ser altos, en tanto que los valores del CV% y del IF deben procurarse bajos²⁵.

1.5 CARBONO EN BIOMASA

1.5.1 Carbono almacenado (Ca). Hace referencia al carbono que está acumulado en determinado ecosistema vegetal. Tiene en cuenta criterios como

²² Ibid., p. 5.

²³ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. 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, Sede Medellín, 2003. p. 90.

²⁴ 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. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1999. p. 5.

²⁵ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 106.

tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que se basan en datos de biomasa basados en volúmenes por hectárea de inventarios forestales. El Carbono almacenado se expresa en ton/C/ha⁻¹ ²⁶.

1.5.2 Carbono fijado (Cf). Se refiere al carbono que una unidad de área cubierta por vegetación tiene la capacidad de fijar en un período determinado. Se expresa en ton C/ ha⁻¹/año⁻¹ ²⁷.

1.5.3 Determinación del contenido de carbono en laboratorio. El contenido de carbono en la biomasa seca, se puede determinar por métodos cuantitativos en laboratorio, con la utilización de analizadores CHN y/o cromatógrafos de gases²⁸. También se puede determinar por el método cualitativo, denominado Método de Schollenberger²⁹.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.

1.6.1 Clasificación taxonómica. Según Compagnon (1998)³⁰, la especie *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. tiene la siguiente clasificación taxonómica:

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Euphorbiales

Familia: Euphorbiaceae

Genero: *Hevea*

Especie: *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.

1.6.2 Origen y distribución geográfica. *Hevea brasiliensis* es originario de la amazonía, en un área que cubre parte de Brasil, Bolivia, Perú, Colombia, Guyana y Surinam. El caucho se encuentra distribuido desde México hasta Sao Paulo en América tropical, en África desde Mozambique hasta Madagascar, en el sur de la

²⁶ SEGURA, M. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis* en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Heredia (Costa Rica), 1997. p. 28. Trabajo de grado (Lic. Ingeniero Forestal). Universidad Nacional Autónoma de Heredia. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Escuela de Ciencias Ambientales.

²⁷ Ibid., p. 28.

²⁸ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 104.

²⁹ ARISTIZABAL, J. y GUERRA, A. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero-cacao-plátano. Bogotá, 2002. p.58. Tesis de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

³⁰ COMPAGNON, P. El caucho natural : biología, cultivo y producción. Montpellier, Francia: Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo-CIRAD, 1998. p. 15.

India, Ceilán, en todo el sudeste de Asia, las Filipinas, Indonesia y Nueva Guinea³¹.

Las plantaciones comerciales de caucho en el mundo se ubican entre los 24 grados de latitud norte en la China hasta 25 grados de latitud sur en el estado de Sao Paulo en Brasil, estando la mayoría ubicadas entre el ecuador y los 16 grados de latitud norte o sur³².

1.6.3 Morfología. Compagnon (1998)³³, menciona las siguientes características morfológicas de la especie *Hevea brasiliensis* :

- Las plantaciones son árboles injertados, de aspecto homogéneo, su tallo es cilíndrico, alcanzando un perímetro de 50 centímetros al sexto año y máximo de un metro al final de su vida económica y una altura cercana a los 25 metros.
- El interés económico del caucho es el sistema laticífero, los vasos se encuentran en todas las partes de la planta, siendo el tronco el que presenta mayor número de éstos. Sus hojas trifoliadas están dispuestas en el extremo de un gran pecíolo, el ciclo vegetativo del caucho es anual, cada año pierde totalmente sus hojas, reconstruyéndolas posteriormente en su totalidad.
- Sus flores en racimos son pequeñas y de color amarillo, las que se presentan después de la defoliación natural de la planta. Su fruto es una cápsula trilobular, dehiscente, con una semilla en cada lóbulo. Las semillas llegan a su madurez de cuatro a cinco meses después de la floración, éstas son expulsadas por una apertura seca y ruidosa del fruto, miden dos centímetros de longitud, revestidas de un tegumento coriáceo, café brillante, decorado con manchas blanquecinas.

1.6.4 Ecología del cultivo. *Hevea brasiliensis* se cultiva desde el nivel del mar hasta los 1.200 m.s.n.m.; en un rango de temperatura entre los 20°C y 30°C, siendo la temperatura óptima 25°C; temperaturas inferiores a 20°C o mayores a 35°C, limitan notablemente el crecimiento y la producción³⁴.

La precipitación debe oscilar entre los 1.800 a 2.500 mm. y bien distribuidas durante el año, sin la presencia de épocas secas o de alta precipitación muy

³¹ TORRES, C. Manual para el cultivo del caucho en la amazonía. Florencia, Caquetá : Plan Nacional de Desarrollo Alternativo PLANTE, 1999. p. 7.

³² Ibid., p. 27.

³³ COMPAGNON, P., Op. cit., p. 25-34.

³⁴ TORRES, C., Op. cit., p. 28.

definidas y prolongadas, debido a que se puede presentar retrasos en el crecimiento de la planta y en la producción de látex³⁵.

La humedad relativa debe fluctuar entre el 70% y el 90%, una humedad en promedio del 50% puede afectar la producción, no siendo adecuados estos niveles en la refoliación del árbol³⁶. El brillo solar debe estar entre 1.500 a 2.500 horas al año, inferiores a 1.200 horas promedio al año puede afectar notablemente el contenido de caucho seco en el látex³⁷.

No debe sembrarse en zonas o regiones de alta acción de los vientos, debido a que el tallo se fractura fácilmente, ocasionando grandes pérdidas en plantaciones adultas³⁸. El suelo debe tener una pendiente no superior al 25%, siendo ideal suelos planos o ligeramente ondulados, con profundidad efectiva entre 1 – 1,5 metros, de textura franco arenosa y franco arcillosa, buena capacidad de retención de humedad, bien drenados y preferiblemente ácidos, con un pH entre 4,1 y 6³⁹.

1.6.5 Clon FX 3864. Este clon es originario de Fordlandia Brasil, proviene del cruce de PB 86 x FB 38; presenta ramificación escasa, poco follaje y ramas hacia arriba; además es resistente al hongo *Microcyclus ulei*, causante del mal suramericano de las hojas⁴⁰.

1.7 AREAS SEMBRADAS DE CAUCHO EN COLOMBIA

De acuerdo a registros acopiados por la Federación Nacional de Productores de Caucho Natural FEDECAUCHO (2006)⁴¹, de las asociaciones de productores de caucho departamentales y regionales, de entidades de cooperación internacional y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; en Colombia se cuenta con 15.774 hectáreas sembradas al primer semestre de 2006. En la actualidad se cultiva caucho en 20 departamentos del país, el principal con área sembrada es Caquetá con el 36%, seguido por Santander (18%), Antioquia (12%), Putumayo (8%) y Meta (5%); del área sembrada. (Tabla 1).

³⁵ Ibid., p. 28.

³⁶ Ibid., p. 30.

³⁷ Ibid., p. 29.

³⁸ Ibid., p. 29.

³⁹ Ibid., p. 30-31.

⁴⁰ FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE CAUCHO NATURAL. Selección y mejoramiento del Caucho *Hevea* : material genético del caucho. Bogotá D.C.: FEDECAUCHO, 2004. p. 8.

⁴¹ FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE CAUCHO NATURAL. Cartilla promocional del cultivo de caucho natural, Op. cit., p. 5-6.

Tabla 1. Áreas sembradas de caucho en Colombia. 2006.

Departamento	Area sembrada (ha⁻¹)
Antioquia	1.941
Arauca	67
Bolívar	50
Caldas	728
Caquetá	5.628
Casanare	70
Córdoba	606
Cauca	120
Cundinamarca	361
Guaviare	772
Huila	5
Meta	747
Nariño	30
Norte de Santander	165
Putumayo	1.370
Quindio	2
Santander	2.886
Tolima	210
Valle del Cauca	9
Vichada	7
Total	15.774

Fuente: FEDECAUCHO, 2006.

1.8 ESTUDIOS DE CASO

1.8.1 Experiencias de biomasa seca en *Hevea brasiliensis*

En Taranagar (India) en 1995, realizaron un estudio para estimar la biomasa seca aérea total en árboles de caucho de cinco años de edad o menos, realizaron un muestreo destructivo a 98 árboles, 50 del clon RRIM 600 y 48 del clon RRIM 118. En esta investigación se generó la ecuación: Biomasa seca aérea total = 2,278479 (circunferencia^{2,6823}), con un R² de 97%, para árboles con una circunferencia entre 16 cm. y 32 cm. ⁴².

En otro estudio en Agartala (India) en 1996, hicieron un muestreo destructivo a 34 árboles de caucho del clon RRIM 600 con edades entre los 7 y 14 años, para estimar la biomasa seca aérea total. En esta investigación se generaron las ecuaciones biomasa seca aérea total= 20,2 (circunferencia^{2,249}), con un R² de 96% y biomasa seca aérea total = 24,849 (e^{0,0343circunferencia}), con un R² de 97%, ajustándose mejor a los datos la regresión exponencial; estas ecuaciones son

⁴² CHAUDHURI, D., *et al.* Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression method: relation between girth and biomass. En : Indian Journal of Natural Rubber Research. Vol. 8, no. 2 (1995); p. 128.

válidas únicamente para estimar biomasa seca aérea total del clon RRIM 600 en Agartala (India) y para árboles con circunferencia hasta 95 cm.⁴³.

En el año 2000 en el municipio de Oratórios (Brasil), realizaron un estudio donde estimaron la biomasa seca aérea total en caucho clon IAN 873 de 12 años de establecido, los árboles implantados en un suelo oxisol, obtuvieron 62.50 cm. de circunferencia a la altura de pecho, una altura total de 16.32 m. y la biomasa seca aérea total fue 248.64 kg. y en individuos sembrados en un suelo ultisol, la circunferencia a la altura de pecho fue 51 cm., la altura total de 12.55 m. y la biomasa seca aérea total estimada fue 123.6 kg.⁴⁴.

En Manaus (Brasil) en el 2002, desarrollaron una ecuación a través de un muestreo destructivo de 24 árboles, para estimar la biomasa seca aérea total en caucho de siete años de establecido. En esta investigación se generó la ecuación: biomasa seca aérea total = $-3,84 + 0,528 (\text{área basal}) + 0,001(\text{área basal}^2)$, con un R^2 de 99%⁴⁵.

En el 2004 en Veracruz (México) realizaron un muestreo destructivo de 20 árboles de caucho del clon IAN 710, para obtener una ecuación que determine la biomasa seca aérea total de esta especie en plantaciones de 8,14 y 31 años en Tezonapa y 14, 16, 19 y 23 años en Uxpanapa. En este estudio los autores determinaron la ecuación biomasa seca aérea total = $(-442.17 + 0.0087D.A.P.^2 * altura + 27.48 * altura) + (-106.27 + 6.95 * D.A.P.)$, con un R^2 de 86%, como válida para estimar biomasa seca aérea total del clon IAN 710 de 15 cm. de diámetro normal en adelante⁴⁶.

En la región de Papaloapan, en el norte del Estado de Oaxaca, en México, en el año 2005, obtuvieron una ecuación para estimar la biomasa seca aérea total en caucho clon IAN-710, en plantaciones con edades entre 1 y 42 años, con base en el diámetro normal (DN). Emplearon un muestreo destructivo de 28 árboles de esta especie con diámetro normal (DN) de 10 cm. a 40 cm. La biomasa seca aérea total de los árboles varió de 89.74 kg. en árboles de 10 cm. de diámetro

⁴³ DEY, S., *et al.* Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression method : relation of girth and biomass for nature trees of clone RRIM 600. En : Indian Journal of Natural Rubber Research. Vol. 9, no. 1 (1996); p. 40-42.

⁴⁴ CUNHA, T., *et al.* Influência da diferenciação pedológica no desenvolvimento da seringueira no município de Oratórios, Minas Gerais. En: Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília, Brasil. Vol. 35, no. 1 (2000); p. 154.

⁴⁵ SCHROTH, G., *et al.* Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. En : Forest Ecology and Management. No. 163 (2002); p. 140.

⁴⁶ MONROY, C. y NAVAR, J. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomas de *Hevea brasiliensis* Muell.Arg., en Veracruz, México. En: Madera y Bosques. Nuevo León, México. Vol 10, no. 2 (2004); p. 32-36.

normal a 807.06 kg. en árboles de 40 cm. de diámetro normal. En este estudio se generó la ecuación logarítmica: $\text{Log biomasa seca aérea total} = -3.1426 + 2.69273 \text{ Log DN}$, con un R^2 de 98%⁴⁷.

En el 2005 en diferentes plantaciones de caucho en Colombia, realizaron un muestreo destructivo de 39 árboles de esta especie, para determinar la acumulación de biomasa seca total, obteniendo en El Retorno (9 años) entre 21.06 y 16.81 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Milán (11 años) entre 4.55 y 3.8 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Cimitarra (11 años) entre 19.20 y 15.16 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Puerto López (12 años) entre 9 y 7.40 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Florencia (13 años) entre 3.41 y 2.85 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Doncello (19 años) entre 5.44 y 4.48 ton/ha⁻¹/año⁻¹ y en Doncello (36 años) entre 11.37 y 8.59 ton/ha⁻¹/año⁻¹. En este estudio se determinó el modelo lineal bilogarítmico para estimar biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* $\text{Log biomasa seca aérea total} = (2,5956 * \text{Log CAP}) - 2,3858$; con R^2 de 97.93% y el modelo lineal bilogarítmico $\text{Log biomasa seca subterránea total} = (2.3569 * \text{Log CAP}) - 2,6624$; con un R^2 de 94.15% para estimar biomasa seca subterránea⁴⁸.

En otro estudio en el 2006 en Veracruz (México) estimaron 91.2 ton/ha⁻¹ de biomasa seca aérea total en caucho clon IAN 710 de 15 años de sembrado, en árboles con un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) promedio de 22.9 cm. y 23.2 m. promedio de altura total⁴⁹.

En el Valle de Piranga, municipio de Oratorios, en el estado de Minas Gerais (Brasil) en el año 2006, en plantaciones de caucho clon IAN 873 de 20 años de establecido, hicieron un muestreo destructivo de 9 árboles, 3 de la parte superior de la ladera (suelo oxisol), 3 de la parte media de esta (suelo ultisol) y 3 de la parte inferior (suelo ultisol), para estimar la biomasa seca aérea total, obteniendo en árboles de la parte superior un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 23.5 cm. y 256.4 kg. árbol⁻¹, en individuos de la parte media un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 24.5 cm. y 262.9 kg. árbol⁻¹ y en árboles de la parte inferior 20.7 cm. de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) y 183.1 kg. árbol⁻¹; la biomasa seca aérea total en promedio es 234.5 kg. árbol⁻¹ estimando 117.2 ton/ha⁻¹⁵⁰.

⁴⁷ ROJO, G., *et al.* Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. en el Estado de Oaxaca, México. En: Agrociencia. Texcoco, México. Vol. 39, no. 4 (julio-agosto 2005); p. 449.

⁴⁸ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 100.

⁴⁹ MONROY, C.; AGUIRRE, O. y JIMENEZ, J. Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. en Veracruz, México. En: Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. Vol. 9, no. 3 (julio-septiembre 2006); p. 266.

⁵⁰ SANTANA DO CARMO, C., *et al.* Biomassa e estoque de carbono em seringais implantados na Zona de Mata de Minas Gerais. En: ALVARENGA, A. y SANTANA DO CARMO, C. Seqüestro de carbono: quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais EPAMIG, 2006. p. 86-87.

En esta misma zona y utilizando la misma metodología, se realizó un estudio similar en plantaciones de caucho clon RRIM 600 de 15 años de sembrado, para estimar la biomasa seca aérea total, obteniendo en árboles de la parte superior un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 22.9 cm. y 278 kg. árbol⁻¹, en individuos de la parte media un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 22.5 cm. y 239 kg. árbol⁻¹ y en árboles de la parte inferior 20.7 cm. de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) y 278 kg. árbol⁻¹; la biomasa seca aérea total en promedio fue 265 kg. árbol⁻¹ estimando 132.5 ton/ha⁻¹ ⁵¹.

En el 2006 en Paranapoema, estado de Paraná (Brasil) realizaron un estudio donde cuantificaron la biomasa seca total en caucho clon PB 235 de 4, 6 y 15 años de sembrado, estimando 12 ton/ha⁻¹; 34 ton/ha⁻¹ y 146 ton/ha⁻¹ de biomasa seca total respectivamente⁵².

1.9.2 Experiencias de carbono en *Hevea brasiliensis*

En Guatemala, la Fundación Solar en el año 2000, desarrolló un muestreo del carbono fijado por las plantaciones de caucho para determinar el valor de fijación que tiene este sistema productivo. La fijación de carbono en este estudio fue de 75 ton/C/ha⁻¹ en árboles, 4 ton/C/ha⁻¹ hojarasca, 50 ton/C/ha⁻¹ suelos y 16 ton/C/ha⁻¹ raíces. Los resultados indican, que este cultivo contiene unas 145 toneladas de carbono por hectárea (con un rango de ± 15 toneladas)⁵³.

En el 2000 en Pucallpa (Perú) determinaron la fijación de carbono en plantaciones de caucho de 30 años de establecido, en este estudio los resultados de la fijación de carbono son los siguientes: árboles 66.6 ton/C/ha⁻¹, hojarasca 6.47 ton/C/ha⁻¹, suelo 78.20 ton/C/ha⁻¹, raíces 0.35 ton/C/ha⁻¹ y sotobosque 0.91 ton/C/ha⁻¹. Estos resultados muestran que este cultivo acumula 152.5 toneladas de carbono por hectárea⁵⁴.

⁵¹ Ibid., p. 89-90.

⁵² DE OLIVEIRA, D., *et al.* Carbono na biomassa e na respiração do solo em plantio comercial de seringueiras no Paraná. En: ALVARENGA, A. y SANTANA DO CARMO, C. Seqüestro de carbono: quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais EPAMIG, 2006. p. 208.

⁵³ FUNDACION SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso de suelo. Guatemala: Lilian Márquez, editora, 2000. p. 23.

⁵⁴ ALEGRE, J.; AREVALO, L. y RICSE, A. Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonía peruana. [en línea]. [Pucallpa, Perú]. FAO-ICRAF-INIA, 2000. [citado, octubre 6 de 2006]. Disponible en Internet: URL:<www.fao/WAICENT/FAOINF/AG/AGAP/FRG/español/document/boterusso/18htm-25k>

En el estudio desarrollado por Schroth, *et al* (2002)⁵⁵ en Brasil, determinaron que la rata de acumulación de carbono por *Hevea brasiliensis* en plantación es 2.5 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹.

En el año 2005 en los departamentos de Caquetá, Guaviare, Meta y Santander, evaluaron en plantaciones de caucho de diferentes edades, la remoción de CO₂, obteniendo diferentes valores en cada lugar; en El Retorno (9 años) entre 31.59 y 25.22 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Milán (11 años) entre 6.82 y 5.7 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Cimitarra (11 años) entre 28.8 y 22.75 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Puerto López (12 años) entre 13.49 y 11.1 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Florencia (13 años) entre 5.11 y 4.27 ton/ha⁻¹/año⁻¹; en Doncello (19 años) entre 8.15 y 6.72 ton/ha⁻¹/año⁻¹ y en Doncello (36 años) entre 17.06 y 12.89 ton/ha⁻¹/año⁻¹⁵⁶.

En los municipios de Cimitarra, Puerto Parra y Landázuri en el área denominada “Cararé-Opón” en el departamento de Santander en el 2006, evaluaron en plantaciones de caucho en edades de 9, 10, 11, 17 18 y 19 años, la remoción de CO₂ obteniendo 30.15 ton/ha⁻¹/año⁻¹; 31.90 ton/ha⁻¹/año⁻¹; 32.14 ton/ha⁻¹/año⁻¹; 24.30 ton/ha⁻¹/año⁻¹; 23.03 ton/ha⁻¹/año⁻¹ y 21.86 ton/ha⁻¹/año⁻¹ respectivamente⁵⁷.

En el año 2006 en el estado de Minas Gerais (Brasil), en plantaciones de caucho clon IAN 873 de 20 años de establecido, obtuvieron en la biomasa seca aérea total, 105.4 kg. C árbol⁻¹ que representan 52.7 ton/C/ha⁻¹ y en plantaciones del clon RRIM 600, de 15 años de sembrado, estimaron en la biomasa seca aérea total, 119.4 kg. C árbol⁻¹ para un total de 59.7 ton/C/ha⁻¹⁵⁸.

En el estudio realizado en Paranapoema, estado de Paraná (Brasil) en el 2006 en caucho clon PB 235 de 4, 6 y 15 años de establecido, determinaron 7 ton/C/ha⁻¹, 21 ton/C/ha⁻¹ y 90 ton/C/ha⁻¹ respectivamente en la biomasa seca total⁵⁹.

⁵⁵ SCHROTH, G., *et al*, Op. cit., p. 146.

⁵⁶ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 101.

⁵⁷ GONZALEZ, A. Remoción de CO₂ y secuestro de carbono en las plantaciones de caucho *Hevea brasiliensis* en el proyecto forestal Cararé - Opón. Bogotá, 2006. p. 119-120. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

⁵⁸ SANTANA DO CARMO, C., *et al*, Op. cit., p. 87, 91.

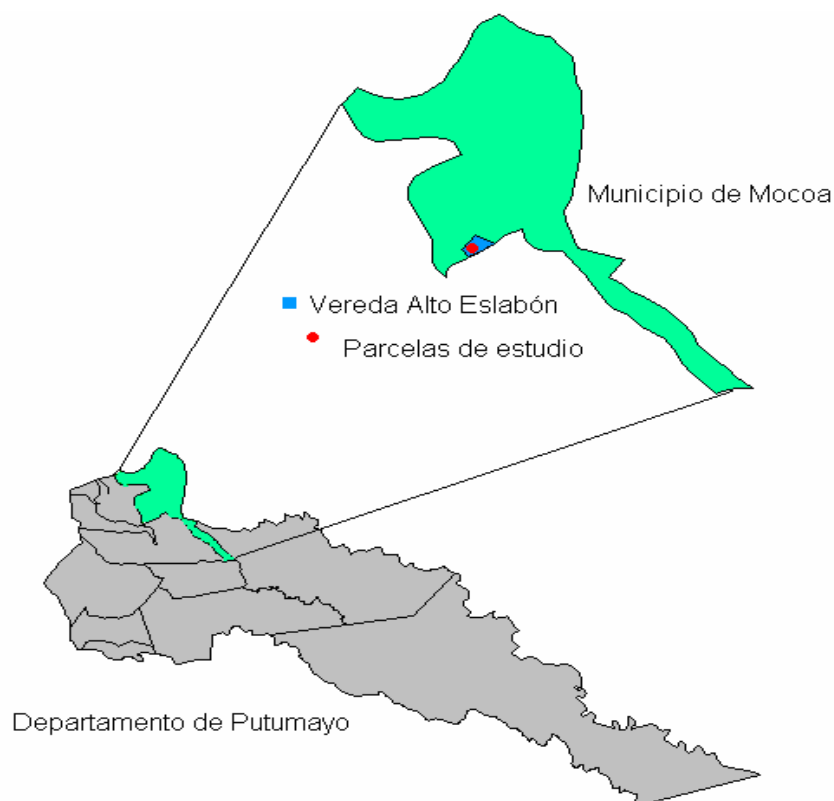
⁵⁹ DE OLIVEIRA, D., *et al*, Op. cit., p. 208.

2. DISEÑO METODOLOGICO

2.1 LOCALIZACION

Este trabajo se realizó en la finca El Porvenir, vereda Alto Eslabón, municipio de Mocoa, departamento de Putumayo (Figura 1). El cultivo de caucho se encuentra ubicado a $1^{\circ}03'29''$ de latitud norte y $76^{\circ}38'38''$ de longitud oeste, a una altura de 550 m.s.n.m.; con temperatura promedio de 25°C , precipitación media anual de 4000 mm. y humedad relativa promedio del 90%. El área de estudio pertenece según la clasificación de Holdridge a la zona de vida bosque muy húmedo tropical (Bmh-T)⁶⁰.

Figura 1. Localización de parcelas de estudio. Mocoa. 2006.



Fuente: Plan de desarrollo del municipio de Mocoa, 2004 -2007.

⁶⁰ CERON, E. Plan de Desarrollo del Municipio de Mocoa 2004-2007: "Gente que quiere a Mocoa". Mocoa, Putumayo : s.e., 2004. p. 8.

El municipio de Mocoa está localizado en el piedemonte amazónico, al noroccidente del departamento del Putumayo, sobre la margen derecha del río Caquetá y limita al norte con el departamento del Cauca, al sur con los municipios de Villagarzón y Puerto Caicedo, al occidente con el municipio de San Francisco y al oriente con el municipio de Puerto Guzmán y el departamento de Cauca⁶¹.

El cultivo de caucho corresponde al clon FX 3864, ocupa un área de dos hectáreas, tiene 15 años de establecido, esta sembrado en la unidad fisiográfica de mesón, topografía ligeramente ondulada, a una distancia de siembra de 2.8 metros entre árboles x 7 metros entre calles (510 árboles/ha⁻¹). Según el análisis de suelos, realizado en el año 2006, los árboles de *Hevea brasiliensis* se encuentran establecidos en un suelo de textura franco arcillo-arenosa y de pH 4.4 (Anexo A).

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Tamaño de muestra. Para calcular el tamaño de la muestra, se utilizó la formula utilizada por Andrade e Ibrahim (2003)⁶².

$$n = \frac{IM \times At}{Ap \times 100}$$

Donde:

n: Número de parcelas a trabajar.

IM: Intensidad de muestreo (%).

At: Área total de la plantación (m²).

Ap: Área de la parcela de muestreo (m²).

MacDiken (1997)⁶³ recomienda un tamaño de parcela de 250 m² para una densidad de 510 árboles ha⁻¹, de acuerdo a lo anterior:

$$n = \frac{10\% \times 20.000 \text{ m}^2}{250 \text{ m}^2 \times 100}$$

n = 8 parcelas

⁶¹ Ibid., p. 8.

⁶² ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles? En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Costa Rica, Vol. 10, no. 39-40 (2003); p. 111.

⁶³ MACDIKEN, K., Op. cit., p. 54.

El cultivo de dos hectáreas de caucho se dividió en parcelas de 250 m² (25 m. x 10 m.) de forma rectangular, demarcadas con jalones y plástico de color amarillo y se seleccionaron al azar ocho de éstas, de manera temporal, que se evaluaron en este estudio (Figura 2). La forma de la parcela, se determinó de acuerdo a la distribución espacial de los árboles⁶⁴. Cada parcela involucró 12 árboles de caucho, para un total de 96 árboles evaluados (Anexo C).

Figura 2. Parcela de evaluación de caucho *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

Para realizar el trabajo de campo, se empleó la metodología desarrollada por Zapata, Colorado y Del Valle (2003)⁶⁵, en bosques primarios intervenidos y secundarios, de la cuenca media del río Porce, en el departamento de Antioquia.

2.2.2 Selección de árboles. Los árboles seleccionados para el apeo y utilizados en la estimación de las ecuaciones de biomasa aérea total para *Hevea brasiliensis* fueron aquellos cuyo diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) se aproximó al promedio general de las ocho parcelas, de manera aleatoria en todos los tamaños. En este estudio se escogieron 17 árboles, considerando que para determinar la

⁶⁴ ANDRADE, H. e IBRAHIM, M., Op. cit., p. 111.

⁶⁵ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 92.

biomasa aérea total en un lugar específico, 15 árboles son suficientes para desarrollar modelos alométricos⁶⁶.

2.2.3 Medición y apeo de árboles. Una vez elegidos los árboles, se realizaron 2 tipos de mediciones, las primeras con el árbol en pie y las segundas una vez apeado. Previo al apeo de los árboles, se registraron datos como: número de árbol, diámetro a la altura de pecho (D.A.P. diámetro tomado a 1.30 m sobre el suelo), altura total, área basal y diámetro de copa (Figura 3).

Figura 3. Medición de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) a los árboles de caucho *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

Para medir el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) se utilizó cinta diamétrica, para la medición de altura, clinómetro y cinta métrica. El diámetro de copa se midió con la cinta métrica, a lo largo en dirección norte-sur (A-B) y a lo ancho en

⁶⁶ CALDERON, S., *et al.* Inventarios forestales para contabilidad de carbono. Manual de procedimientos. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2002. p. 23.

dirección de oriente a occidente (C-D), el área así tomada se asume como un elipse y se determina con la siguiente formula⁶⁷:

$$A= \frac{1}{2} AB \times \frac{1}{2} CD \times \pi$$

Donde:

A: Área o cobertura (m²)

AB: Longitud norte – sur (m)

CD: Longitud este - oeste (m)

Los árboles se cortaron a ras del suelo y para determinar la masa seca de los individuos, los árboles se trozaron y seccionaron para clasificarlos por componentes: fuste, ramas (> 2.5 cm de diámetro), ramitas (< 2.5 cm de diámetro) y hojas. En el pesaje por componentes, las ramitas y hojas se pesaron por separado. Posteriormente se pesaron las ramas gruesas, las cuales se trozaron en el momento de ser llevadas a la báscula de 100 kg. (Figura 4).

Para determinar el volumen del fuste, este se cubico en trozas de 2 metros hasta el punto de inserción de la copa, a las cuales se les tomó la longitud, diámetro en cada extremo y el peso de cada una de estas, para estimar su volumen por medio de la formula de Smalian⁶⁸.

$$Vt = \frac{(D_1 + D_2)^2 \times \pi \times L}{4}$$

Donde:

Vt: Volumen total de la troza (m³)

D₁: Diámetro del extremo grueso de la troza (m)

D₂: Diámetro del extremo delgado de la troza (m)

L: Largo de la sección o troza (m)

⁶⁷ MOLINA, A. y NARVÁEZ, W. Sistema agroforestal Laurel de cera *Myrica pubescens* intercalado con cultivos transitorios en el municipio de Pasto. San Juan de Pasto, 2000. p. 34. Trabajo de grado (Ingeniero Agroforestal). Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Agrícolas. Programa de Ingeniería Agroforestal.

⁶⁸ ROJAS, J. Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 2005. p. 11. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

Figura 4. Peso por componentes en campo en árboles de caucho *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

2.2.4 Secado de muestras. Para determinar el peso seco de los componentes, en agosto del año 2006, se tomaron muestras de 500 gramos (Figura 5), empacadas en bolsas de papel debidamente marcadas, que se llevaron al Laboratorio de Diagnóstico Fitosanitario del Instituto Colombiano Agropecuario ICA Seccional Nariño, para ser secadas en un horno a 80°C por 72 horas, hasta alcanzar un peso constante (Figura 6). Una vez se secaron las muestras del horno se procedió a pesar una por una en peso seco, en una balanza con exactitud de 0.01 g.

La masa seca de cada partición por árbol, se determinó con la relación masa seca a masa verde de las muestras en cada partición. La masa seca de cada árbol se obtuvo al sumar todas las masas secas de las particiones de cada árbol⁶⁹.

Para determinar la densidad básica de la madera, de cada troza se obtuvieron secciones o discos, que se colocaron al horno para secado y luego medir el espesor de estos (cuatro mediciones para sacar el promedio), posteriormente la superficie transversal fue calcada en papel para estimar el área del disco con

⁶⁹ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 92.

ayuda del planímetro, la densidad básica de la madera, se calculó empleando la siguiente fórmula⁷⁰:

$$D = \frac{M}{Vol}$$

$$Vol = A_D \times E_D$$

Donde:

D: Densidad de la madera (g cm.³)

M: Peso del disco seco (g)

Vol: Volumen del disco (cm.³)

A_D: Área del disco (cm.²)

E_D: Espesor del disco (cm.)

Figura 5. Peso de muestras de hojas de caucho *Hevea brasiliensis* en laboratorio. Pasto. 2006.



Fuente: Este estudio.

⁷⁰ ROJAS, J., Op. cit., p. 11.

Figura 6. Secado de muestras en laboratorio. Pasto. 2006.



Fuente: Este estudio.

2.2.5 Registro de datos. El registro de la información recopilada en terreno respecto a los individuos apeados se realizó en un formulario (Anexo D) y posteriormente se ingresó a la base de datos, que administra la información tanto de terreno como del laboratorio.

2.2.6 Estimación de la fracción de carbono. La fracción de carbono en los componentes (fuste, ramas, ramitas y hojas), se determinó utilizando el método de Schollenberger, en el laboratorio especializado de bromatología de la Universidad de Nariño.

El método de Schollenberger fue adaptado por el laboratorio de suelos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA – Tibaitatá para determinar carbono total en material vegetal. Este método consiste en la oxidación del carbono por medio del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de ácido sulfúrico concentrado⁷¹.

⁷¹ ARISTIZABAL, J. y GUERRA, A., Op. cit., p. 58.

Para facilitar la digestión debe calentarse la muestra hasta obtener una temperatura de 155°C aproximadamente durante 10 minutos. El exceso de Cr₂O₇ es determinado por titulación con solución estándar de FeSO₄, la cantidad de carbono oxidado es calculada cuantificando el Cr₂O₇ reducido. El contenido de carbono en la muestra, es determinado mediante la siguiente ecuación⁷² :

$$\% C = \frac{(\text{meq de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - \text{meq de FeSO}_4) \times 0.03 \times 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

2.2.7 Determinación de materia seca. Para determinar el porcentaje de materia seca, se utilizó la fórmula propuesta por Rojas⁷³:

$$\text{MS \%} = \frac{\text{PSM}}{\text{PFM}} \times 100$$

Donde:

MS %: Porcentaje de materia seca

PSM: Peso seco de la muestra (g.)

PFM: Peso fresco de la muestra (g.)

2.2.8 Determinación de biomasa seca aérea total. La biomasa seca aérea total, se determinó utilizando la siguiente fórmula⁷⁴:

$$B = \frac{(\text{PFC} \times \text{PSM})}{\text{PFM}}$$

Donde:

B: Biomasa seca aérea total (kg.)

PFC: Peso fresco tomado en campo (kg.)

PSM: Peso seco de la muestra (g.)

PFM: Peso fresco de la muestra (g.)

⁷² Ibid., p. 59.

⁷³ ROJAS, J., Op. cit., p. 10.

⁷⁴ Ibid., p. 10.

2.2.9 Determinación de biomasa seca aérea total por hectárea. Para determinar la biomasa aérea total por hectárea, se empleó la fórmula utilizada por Dzib⁷⁵:

$$\text{Batha}^{-1} = \frac{\text{Bparb} \times \text{Arbha}^{-1}}{1000}$$

Donde:

Batha⁻¹ : Biomasa seca aérea total por hectárea (ton/ha⁻¹)

Bparb : Biomasa seca aérea total promedio por árbol (kg.)

Arbha⁻¹ : Densidad de árboles por hectárea.

2.2.10 Estimación del incremento medio anual de la biomasa seca aérea total por hectárea. El IMA de la biomasa seca aérea total por hectárea, se estimó con la siguiente fórmula⁷⁶:

$$\text{IMABat} = \frac{\text{Batha}^{-1}}{\text{E}}$$

Donde:

IMABat : Incremento medio anual de la biomasa seca aérea total por hectárea (ton/ha⁻¹/año⁻¹)

Batha⁻¹ : Biomasa seca aérea total por hectárea (ton/ha⁻¹)

E : Edad de los árboles (años)

2.2.11 Cálculo de carbono almacenado. El cálculo del carbono almacenado en esta especie, se realizó con la fórmula⁷⁷:

$$\text{CA} = \text{Bsat} \times \text{fc}$$

⁷⁵ DZIB, B. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 2003. p. 50. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

⁷⁶ Ibid., p. 51.

⁷⁷ Ibid., p. 51.

Donde:

CA: Carbono almacenado (ton/ha⁻¹)
Bsat: Biomasa seca aérea total (ton/ha⁻¹)
fc: Fracción de carbono.

2.2.12 Tasa de fijación de carbono. La tasa de fijación de carbono, se estimó con la siguiente fórmula⁷⁸ :

$$CF = \frac{CA}{E}$$

Donde:

CF: Tasa de fijación de carbono (ton/C/ha⁻¹/año⁻¹)
CA : Carbono almacenado (ton/ha⁻¹)
E : Edad de los árboles (años)

2.2.13 Determinación de modelos alométricos. A partir de los datos obtenidos en el muestreo, se modelaron ecuaciones de regresión que permitieron estimar la cantidad de biomasa seca aérea total que puede generar *Hevea brasiliensis*, relacionándola con el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), la altura total, el área basal y el diámetro de copa e indirectamente la cantidad de carbono acumulado por este compartimiento. Para la construcción de los modelos de regresión, se utilizó el programa estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1, con el que se probaron varios modelos considerando la biomasa seca aérea total como variable dependiente y diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total, área basal y diámetro de copa como variables independientes.

2.2.14 Selección y validación de los mejores modelos. Para seleccionar los modelos de mejor ajuste, se tuvo en cuenta estadígrafos como el coeficiente de determinación (R²), error estándar de estimación o raíz del cuadrado medio del error (RMSE) y la suma de cuadrados del error (PRESS), así como la lógica biológica del modelo⁷⁹. Además, se realizó la validación de las ecuaciones mediante una prueba de comparación de medias (prueba de t) entre los valores

⁷⁸ Ibid., p. 52.

⁷⁹ 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, Costa Rica, 1999. 119 p. Trabajo de grado (Magister Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

estimados y los reales, según lo recomendado por Moret y Ruiz (1998)⁸⁰.

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 dos desviaciones estándar⁸¹.

⁸⁰ MORET, A. 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. Mérida, Venezuela. Vol. 42, no. 2 (1998); p. 190.

⁸¹ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 106.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 MEDICIÓN DE BIOMASA SECA AEREA TOTAL

En la tabla 2 se presentan los resultados de las mediciones directas de biomasa efectuadas en campo a través del muestreo destructivo de los 17 árboles de *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo; estas variables corresponden a diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total del árbol, área basal, diámetro de copa, biomasa seca del fuste, biomasa seca de las ramas, biomasa seca de las ramitas, biomasa seca de las hojas y biomasa seca aérea total.

Tabla 2. Variables dasométricas para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Número parcela	Número árbol	D.A.P. (cm)	Altura total (m)	Área basal (cm ²)	Diámetro de copa (m ²)	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa
						seca fuste (kg/arb.)	seca fuste (ton/ha ⁻¹)	seca ramas (kg/arb.)	seca ramas (ton/ha ⁻¹)	seca ramitas (kg/arb.)	seca ramitas (ton/ha ⁻¹)	seca hojas (kg/arb.)	seca ramitas (ton/ha ⁻¹)	seca aérea total (kg/arb.)	seca aérea total (ton/ha ⁻¹)
1	8	22.5	15	397.6	9.1	117.2	59.8	33.7	17.2	11.8	6.0	5.9	3.0	168.6	86.0
1	9	22.5	16	397.6	9.3	117.5	59.9	33.8	17.2	11.8	6.0	5.9	3.0	169.0	86.2
2	2	20	15	314.2	8.5	98.9	50.4	28.5	14.5	10.0	5.1	5.0	2.5	142.3	72.6
2	9	20	15	314.2	8.4	96.9	49.4	27.9	14.2	9.8	5.0	4.9	2.5	139.4	71.1
3	5	20	16	314.2	8.6	103.2	52.6	29.7	15.1	10.4	5.3	5.2	2.7	148.5	75.7
3	12	19.5	15	298.6	8.2	91.5	46.7	26.3	13.4	9.2	4.7	4.6	2.4	131.7	67.2
4	7	19.5	13	298.6	8.1	89.7	45.7	25.8	13.2	9.0	4.6	4.5	2.3	129.1	65.8
4	12	20	15	314.2	8.3	100.8	51.4	29.0	14.8	10.1	5.2	5.1	2.6	145.0	73.9
5	5	22	15	380.1	8.6	107.9	55.0	31.0	15.8	10.9	5.5	5.4	2.8	155.2	79.2
5	10	22.5	15	397.6	9.1	113.9	58.1	32.8	16.7	11.5	5.8	5.7	2.9	163.9	83.6
6	3	22	15	380.1	8.8	104.4	53.3	30.1	15.3	10.5	5.4	5.3	2.7	150.3	76.6
6	7	22.5	15	397.6	9.1	114.6	58.4	33.0	16.8	11.5	5.9	5.8	2.9	164.9	84.1
7	4	23	16	415.5	9.5	114.9	58.6	33.1	16.9	11.6	5.9	5.8	3.0	165.3	84.3
7	9	23	16	415.5	9.4	113.1	57.7	32.6	16.6	11.4	5.8	5.7	2.9	162.8	83.0
7	11	23	15	415.5	9.4	115.1	58.7	33.1	16.9	11.6	5.9	5.8	3.0	165.7	84.5
8	10	24	16	452.4	9.6	123.6	63.1	35.6	18.1	12.5	6.4	6.2	3.2	177.9	90.7
8	11	24	17	452.4	9.9	126.2	64.4	36.3	18.5	12.7	6.5	6.4	3.2	181.6	92.6
Promedio		21.8	15.3	373.9	8.9	108.8	55.5	31.3	16.0	10.9	5.6	5.5	2.8	156.5	79.8

Fuente: Este estudio.

3.1.1 Variables dasométricas para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo

El menor valor de la variable diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) en los individuos cosechados es de 19.5 cm., su máximo valor es 24 cm. y el valor promedio fue igual a 21.8 cm. Monroy, Aguirre y Jiménez (2006)⁸² reportaron 22.9 cm. como diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) promedio en plantaciones de 15 años del clon IAN 710 en Veracruz (México).

Santana do Carmo, *et al* (2006)⁸³ en Minas Gerais (Brasil) en el clon RRIM 600 de 15 años de establecido, reportaron un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 20.7 cm. en árboles establecidos en la parte baja de la ladera, valor que se asemeja al obtenido en este estudio. Sin embargo González (2006)⁸⁴ en el área denominada “Cararé-Opón” (Santander) estima a la edad de 15 años un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) de 29.7 cm.

La altura de los árboles apeados, varió entre 13 m. y 17 m., y el valor promedio fue 15.3 m. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Monroy y Navar (2004)⁸⁵ de 15.7 m. en plantaciones de 8 años en Veracruz (México) del clon IAN 710. Monroy, Aguirre y Jiménez (2006)⁸⁶ reportaron una altura promedio de 23.2 m. para la misma zona y en este mismo clon, en plantaciones de 15 años. Sin embargo De Oliveira, *et al* (2006)⁸⁷ en Paraná (Brasil), obtuvieron en el clon PB 235 de 15 años de establecido, una altura promedio de 18 m.

El área basal en los individuos cosechados, presentaron valores entre 298,6 cm² y 452,4 cm² con un valor promedio de 373.9 cm²; estos resultados extrapolados a una hectárea, representan un área basal de 19.06 m²/ha⁻¹. Monroy, Aguirre y Jiménez (2006)⁸⁸ reportaron un área basal de 16.8 m²/ha⁻¹ en una plantación del clon IAN 710 de 15 años en Veracruz (México), lo cual es inferior a lo obtenido en el presente estudio.

⁸² MONROY, C.; AGUIRRE, O. y JIMENEZ, J., Op. cit., p. 266.

⁸³ SANTANA DO CARMO, C., *et al*, Op. cit., p. 89.

⁸⁴ GONZALEZ, A., Op. cit., p. 86.

⁸⁵ MONROY, C. y NAVAR, J., Op. cit., p. 34.

⁸⁶ MONROY, C.; AGUIRRE, O. y JIMENEZ, J., Op. cit., p. 266.

⁸⁷ DE OLIVEIRA, D., *et al*, Op. cit., p. 208.

⁸⁸ MONROY, C.; AGUIRRE, O. y JIMENEZ, J., Op. cit., p. 266.

El diámetro de copa en los árboles apeados, obtuvo valores entre 8.1 y 9.9 m² con un valor promedio de 8.9 m², resultado similar al obtenido por Monroy y Navar (2004)⁸⁹ de 9.3 m² en plantaciones de 14 años en Veracruz (México) en el clon IAN 710.

Los resultados obtenidos en este estudio, al ser comparados con los trabajos desarrollados en Veracruz (México)⁹⁰, Minas Gerais (Brasil)⁹¹, Paraná (Brasil)⁹² y Santander (Colombia)⁹³, difieren en algunas variables, porque estos sitios no son ambiental ni geográficamente iguales, pues poseen diferentes suelos, temperaturas, precipitaciones, radiación, brillo solar, velocidad y dirección de los vientos, etc. que generan disimilitudes en la rata de crecimiento de los árboles.

Además el material genético (clon) influye en los resultados, porque cada clon posee características fenotípicas propias, que lo diferencian el uno del otro⁹⁴, también el manejo de la plantación, la densidad de siembra de los árboles y la edad de éstos, se relacionan directamente con los datos reportados por los autores.

El volumen promedio del fuste en los individuos cosechados, es de 0.37 m³ árbol⁻¹, oscilando entre 0.26 m³ árbol⁻¹ y 0.59 m³ árbol⁻¹; datos extrapolados a una hectárea, representan 188.7 m³ de volumen de fuste. Monroy y Navar (2004)⁹⁵ reportan entre 52 m³/ha⁻¹ y 162 m³/ha⁻¹ de volumen de fuste en el clon IAN 710 en Veracruz (México).

La densidad promedio de la madera es de 0.49 g/cm³, variando entre 0.48 g/cm³ y 0.50 g/cm³; valor igual al reportado por Brown (1997)⁹⁶, para esta especie en américa tropical.

⁸⁹ MONROY, C. y NAVAR, J., Op. cit., p. 32.

⁹⁰ Ibid., p. 31.

⁹¹ SANTANA DO CARMO, C., *et al*, Op. cit., p. 81.

⁹² DE OLIVEIRA, D., *et al*, Op. cit., p. 203.

⁹³ GONZALEZ, A., Op. cit., p. 9.

⁹⁴ BERMUDEZ, P. Establecimiento de una biofábrica heveícola y actividades complementarias desarrolladas en la oficina de asistencia técnica agropecuaria – UMATA en el municipio de Paratebueno, departamento de Cundinamarca. Ibagué, 2005. p. 26. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal.

⁹⁵ MONROY, C. y NAVAR, J., Op. cit., p. 34.

⁹⁶ BROWN, S., Op. cit., p.45.

3.1.2 Biomasa seca aérea total para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo

La biomasa seca aérea total promedio fue 156.5 kg. árbol⁻¹, los datos se encuentran en un rango entre 129.1 kg. árbol⁻¹ y 181.6 kg. árbol⁻¹. La biomasa seca aérea total de los árboles pesados en campo fue de 2660.5 kg. (2.66 ton).

En este estudio la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* fue de 79.8 ton/ha⁻¹, variando entre 65.8 ton/ha⁻¹ y 92.6 ton/ha⁻¹; estimándose un incremento medio anual de biomasa seca aérea total de 5.3 ton/ha⁻¹/año⁻¹, en un rango de 4.3 ton/ha⁻¹/año⁻¹ y 6.2 ton/ha⁻¹/año⁻¹.

La biomasa seca del fuste representa 55.5 ton/ha⁻¹; la biomasa seca de las ramas 16 ton/ha⁻¹; biomasa seca de las ramitas 5.6 ton/ha⁻¹ y la biomasa seca de las hojas 2.8 ton/ha⁻¹.

Santana do Carmo, *et al* (2006)⁹⁷, reportaron una biomasa seca aérea total de 265 kg. árbol⁻¹, para un total de 132.5 ton/ha⁻¹ en el clon RRIM 600, de 15 años de establecido en Oratorios, Minas Gerais (Brasil); Cunha, *et al* (2000)⁹⁸ en la misma zona, pero en plantaciones del clon IAN 873 de 12 años de edad, en árboles de 19.89 cm. de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) y 16.32 m. de altura, estimaron 248.64 kg. de biomasa seca aérea total.

Estos resultados al ser comparados con este estudio, representan valores superiores de biomasa aérea total, que se pueden atribuir a las características genéticas de los clones, a las condiciones agroecológicas y edáficas en que se establecieron las plantaciones y al manejo silvicultural de éstas.

Los resultados obtenidos en este estudio, se atribuyen a las características fenotípicas del clon FX 3864 que presenta ramificación escasa y poco follaje⁹⁹, que influye relativamente en la producción de biomasa seca aérea total y en la cantidad de carbono almacenado en ésta.

También, se debe tener en cuenta, que la densidad y la edad de los árboles influyen directamente sobre la cantidad de biomasa seca aérea total de estos por hectárea, razones que se pueden corroborar en el estudio realizado por Montero y

⁹⁷ SANTANA DO CARMO, C., *et al*, Op. cit., p. 89.

⁹⁸ CUNHA, T., *et al*, Op. cit., p. 154.

⁹⁹ FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE CAUCHO NATURAL. Selección y mejoramiento del Caucho Hevea : material genético del caucho, Op. cit., p.8.

Kanninen (2002)¹⁰⁰ en *Terminalia amazonia*; que a una densidad de 1600 árboles ha⁻¹ la biomasa seca fue mayor que a 1,111 árboles ha⁻¹. Esto determina como la densidad de los árboles es una variable que contribuye en el aumento de la biomasa seca aérea total de los árboles por hectárea, siendo complementada por la edad¹⁰¹.

3.1.3 Biomasa seca aérea total en cada componente para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo

El fuste representa el mayor aporte de biomasa seca con un 69.5% de la biomasa seca aérea total, siguiendo en orden las ramas (20%), ramitas (7%) y hojas (3.5%) (Figura 7). Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Nieves y Buitrago (2005)¹⁰², en el estudio realizado en diferentes plantaciones en Colombia de esta especie, donde el porcentaje promedio de fuste fue 74.77%, ramas 13.52%, ramitas 7.96% y hojas 3.78%.

El porcentaje de las ramas de este estudio, coincide con el reportado por Monroy y Navar (2004)¹⁰³, 20.36% en Veracruz (México) en el clon IAN 710, en árboles de 14 años, también el porcentaje de las hojas, es similar al reportado por Rojo, *et al* (2005)¹⁰⁴, 3.4% en Oaxaca (México) en el mismo clon, en individuos con diámetro la altura de pecho (D.A.P.) promedio de 20 cm.

La contribución del follaje de *Hevea brasiliensis* 3.5% a la biomasa seca aérea total, es relativamente bajo, si se compara con los datos para otras especies *Alnus glabrata*, *Chlethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* Schl., *Quercus peduncularis*, *Liquidambar macrophylla* e *Inga* sp., donde el follaje representa 15 a 20 % de la biomasa seca aérea total¹⁰⁵.

¹⁰⁰ MONTERO, M. y KANNINEN, M. Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. Turrialba, Costa Rica. Vol. 39-40 (2002); p. 54.

¹⁰¹ DZIB, B., Op. cit., p. 76.

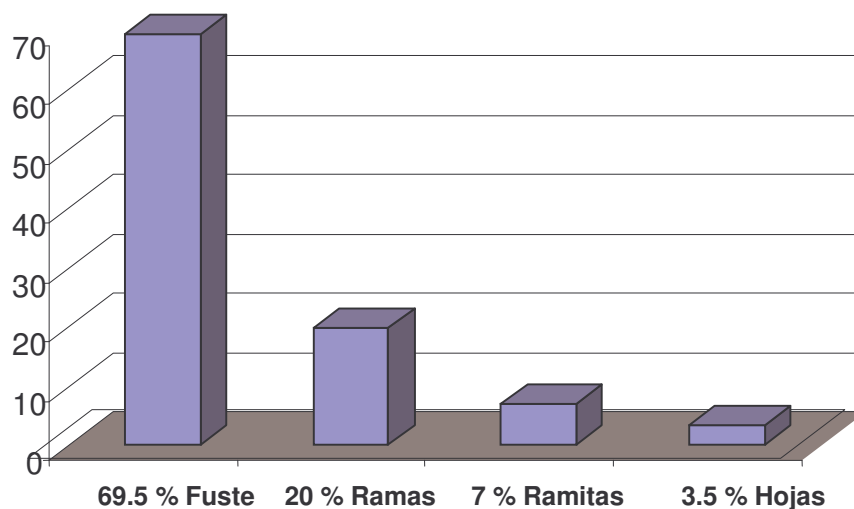
¹⁰² NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 67.

¹⁰³ MONROY, C. y NAVAR, J., Op. cit., p. 33.

¹⁰⁴ ROJO, G., *et al*, Op. cit., p. 452.

¹⁰⁵ ACOSTA, M., *et al*. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. En: Agrociencia. Texcoco, México. Vol. 36, no. 6 (noviembre-diciembre 2002); p. 730.

Figura 7. Biomasa seca aérea total en cada componente para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.



Fuente: Este estudio.

3.2 CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA SECA AÉREA TOTAL

3.2.1 Contenido de carbono en cada componente de la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo

El contenido de carbono en cada componente de la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo, resultó ser más bajo de lo que generalmente reseñan diversos autores¹⁰⁶⁻¹⁰⁷, el promedio por componente fue de 38.77% en las ramitas, 39.81% en las ramas, 40.68% en el fuste y 48.15% en las hojas (Anexo B); pero estos resultados son validos por haber sido determinados por medio de un método cualitativo en laboratorio¹⁰⁸.

Los resultados obtenidos permiten concebir más amplio el rango del contenido de carbono en tejidos vegetales, sin restringirse al 50% teórico, argumentando lo

¹⁰⁶ BROWN, S., Op. cit., 55 p.

¹⁰⁷ MACDIKEN, K., Op. cit., 87 p.

¹⁰⁸ ARISTIZABAL, J. y GUERRA, A., Op. cit., p. 58.

expuesto por la FAO (2000)¹⁰⁹, que el contenido de carbono en la biomasa de las plantas es generalmente constante para cualquier comunidad vegetal y está entre 42 y 48%.

Los datos obtenidos en este trabajo, concuerdan con el estudio realizado por Nieves y Buitrago (2005)¹¹⁰, donde la cantidad promedio de carbono almacenado en la biomasa seca aérea total de esta especie fue de 43.96% en el fuste, 43.89% en las ramas totales y 47.1% en hojas, resultados que se obtuvieron en un analizador C-H-N 600 LECO.

3.2.2 Contenido de carbono y carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 3 se presenta el contenido de carbono y carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo.

Tabla 3. Contenido de carbono y carbono almacenado en la biomasa seca aérea total en *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Número parcela	Número árbol	Biomasa seca			Carbono almacenado			Biomasa seca			Carbono almacenado			Carbono almacenado		
		Contenido		de carbono almacenado	Contenido		de biomasa almacenado	Contenido		de biomasa almacenado	Contenido		de biomasa almacenado	Contenido		de biomasa almacenado
		(kg/arb.)	fuste (%)		(kg/arb.)	ramas (%)		(kg/arb.)	(%)		(kg/arb.)	(%)		(kg/arb.)	(%)	
1	8	117,2	40,68	24,3	33,7	39,81	6,8	11,8	38,77	2,3	5,9	48,15	1,4	68,5	34,9	
1	9	117,5	40,68	24,4	33,8	39,81	6,9	11,8	38,77	2,3	5,9	48,15	1,5	68,7	35,0	
2	2	98,9	40,68	20,5	28,5	39,81	5,8	10,0	38,77	2,0	5,0	48,15	1,2	57,8	29,5	
2	9	96,9	40,68	20,1	27,9	39,81	5,7	9,8	38,77	1,9	4,9	48,15	1,2	56,7	28,9	
3	5	103,2	40,68	21,4	29,7	39,81	6,0	10,4	38,77	2,1	5,2	48,15	1,3	60,3	30,8	
3	12	91,5	40,68	19,0	26,3	39,81	5,3	9,2	38,77	1,8	4,6	48,15	1,1	53,5	27,3	
4	7	89,7	40,68	18,6	25,8	39,81	5,2	9,0	38,77	1,8	4,5	48,15	1,1	52,4	26,7	
4	12	100,8	40,68	20,9	29,0	39,81	5,9	10,1	38,77	2,0	5,1	48,15	1,2	58,9	30,0	
5	5	107,9	40,68	22,4	31,0	39,81	6,3	10,9	38,77	2,1	5,4	48,15	1,3	63,1	32,2	
5	10	113,9	40,68	23,6	32,8	39,81	6,7	11,5	38,77	2,3	5,7	48,15	1,4	66,6	34,0	
6	3	104,4	40,68	21,7	30,1	39,81	6,1	10,5	38,77	2,1	5,3	48,15	1,3	61,1	31,2	
6	7	114,6	40,68	23,8	33,0	39,81	6,7	11,5	38,77	2,3	5,8	48,15	1,4	67,0	34,2	
7	4	114,9	40,68	23,8	33,1	39,81	6,7	11,6	38,77	2,3	5,8	48,15	1,4	67,2	34,3	
7	9	113,1	40,68	23,5	32,6	39,81	6,6	11,4	38,77	2,3	5,7	48,15	1,4	66,1	33,7	
7	11	115,1	40,68	23,9	33,1	39,81	6,7	11,6	38,77	2,3	5,8	48,15	1,4	67,3	34,3	
8	10	123,6	40,68	25,6	35,6	39,81	7,2	12,5	38,77	2,5	6,2	48,15	1,5	72,3	36,9	
8	11	126,2	40,68	26,2	36,3	39,81	7,4	12,7	38,77	2,5	6,4	48,15	1,6	73,8	37,6	
Prom		108,8	40,68	22,57	31,3	39,81	6,36	10,9	38,77	2,17	5,5	48,15	1,35	63,6	32,45	

Fuente: Este estudio.

¹⁰⁹ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Roma, Italia: FAO, 2000. p. 31.

¹¹⁰ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 90.

En el fuste se almacenan 22.57 ton/C/ha⁻¹; en las ramas 6.36 ton/C/ha⁻¹; en las ramitas 2.17 ton/C/ha⁻¹ y en las hojas 1.35 ton/C/ha⁻¹.

La cantidad promedio de carbono almacenado en la biomasa aérea total en *Hevea brasiliensis* fue de 32.45 ton/C/ha⁻¹ variando entre 26.7 ton/C/ha⁻¹ y 37.6 ton/C/ha⁻¹; resultados que se ajustan dentro del rango de contenido de carbono por encima del suelo de los ecosistemas forestales tropicales (25 y 250 ton C ha⁻¹) reportado por Kanninen (2001)¹¹¹.

De acuerdo a los resultados de este estudio, se estima una fijación de carbono de 2.16 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹, en un rango de 1.78 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹ y 2.16 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹, datos que según la literatura, coinciden con el potencial de fijación de carbono por plantaciones tropicales, que oscila entre 2.7 y 9.6 toneladas por hectárea año¹¹².

En Pucallpa (Perú) Alegre; Arévalo y Ricse (2000)¹¹³, en plantaciones de 30 años de *Hevea brasiliensis*, estimaron en la biomasa seca aérea total 66.6 ton/C/ha⁻¹, cifra que comparada con los resultados de este estudio 32.40 ton/C/ha⁻¹ en 15 años de edad, coincide con la tasa de fijación de carbono anual.

Schroth, *et al* (2002)¹¹⁴, reporta una tasa de acumulación de carbono en la biomasa aérea en plantaciones de *Hevea brasiliensis* en Manaus (Brasil) de 2.5 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹, valor similar al estimado en este estudio 2.16 ton/C/ha⁻¹/año⁻¹.

Estos resultados, se pueden atribuir a las condiciones climáticas y edáficas de las zonas donde se realizaron los estudios, Manaus (Brasil) y Pucallpa (Perú), al igual que Mocoa (Colombia), geográficamente pertenecen a la amazonia, además las prácticas de manejo de las plantaciones en Perú y Colombia, son similares a las que se realizan en Brasil y el material genético (clon) recomendado para estas zonas, son los clones brasileños FX 3864, IAN 710, IAN 873 resistentes al mal suramericano de las hojas ocasionado por el hongo *Microcyclus ulei*.

¹¹¹ KANNINEN, M. Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: potencial para América Latina. En: Conferencia electrónica: Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales (LEAD-PFI-ECONF-L). [En línea] [Turrialba, Costa Rica]. CATIE, 2001. [citado, octubre 6 de 2006]. Disponible en Internet: URL: <<http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo4.htm>>.

¹¹² ORREGO, S.; JARAMILLO, L. y LOAIZA, L. Venta de servicios ambientales : posibilidades y limitaciones para el departamento del Chocó. Quibdó; Chocó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico "John Von Neumanm", 1998. p. 16.

¹¹³ ALEGRE, J.; AREVALO, L. y RICSE, A., Op. cit.

¹¹⁴ SCHROTH, G., *et al*, Op. cit., p. 142.

Sin embargo en el trabajo realizado por Santana do Carmo, *et al* (2006)¹¹⁵ en Oratorios, Minas Gerais (Brasil) en el clon RRIM 600 de 15 años, estimaron en la biomasa aérea total, 119.4 kg./C/árbol⁻¹ para un total de 59.7 ton/C/ha⁻¹, resultado superior en relación, con los obtenidos en este estudio.

Resultados atribuibles al promedio de carbono almacenado por componente de 38.77% en las ramitas, 39.81% en las ramas, 40.68% en el fuste y 48.15% en las hojas, como también, que las especies tienden a presentar tasas de crecimiento superiores, dependiendo de las buenas prácticas de manejo a las cuales se encuentren sometidas y en su mayoría al material genético de la plantación y porque estos resultados indican que el carbono almacenado por hectárea, depende de la densidad y la edad de los árboles, teniendo que a mayor densidad de árboles por hectárea se obtendrá mayor carbono almacenado por unidad de área.

Con los resultados de este estudio, se estima, que en un árbol de caucho *Hevea brasiliensis* clon FX 3864, la mayor cantidad de carbono almacenado se presenta en un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) mayor o igual a 24 cm., en un periodo de 15 años. Se puede observar que la cantidad de biomasa seca aérea total y carbono almacenado tienden a estabilizarse a medida que la edad aumenta (incremento en el D.A.P.), 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 madurez¹¹⁶.

3.3 MODELOS DE BIOMASA SECA AEREA TOTAL

Los árboles presentaron un promedio diamétrico de 21.8 cm., una altura total promedio de 15.3 m, un área basal de 373.9 cm² promedio, un diámetro de copa promedio de 8.9 m² y una biomasa seca aérea total promedio de 156.5 kg. árbol⁻¹.

La desviación estándar de cada variable en los árboles muestreados presenta una moderada dispersión de los valores respecto al promedio. Los valores de los coeficientes de variación son relativamente bajos debido a la homogeneidad de los datos en todas las variables evaluadas (Tabla 4).

¹¹⁵ SANTANA DO CARMO, C., *et al*, Op. cit., p. 91.

¹¹⁶ CIESLA, W. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Roma, Italia: FAO, 1996. p. 55.

Tabla 4. Descripción de los árboles muestreados de *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. estandar	Coef. variación (%)
D.A.P. (cm)	21.8	19.5	24	1.57	7.22%
Altura total (m)	15.3	13	17	0.85	5.55%
Area basal (cm ²)	373.9	298.6	452.4	53.28	14.25%
Diámetro de copa (m ²)	8.9	8.1	9.9	0.54	6.1%
Biomasa seca aérea total (kg)	156.5	129.1	181.6	15.43	9.86%

Fuente: Este estudio.

3.3.1 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 5, se presenta el modelo con mejor ajuste para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.); en el modelo se observó la presencia de una observación remota “outliers” que presentó problemas de residuales estandarizados superiores a dos desviaciones estándar y por tanto fue descartado.

Tabla 5. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Modelo	a	b	R ²	RMSE	PRESS
Y = a*X ^b	2.26623	1.37321	92.7	0.0008	0.012

Y : Biomasa seca aérea total (kg); a y b: Coeficientes de regresión; X : D.A.P. (cm)

R² : Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

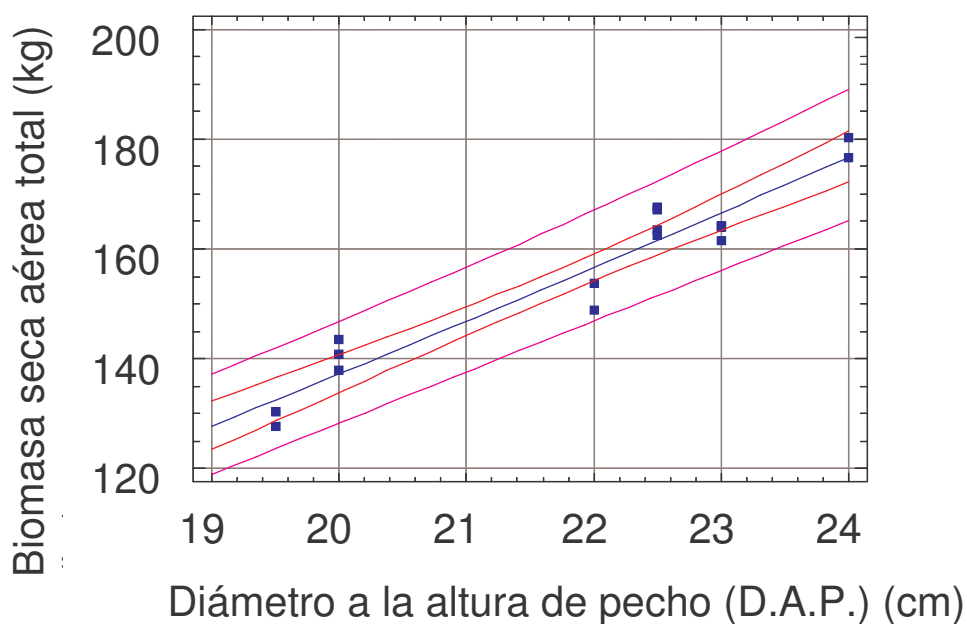
Fuente: Este estudio.

El modelo que mejor predice la biomasa seca aérea total en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) fue el modelo multiplicativo, donde la variable dependiente (Y) es la biomasa seca aérea total y la variable independiente (X) es diámetro a la altura de pecho (D.A.P.). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Biomasa seca aérea total (kg.)} = 2,26623 * \text{D.A.P. (cm.)}^{1,37321}$$

La relación entre biomasa seca aérea total y diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) en el modelo ajustado fue significativa ($p < 0.001$) (Figura 8), con coeficiente de determinación (R^2) que explica el 92.7% 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) del modelo, reafirma la confiabilidad de la ecuación para predecir la biomasa seca aérea total con un bajo error de estimación (Anexo E).

Figura 8. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $2,26623 \cdot \text{D.A.P. (cm.)}^{1,37321}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - D.A.P. para *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

La figura 8 muestra la línea de ajuste del modelo alométrico seleccionado. Se observa que los datos están distribuidos uniformemente alrededor de la línea guía. El P – valor del análisis de varianza fue menor a 0.001, lo que indica una relación significativa entre las variables biomasa seca aérea total y diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) al 99% de confianza.

3.3.1.1 Validación del modelo seleccionado. La validación del modelo 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 la ecuación resultó ser no significativo ($P > 0.05$) (Anexo F), es decir, que no se presentaron diferencias estadísticas entre las medias comparadas y el modelo seleccionado no subestima ni sobrestima la biomasa seca aérea total de estos árboles en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.).

3.3.1.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 6, se presentan algunas estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado, a partir del modelo desarrollado en este estudio. La variable independiente diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) tomó valores desde 10 a 40 cm. (25 cm. en promedio) que corresponden a valores de biomasa seca aérea total desde 53.5 a 359.1 kg. por árbol⁻¹ y entre 22.4 a 150.3 kg. de carbono almacenado por árbol⁻¹.

Tabla 6. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

D.A.P. (cm)	Biomasa seca	Carbono
	aérea total (kg)	almacenado (kg C)
10	53.5	22.4
15	93.9	39.3
20	138.6	58.0
25	188.4	78.8
30	241.9	101.2
35	299.0	125.1
40	359.1	150.3
Prom 25	196.4	82.2

D.A.P. =Diámetro a la altura de pecho Prom = promedio

Fuente: Este estudio.

Las estimaciones realizadas indican que un árbol de *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo, con un diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) promedio de 25 cm., establecido en una plantación bajo una distancia de siembra de 2.8 m. entre árboles y de 7 m. entre calles, presenta una biomasa seca aérea total de 196.4 kg., que a su vez representan 82.2 kg. C. Estos datos extrapolados a una hectárea representan 100.2 toneladas de biomasa seca aérea total y 42 toneladas de carbono almacenado por hectárea.

3.3.2 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función de la altura total para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 7, se presenta el modelo con mejor ajuste para estimar biomasa seca aérea total en función de la altura total; en el modelo se eliminaron dos observaciones remotas “outliers”, teniendo en cuenta aquellos residuales estandarizados superiores a dos desviaciones estándar.

Tabla 7. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función de la altura total para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Modelo	a	b	R ²	RMSE	PRESS
Y = a*X ^b	4.72832	1.28832	63.4	0.0036	0.047

Y : Biomasa seca aérea total (kg); a y b: Coeficientes de regresión; X : Altura total (m)
R² : Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

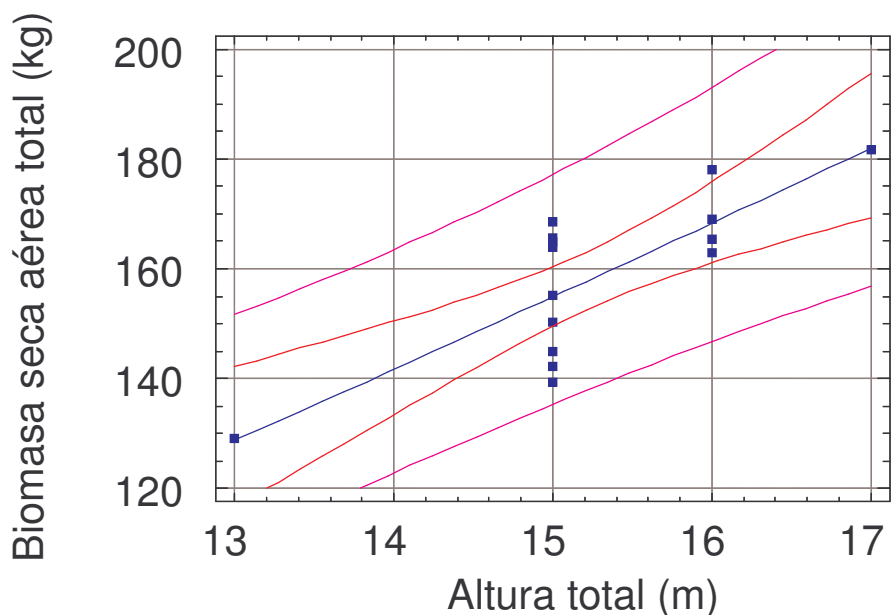
Fuente: Este estudio.

El modelo que mejor predice la biomasa seca aérea total en función de la altura total fue de tipo potencial (multiplicativo), donde la variable dependiente (Y) es la biomasa seca aérea total y la variable independiente (X) es altura total. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Biomasa seca aérea total (kg.)} = 4,72832 * \text{Altura total (m)}^{1,28832}$$

La relación entre biomasa seca aérea total y altura total en el modelo ajustado fue significativa ($p < 0.001$) (Figura 9), con coeficiente de determinación (R^2) que explica el 63.4% de la variabilidad de los datos, después de transformarlos a escala logarítmica. Los valores de RMSE (0.0036) y PRESS (0.047) demostraron bajos errores de estimación, con respecto a otros modelos ajustados (Anexo G).

Figura 9. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $4,72832 * \text{Altura total (m)}^{1,28832}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - altura total para *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

En la figura 9 se 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 0.001, lo que indica una relación significativa entre las variables biomasa seca aérea total y altura total al 99% de confianza.

3.3.2.1 Validación del modelo seleccionado. El modelo fue validado mediante una prueba de t, encontrándose que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores reales y los estimados por el modelo a un nivel de confianza del 95,0% ($P > 0.05$) (Anexo H).

3.3.2.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función de la altura total para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 8, se muestran algunas estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado, a partir del modelo desarrollado. La variable independiente altura, tomó valores desde 12 a 20 m (16 m en promedio) que corresponden a valores de biomasa seca aérea total desde 116.2 a 224.3 kg. por árbol⁻¹ y entre 48.6 a 93.9 kg. de carbono almacenado por árbol⁻¹.

Tabla 8. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función de la altura total para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Altura total (m)	Biomasa seca	Carbono
	aérea total (kg)	almacenado (kg C)
12	116.2	48.6
13	128.8	53.9
14	141.7	59.3
15	154.8	64.8
16	168.3	70.4
17	181.9	76.1
18	195.8	82.0
19	210.0	87.9
20	224.3	93.9
Prom 16	169.1	70.8

Prom = promedio

Fuente: Este estudio

Las estimaciones realizadas indican que un árbol de caucho en Mocoa, departamento de Putumayo, con una altura promedio de 16 m, sembrado a una distancia de 2.8 m. entre árboles y de 7 m. entre calles, presenta una biomasa seca aérea total de 169.1 kg con una cantidad de carbono almacenado igual a 70.8 kg C. Los anteriores datos extrapolados a una hectárea representan 86.24 toneladas de biomasa seca aérea total y 36.1 toneladas de carbono almacenado por hectárea.

3.3.3 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del área basal para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 9, se presenta el modelo con mejor ajuste para estimar biomasa seca aérea total en función del área basal; en el modelo se eliminó una observación remota “*outliers*”, teniendo en cuenta aquellos residuales estandarizados superiores a dos desviaciones estándar.

Tabla 9. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del área basal para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Modelo	a	b	R ²	RMSE	PRESS
Y = a*X ^b	2.67493	0.686615	92.7	0.0008	0.012

Y : Biomasa seca aérea total (kg); a y b: Coeficientes de regresión; X : Area basal (cm²)

R² : Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

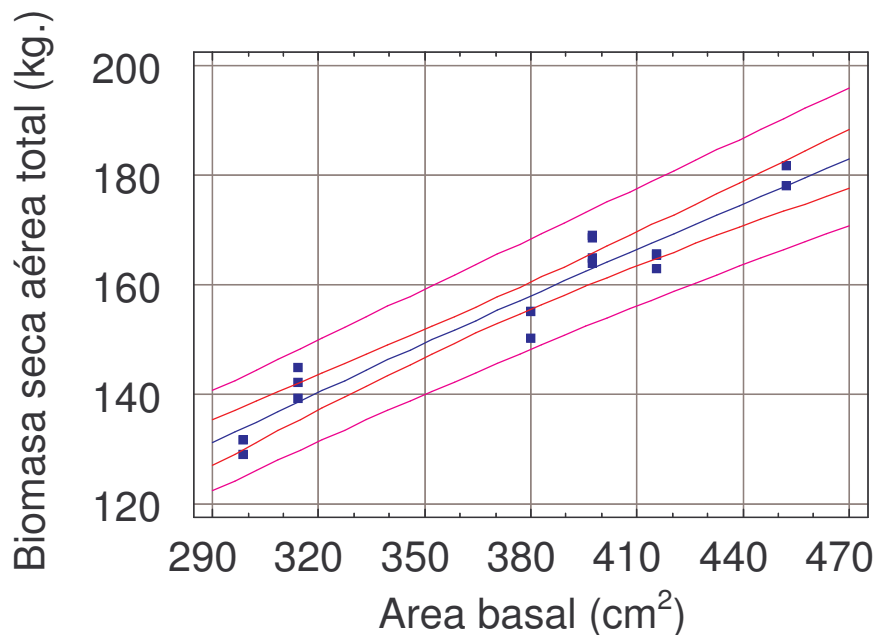
Fuente: Este estudio.

El modelo que mejor predice la biomasa seca aérea total en función del área basal fue el modelo multiplicativo. En este modelo la variable dependiente (Y) es la biomasa seca aérea total y la variable independiente (X) es área basal. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Biomasa seca aérea total (kg.)} = 2,67493 * \text{Área basal (cm}^2\text{)}^{0,686615}$$

La relación entre biomasa seca aérea total y área basal en el modelo ajustado fue significativa ($p < 0.001$) (Figura 10), con coeficiente de determinación (R^2) que explica el 92.7% 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) del modelo, demostraron bajos errores de estimación, con respecto a otros modelos ajustados (Anexo I).

Figura 10. Modelo alométrico de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $2,67493 \cdot \text{Área basal (cm}^2\text{)}^{0,686615}$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - área basal para *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

La figura 10 muestra la línea de ajuste del modelo alométrico elegido. Se observa que los datos están distribuidos uniformemente alrededor de la línea guía. El P – valor del análisis de varianza fue menor a 0.001, lo que indica una relación significativa entre las variables biomasa seca aérea total y área basal al 99% de confianza.

3.3.3.1 Validación de modelo seleccionado. La validación de modelo se realizó, comparando las medias de los valores reales frente a las medias de los valores estimados, mediante una prueba de t (Anexo J). El P-valor obtenido en esta prueba para la ecuación resultó ser no significativo ($P > 0.05$) es decir, que no se presentaron diferencias estadísticas entre las medias comparadas y el modelo escogido no subestima ni sobrestima la biomasa seca aérea total de estos árboles en función del área basal.

3.3.3.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del área basal para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 10, se presentan algunas estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado, a partir del modelo desarrollado. La variable independiente área basal tomó valores desde 250 a 500 cm² (375 cm² en promedio) que corresponden a valores de biomasa seca aérea total desde 118.5 a 190.8 kg. por árbol⁻¹ y entre 49.6 a 79.8 kg. de carbono almacenado por árbol⁻¹.

Tabla 10. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del área basal para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Area basal (cm ²)	Biomasa seca	Carbono
	aérea total (kg)	almacenado (kg C)
250	118.5	49.6
275	126.5	53.0
300	134.3	56.2
325	141.9	59.4
350	149.3	62.5
375	156.6	65.5
400	163.7	68.5
425	170.6	71.4
450	177.4	74.3
475	184.1	77.1
500	190.8	79.8
Prom 375	155.8	65.2

Prom = promedio

Fuente: Este estudio

Las estimaciones realizadas indican que un árbol de caucho en Mocoa, departamento de Putumayo, con un área basal promedio de 375 cm², establecido a una distancia de 2.8 m. entre árboles y de 7 m. entre calles, presenta una biomasa seca aérea total de 155.8 kg. con una cantidad de carbono almacenado igual a 65.2 kg. C. Los anteriores datos extrapolados a una hectárea representan 79.5 toneladas de biomasa seca aérea total y 33.2 toneladas de carbono almacenado por hectárea.

3.3.4 Modelo alométrico de biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 11, se presenta el modelo con mejor ajuste para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa.

Tabla 11. Modelo alométrico para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Modelo	a	b	R ²	RMSE	PRESS
Y = exp(a + b/X)	6.62795	-14.0628	91	0.0009	0.014

Y : Biomasa seca aérea total (kg); a y b: Coeficientes de regresión; X : Diámetro de copa (m²)

R² : Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

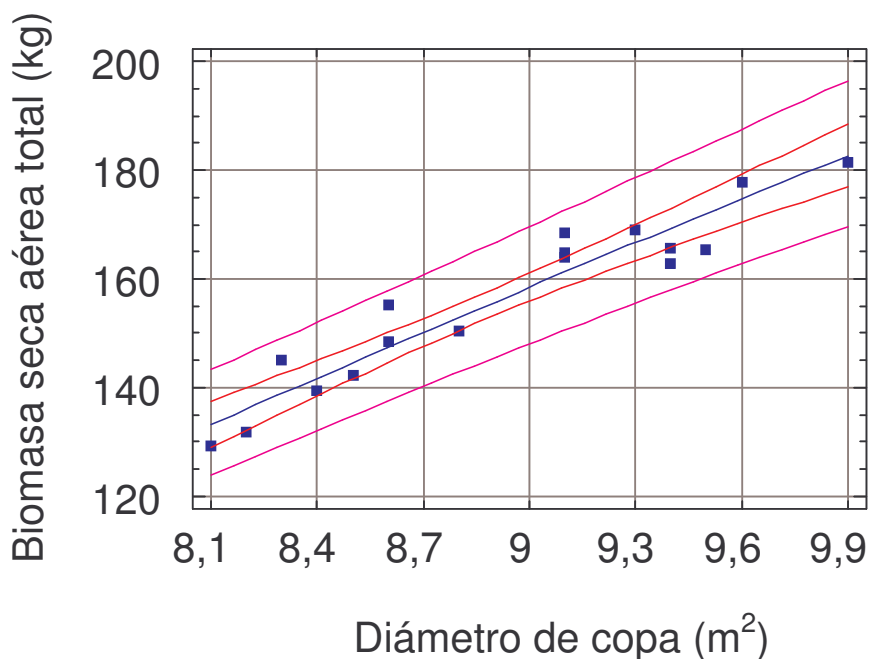
Fuente: Este estudio.

El modelo que mejor predice la biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa fue de tipo exponencial (curva-S), donde la variable dependiente (Y) es la biomasa seca aérea total y la variable independiente (X) es diámetro de copa. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Biomasa seca aérea total (kg.)} = \exp(6,62795 - 14,0628/\text{Diámetro de copa (m}^2\text{)})$$

La relación entre biomasa seca aérea total y diámetro de copa en el modelo ajustado fue significativa ($p < 0.001$) (Figura 11), con coeficiente de determinación (R^2) que explica el 91% de la variabilidad de los datos, después de transformarlos a escala logarítmica. Los valores de RMSE (0.0009) y PRESS (0.014) demostraron bajos errores de estimación, con respecto a otros modelos ajustados (Anexo K).

Figura 11. Modelo alométrico simple de la forma biomasa seca aérea total (kg.) = $\exp(6,62795 - 14,0628/\text{Diámetro de copa (m}^2\text{)})$, ajustado por regresión para la relación biomasa seca aérea total - diámetro de copa para *Hevea brasiliensis*. Mocoa. 2006.



Fuente: Este estudio.

En la figura 11 se muestra la línea de ajuste del modelo alométrico seleccionado. Se observa que los datos están distribuidos uniformemente alrededor de la línea guía. El P – valor del análisis de varianza fue menor a 0.001, lo que indica una relación significativa entre las variables biomasa seca aérea total y diámetro de copa al 99% de confianza.

3.3.4.1 Validación de modelo seleccionado. La validación de modelo se realizó, comparando las medias de los valores reales frente a las medias de los valores estimados, mediante una prueba de t (Anexo L). El P-valor obtenido en esta prueba para la ecuación resultó ser no significativo ($P > 0.05$) es decir, que no se presentaron diferencias estadísticas entre las medias comparadas y el modelo escogido no subestima ni sobrestima la biomasa seca aérea total de estos árboles en función del diámetro de copa.

3.3.4.2 Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro de copa para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 12, se presentan algunas estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado, a partir del modelo desarrollado. La variable independiente diámetro de copa tomó valores desde 8 a 10 m² (9 m² en promedio) que corresponden a valores de biomasa seca aérea total desde 130.3 a 185.3 kg. por árbol⁻¹ y entre 54.5 a 77.5 kg. de carbono almacenado por árbol⁻¹.

Tabla 12. Estimaciones de biomasa seca aérea total y carbono almacenado en función del diámetro de copa para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Diámetro de copa (m ²)	Biomasa seca	Carbono
	aérea total (kg)	almacenado (kg C)
8	130.3	54.5
8.5	144.5	60.5
9	158.5	66.3
9.5	172.0	72.0
10	185.3	77.5
Prom	9	158.1
		66.2

Prom = promedio

Fuente: Este estudio

Las estimaciones realizadas indican que un árbol de caucho en Mocoa, departamento de Putumayo, con un diámetro de copa promedio de 9 m², sembrado a 2.8 m. entre árboles y de 7 m. entre calles, presenta una biomasa seca aérea total de 158.1 kg. con una cantidad de carbono almacenado igual a 66.2 kg. C. Los anteriores datos extrapolados a una hectárea representan 80.6 toneladas de biomasa seca aérea total y 33.8 toneladas de carbono almacenado por hectárea.

3.3.5 Comparación entre modelos alométricos para biomasa seca aérea total en la especie *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. En la tabla 13, se presentan los modelos con mejores ajustes, en los cuales se incluyen las variables diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total, área basal y diámetro de copa, para estimar biomasa aérea total.

Tabla 13. Comparación entre modelos alométricos para biomasa seca aérea total en función de las variables predictoras diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total, área basal y diámetro de copa, en la especie *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Variable independiente	Modelo	a	b	R ²	RMSE	PRESS	
D.A.P. (cm)	$Y = a \cdot X^b$	Multiplicativo	2.26623	1.37321	92.7	0.0008	0.012
Altura total (m)	$Y = a \cdot X^b$	Multiplicativo	4.72832	1.28832	63.4	0.0036	0.047
Area basal (cm ²)	$Y = a \cdot X^b$	Multiplicativo	2.67493	0.686615	92.7	0.0008	0.012
Diámetro de copa (m ²)	$Y = \exp(a + b/X)$	Curva - S	6.62795	-14.0628	91	0.0009	0.014

Y : Biomasa seca aérea total (kg); a y b: Coeficientes de regresión; X : Variable independiente

R² : Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de cuadrados del error

Fuente: Este estudio.

Al realizar el ajuste de los modelos, con la grafica de los residuales estudentizados, se comprobó que estos no presentaban heteroscedasticidad y que la tendencia de los residuos era normal, como se ha manifestado en gran número de trabajos, donde al graficar la nube de puntos se muestra que no hay problema de heterocedasticidad¹¹⁷.

De acuerdo a la tabla anterior, se concluyó que la variable independiente que mejor predice la cantidad de biomasa seca aérea total en la especie *Hevea brasiliensis* es el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.). El modelo seleccionado: $Y = a \cdot X^b$ (multiplicativo), combina un valor aceptable de coeficiente de determinación, normalidad en los residuos, homogeneidad de varianzas y bajo cuadrado medio del error.

La ecuación satisface el supuesto de normalidad de las varianzas y la comparación de medias, realizada a través de una prueba de t, indica que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores reales y los valores estimados. Los resultados ratifican lo señalado por numerosos estudios para la estimación de biomasa aérea, donde se demuestra que la variable que mejor explica la masa seca de un árbol, es el diámetro normal.

Además se debe tener en cuenta, que en un sentido práctico, la variable área basal al igual que la altura y el diámetro de copa, tienen los conocidos problemas

¹¹⁷ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 89.

por el sesgo introducido en su cuantificación en campo, además 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^{118 - 119}. Se recomienda por lo tanto, al momento de tomar datos para emplear esta ecuación, utilizar solamente el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) como variable predictora, ya que representará una mayor confiabilidad a la hora de tomar dediciones.

En el estudio de Rojo, *et al* (2005)¹²⁰ la variable predictora fue el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), sin embargo en otros trabajos, Chaudhuri, *et al* (1995)¹²¹; Dey, *et al* (1996)¹²² y Nieves y Buitrago (2005)¹²³ determinaron como variable predictora la circunferencia a la altura de pecho (C.A.P.); pero Schroth, *et al* (2002)¹²⁴ en su investigación establecieron el área basal como variable predictora.

La ecuación generada en este estudio fue de tipo potencial, de la misma forma fueron las ecuaciones que determinaron Chaudhuri, *et al* (1995)¹²⁵ y Dey, *et al* (1996)¹²⁶ en sus trabajos; pero en otra experiencia Schroth, *et al* (2002)¹²⁷ generaron una ecuación polinomial y en las investigaciones de Rojo, *et al* (2005)¹²⁸ y Nieves y Buitrago (2005)¹²⁹, la ecuación generada fue logarítmica.

De acuerdo a la ecuación potencial, se puede apreciar que el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), es proporcional al peso seco total de los árboles en un momento dado, es decir, la curva que describe la relación es alométrica.

¹¹⁸ SEGURA, M. 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.

¹¹⁹ ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J., Op. cit., p. 88.

¹²⁰ ROJO, G., *et al*, Op. cit., p. 449.

¹²¹ CHAUDHURI, D., *et al*, Op. cit., p. 128.

¹²² DEY, S., *et al*, Op. cit., p. 42.

¹²³ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 100.

¹²⁴ SCHROTH, G., *et al*, Op. cit., p. 140.

¹²⁵ CHAUDHURI, D., *et al*, Op. cit., p. 128.

¹²⁶ DEY, S., *et al*, Op. cit., p. 42.

¹²⁷ SCHROTH, G., *et al*, Op. cit., p. 140.

¹²⁸ ROJO, G., *et al*, Op. cit., p. 449.

¹²⁹ NIEVES, H. y BUITRAGO, C., Op. cit., p. 100.

CONCLUSIONES

La cantidad de biomasa seca aérea total estimada en *Hevea brasiliensis* clon FX 3864 de 15 años de establecido fue 79.8 ton/ha^{-1} y el carbono almacenado en la biomasa seca aérea total fue de $32.45 \text{ ton/C/ha}^{-1}$.

El modelo que mejor estimó la biomasa seca aérea total (Bsat) a partir del diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) en la especie *Hevea brasiliensis*, fue de tipo potencial, presentando un coeficiente de determinación (R^2) de 92.7% y bajos errores de estimación. De esta manera el modelo seleccionado para estimar biomasa seca aérea total es de la forma $Bsat = 2,26623 * D.A.P. ^{1,37321}$

El modelo para estimar biomasa seca aérea total en función de la altura, que mejor se ajustó los datos, fue de tipo potencial de la forma $Bsat = 4,72832 * \text{Altura total} ^{1,28832}$, el cual presentó un análisis estadístico aceptable (R^2 63.4%), razón por la cual esta ecuación podría generar datos no muy confiables al momento de realizar las estimaciones.

El modelo que mejor predijo la producción de biomasa seca aérea total en función del área basal en la especie *Hevea brasiliensis* fue de tipo potencial de la forma $Bsat = 2,67493 * \text{Área basal} ^{0,686615}$, el cual explicó el 92.7% de la variabilidad de los datos y se presentaron bajos errores de estimación con respecto a otros modelos probados.

El modelo para estimar biomasa seca aérea total en función del diámetro de copa, que mejor se ajustó los datos, fue de la forma exponencial $Bsat = \exp(6,62795 - 14,0628 / \text{Diámetro de copa})$, el cual presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 91% y bajos errores de estimación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar futuras investigaciones orientadas a la evaluación de la biomasa seca total en la especie *Hevea brasiliensis*, ya que en este estudio no se realizaron estimaciones en otros compartimientos de la biomasa (biomasa radicular, necromasa) que representan cantidades importantes de carbono dentro de un sistema.

Se debe tener en cuenta que, en un sentido práctico, la variable área basal al igual que la altura y el diámetro de copa, tienen los conocidos problemas por el sesgo introducido en su cuantificación en campo, por lo que se recomienda, al momento de tomar datos para emplear la ecuación, utilizar solamente el diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) como variable predictora, ya que representará una mayor confiabilidad a la hora de tomar mediciones.

Se recomienda utilizar el modelo generado en este estudio para la especie *Hevea brasiliensis* bajo condiciones agroecológicas similares a la zona de estudio. No se puede descartar a este modelo como punto de referencia para estimar la producción de biomasa seca y la cantidad de carbono almacenado en otros lugares donde se encuentre establecido este tipo de plantación, teniendo en cuenta que las estimaciones pueden ser más precisas si se acompañan con algunas mediciones en campo que corroboren su confiabilidad.

BIBLIOGRAFIA

ACOSTA, M., *et al.* Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. En: Agrociencia. Texcoco, México. Vol. 36, no. 6 (noviembre-diciembre 2002); p. 725-736.

ALEGRE, J.; AREVALO, L. y RICSE, A. Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonía peruana. [en línea]. [Pucallpa, Perú]. FAO-ICRAF-INIA, 2000. [citado, octubre 6 de 2006]. Disponible en Internet: URL:<www.fao/WAICENT/FAOINF/AG/AGAP/FRG/español/document/boterusso/18htm-25k>

ANDRADE, H. e IBRAHIM, M. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles? En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Costa Rica. Vol. 10, no. 39-40 (2003); p. 109-116.

ARISTIZABAL, J. y GUERRA, A. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero-cacao-plátano. Bogotá, 2002. 180 p. Tesis de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

BERMUDEZ, P. Establecimiento de una biofábrica heveícola y actividades complementarias desarrolladas en la oficina de asistencia técnica agropecuaria – UMATA en el municipio de Paratebueno, departamento de Cundinamarca. Ibagué, 2005. 55 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal.

BLACK, T., *et al.* Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia. Santafé de Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente, 2000. 238 p.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. Roma: FAO, 1997. 55 p.

CALDERON, S., *et al.* Inventarios forestales para contabilidad de carbono. Manual de procedimientos. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2002. 30 p.

CERON, E. Plan de Desarrollo del Municipio de Mocoa 2004-2007: “Gente que quiere a Mocoa”. Mocoa, Putumayo : s.e., 2004. 79 p.

CHAUDHURI, D., *et al.* Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression method: relation between girth and biomass. En : Indian Journal of Natural Rubber Research. Vol. 8, no. 2 (1995); p. 113-116.

CIESLA, W. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Roma, Italia: FAO, 1996. 146 p.

COMPAGNON, P. El caucho natural : biología, cultivo y producción. Montpellier, Francia : Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo - CIRAD, 1998. 701 p.

CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO (CMCC). Novena conferencia de las Partes (COP 9). Decisión 19/COP 9. Milán, Italia: CMCC, 2003. 40 p.

CUNHA, T., *et al.* Influência da diferenciação pedológica no desenvolvimento da seringueira no município de Oratórios, Minas Gerais. En: Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília, Brasil. Vol. 35, no. 1 (2000); p. 145-155.

DE OLIVEIRA, D., *et al.* Carbono na biomassa e na respiração do solo em plantio comercial de seringueiras no Paraná. En: ALVARENGA, A. y SANTANA DO CARMO, C. Seqüestro de carbono: quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais EPAMIG, 2006. p. 201 - 213.

DEY, S., *et al.* Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression method : relation of girth and biomass for nature trees of clone RRIM 600. En : Indian Journal of Natural Rubber Research. Vol. 9, no. 1 (1996); p. 40-43.

DZIB, B. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 2003. 124 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

FEDERACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE CAUCHO NATURAL. Cartilla promocional del cultivo de caucho natural. Bogotá D.C.: FEDECAUCHO-Fondo Nacional de Fomento Cauchero, 2006. 29 p.

_____. Selección y mejoramiento del Caucho *Hevea* : material genético del caucho. Bogotá D.C.: FEDECAUCHO, 2004. 48 p.

FUNDACION SOLAR. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso de suelo. Guatemala: Lilian Márquez, editora, 2000. 31 p.

GAYOSO, J.; GUERRA, J. y ALARCON, D. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2002. 53 p.

GONZALEZ, A. Remoción de CO₂ y secuestro de carbono en las plantaciones de caucho *Hevea brasiliensis* en el proyecto forestal Cararé - Opón. Bogotá, 2006. 180 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

GONZALEZ, M., *et al.* Cambio climático mundial : origen y consecuencias. En : Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León UANL. Monterrey, México. Vol. 6, no. 3 (julio-septiembre 2003); p. 377-385.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Cambio climático 2001 : la base científica. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Ginebra, Suiza: IPCC, 2001. 84 p.

KANNINEN, M. Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: potencial para América Latina. En: Conferencia electrónica: Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales (LEAD-PFI-ECONF-L). [En línea] [Turrialba, Costa Rica]. CATIE, 2001. [citado, octubre 6 de 2006]. Disponible en Internet: URL: <<http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo4.htm>>.

MACDIKEN, K. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, Virginia, USA: Winrock Internacional Institute for Agricultural Development, 1997. 87 p.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Manual de tratados internacionales en medio ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá D.C.: Ministerio del Medio Ambiente, 2002. 388 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Efecto invernadero y cambio climático. [en línea]. [Bogotá, Colombia]. MAVDT, 2002 [citado 10 de marzo 2006]. Disponible en Internet: URL:<http://www.minambiente.gov.co/viceministerios/ambiente/mitigacion_cambio_climatico/preguntas_frecuentes/efecto_invernadero.asp>.

MOLINA, A. y NARVÁEZ, W. Sistema agroforestal Laurel de cera *Myrica pubescens* intercalado con cultivos transitorios en el municipio de Pasto. San Juan de Pasto, 2000. 68 p. Trabajo de grado (Ingeniero Agroforestal). Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Agrícolas. Programa de Ingeniería Agroforestal.

MONROY, C. y NAVAR, J. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomas de *Hevea brasiliensis* Muell.Arg., en Veracruz, México. En : Madera y Bosques. Nuevo León, México. Vol 10, no. 2 (2004); p. 29-43.

_____ ; AGUIRRE, O. y JIMENEZ, J. Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. en Veracruz, México. En : Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. Vol. 9, no. 3 (julio-septiembre 2006); p. 261-269.

MONTERO, M. y KANNINEN, M. Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. En: Revista Forestal Centroamericana. Turrialba, Costa Rica. Vol. 39-40 (2002); p. 50-55.

MORET, A. 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. Mérida, Venezuela. Vol. 42, no. 2 (1998); p. 187-197.

NIEVES, H. y BUITRAGO, C. Evaluación de los niveles de remoción de CO₂ efectuada por las plantaciones de caucho *Hevea brasiliensis* en Colombia. Bogotá, 2005. 132 p. Trabajo de grado (Ingeniero Forestal). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

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

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO) Y RED LATINOAMERICANA DE COOPERACION TECNICA EN MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS (REDLACH). Foro electrónico sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas. [en línea]. [Santiago, Chile]. FAO, 2004. [citado, marzo 11 de 2006]. Disponible en Internet: URL:<<http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/infopinpsa.pdf>>.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Roma, Italia: FAO, 2000. 98 p.

ORREGO, S.; JARAMILLO, L. y LOAIZA, L. Venta de servicios ambientales: posibilidades y limitaciones para el departamento del Chocó. Quibdó; Chocó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico "John Von Neumanm", 1998. 26 p.

ROJAS, J. Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 2005. 71 p. Trabajo de grado (Magíster Scientiae). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

ROJO, G., *et al.* Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. en el Estado de Oaxaca, México. En : Agrociencia. Texcoco, México. Vol. 39, no. 4 (julio-agosto 2005); p. 449 - 456.

SANTANA DO CARMO, C., *et al.* Biomassa e estoque de carbono em seringais implantados na Zona de Mata de Minas Gerais. En: ALVARENGA, A. y SANTANA DO CARMO, C. Seqüestro de carbono: quantificação em seringais de cultivo e na vegetação natural. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais EPAMIG, 2006. p. 86-87.

SCHROTH, G., *et al.* Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. En : Forest Ecology and Management. No. 163 (2002); p. 131-150.

SEGURA, M. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis* en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Heredia (Costa Rica), 1997. 147 p. Trabajo de grado (Lic. Ingeniero Forestal). Universidad Nacional Autónoma de Heredia. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Escuela de Ciencias Ambientales.

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

_____. 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. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1999. 46 p.

TORRES, C. Manual para el cultivo del caucho en la amazonía. Florencia, Caquetá: Plan Nacional de Desarrollo Alternativo PLANTE, 1999. 149 p.

ZAPATA, M.; COLORADO, G. y DEL VALLE, J. 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, Sede Medellín, 2003. p. 87-119.

ANEXOS

Anexo A. Análisis de suelo de la plantación de *Hevea brasiliensis*, en Mocoa departamento de Putumayo. 2006.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO (Nit: 800118-954-1)
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
SECCION DE LABORATORIOS
LABORATORIO DE SUELOS

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELOS

Fecha Noviembre 24 de 2006 Análisis N° 6425 No. Muestra _____
 Interesado Angela Jurado Parra Propietario Angela Jurado Parra
 Procedencia: | Departamento Putumayo Municipio Mocoa Vereda Alto Eslabón
 Finca El Porvenir Referencia _____
 Cultivo Anterior _____ Cultivo proyectado _____
 Altura _____ msnm Temperatura _____ Topografía _____
 Profundidad _____ cm Recibo de Pago N° _____
 Fertilizantes Utilizados Anteriormente _____
 Análisis Solicitado: Completo Fertilidad _____ Otros: _____ Físicos _____

Muestras	Unidad	6425			
pH, Potenciómetro Relación Suelo: Agua (1:1)		4,4			
Materia Orgánica Walkley-Black (Colorimétrico)	%	5,2			
Densidad Aparente	g/cc	0,93			
Fósforo (P) Bray II	ppm	1			
Capacidad Intercambio Catiónico (CIC)		13,6			
Calcio de Cambio	CH ₃ COOHNH ₄ 1NpH7 meq/100g	0,4			
Magnesio de Cambio		0,10			
Potasio de cambio		0,05			
Aluminio de Cambio		1,60			
Hierro	Extracción con DTPA ppm	46,00			
Manganeso		0,24			
Cobre		0,24			
Zinc		0,42			
Boro ppm, Método de Agua Caliente		0,10			
Nitrógeno Total %		0,24			
Carbono Orgánico %		3,03			
Arenas	%	54,2			
Arcillas	%	29,8			
Limos	%	16,0			
Textura Franco=F,Arcilloso=Ar,Arenoso=A,Limoso=L		F-Ar-A			
Densidad Aparente	g/cc	0,93			
Densidad Real	g/cc	2,62			
Porosidad	%	64,50			
Capacidad de Campo	%	46,38			
Azufre disponible	Extracción con (Ca(H ₂ P ₄) ₂ .H ₂ O) 0.008 M (ppm)	9,28			

Observaciones : _____


MARÍA DEL ROSARIO CARREÑO
 TÉCNICO LABORATORIO DE SUELOS

Anexo B. Análisis de contenido de carbono en cada componente de la biomasa seca aérea total de *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
SECCION DE LABORATORIOS
LABORATORIO DE BROMATOLOGÍA

Fecha recepción: Noviembre 15 de 2006 **Análisis:** 5930-5933
Fecha entrega : Diciembre 7 de 2006
Muestra : Caucho *Hevea brasiliensis*
 1. Hojas
 2. Ramitas
 3. Ramas
 4. Fuste
Procedencia: Vereda: Alto Eslabón Municipio: Mocoa
Análisis : Foliar, Carbono orgánico
Solicitante: Angela María Jurado

ANÁLISIS	1. Foliar de Caucho	
	% B.H.	% B.S.
Humedad	66,47	
Materia seca	33,53	
Nitrógeno	0,97	2,90
Calcio	0,16	0,47
Fósforo	0,07	0,21
Magnesio	0,05	0,15
Potasio	0,29	0,86
Azufre	0,05	0,14
Cobre (ppm)	2,7	8
Manganeso (ppm)	41	121
Zinc (ppm)	8	24
Hierro (ppm)	32	96
Carbono	16,15	48,15

ANÁLISIS	2. Ramitas		3. Ramas	
	% B.H.	% B.S.	% B.H.	% B.S.
Humedad	52,65		44,33	
Materia seca	47,35		55,67	
Carbono	18,36	38,77	22,16	39,81

ANÁLISIS	4. Fuste	
	% B.H.	% B.S.
Humedad	30,35	
Materia seca	69,65	
Carbono	28,33	40,68

Observaciones: _____

Gloria Sandra Espinosa Narváez
 Gloria Sandra Espinosa Narváez
 Tec. Quim. Lab. Bromatología

Ciudad Universitaria - Torobajo - tel 7314477 - 7311449 ext 256 - San Juan de Pasto - Colombia

Anexo C. Datos de diámetro a la altura de pecho (D.A.P.), altura total y área basal de los árboles de *Hevea brasiliensis* evaluados en campo. Mocoa. 2006.

Número parcela	Número árbol	D.A.P. (cm)	Altura total (m)	Area basal (cm ²)
1	1	27.5	15	594.0
	2	22	16	380.1
	3	22	15	380.1
	4	21.5	17	363.1
	5	22	15	380.1
	6	21	14	346.4
	7	22	15	380.1
	8	22.5	15	397.6
	9	22.5	16	397.6
	10	22	18	380.1
	11	22.5	20	397.6
	12	22	16	380.1
2	1	19.5	12	298.6
	2	20	15	314.2
	3	36.5	20	1046.3
	4	22.5	17	397.6
	5	23	18	415.5
	6	17.5	15	240.5
	7	16.5	14	213.8
	8	18	20	254.5
	9	20	15	314.2
	10	22.5	15	397.6
	11	20	20	314.2
	12	23.5	17	433.7
3	1	28	15	615.8
	2	17	12	227.0
	3	15.5	12	188.7
	4	19.5	14	298.6
	5	20	16	314.2
	6	22	15	380.1
	7	21.5	18	363.1
	8	23	18	415.5
	9	23.5	20	433.7
	10	22.5	15	397.6
	11	19	15	283.5
	12	19.5	15	298.6
4	1	20	18	314.2
	2	16.5	10	213.8
	3	21.5	15	363.1
	4	20.5	15	330.1
	5	20	15	314.2
	6	20	15	314.2
	7	19.5	13	298.6
	8	15.5	12	188.7
	9	22	18	380.1
	10	20.5	15	330.1
	11	15	10	176.7
	12	20	15	314.2

Número parcela	Número árbol	D.A.P. (cm)	Altura total (m)	Area basal (cm ²)
5	1	29	18	660.5
	2	25	15	490.9
	3	19	12	283.5
	4	23	12	415.5
	5	22	15	380.1
	6	21.5	15	363.1
	7	22	13	380.1
	8	23	15	415.5
	9	23	15	415.5
	10	22.5	15	397.6
	11	22	15	380.1
	12	19	12	283.5
6	1	20.5	15	330.1
	2	20	15	314.2
	3	22	15	380.1
	4	23	16	415.5
	5	21.5	13	363.1
	6	20.5	15	330.1
	7	22.5	15	397.6
	8	21.5	15	363.1
	9	26	15	530.9
	10	24	17	452.4
	11	23	15	415.5
	12	31	18	754.8
7	1	31	15	754.8
	2	20.5	12	330.1
	3	19	12	283.5
	4	23	16	415.5
	5	34.5	18	934.8
	6	22	18	380.1
	7	16	15	201.1
	8	27	18	572.6
	9	23	16	415.5
	10	22	15	380.1
	11	23	15	415.5
	12	17	12	227.0
8	1	19	12	283.5
	2	26	15	530.9
	3	36	20	1017.9
	4	22	15	380.1
	5	20	16	314.2
	6	32	18	804.2
	7	17	15	227.0
	8	21	12	346.4
	9	16	12	201.1
	10	24	16	452.4
	11	24	17	452.4
	12	28	17	615.8
PROMEDIO		22.08	15.30	396.1

Anexo D. Datos empleados para la obtención de los modelos alométricos para *Hevea brasiliensis* en Mocoa, departamento de Putumayo. 2006.

Número parcela	Número árbol	D.A.P. (cm)	Altura total (m)	Area basal (cm ²)	Diámetro de copa (m ²)	Volumen fuste (m ³)	Densidad de la madera (g/cm ³)	Peso verde fuste (kg)	Peso verde ramas (kg)	Peso verde ramitas (kg)	Peso verde hojas (kg)	Peso verde total árbol (kg)	Biomasa seca fuste (kg)	Biomasa seca ramas (kg)	Biomasa seca ramitas (kg)	Biomasa seca hojas (kg)	Biomasa seca aérea total (kg)	Contenido carbono almacenado biomasa seca fuste (kg)	Contenido carbono almacenado biomasa seca ramas (kg)	Contenido carbono almacenado biomasa seca ramitas (kg)	Contenido carbono almacenado biomasa seca hojas (kg)	Contenido carbono almacenado biomasa seca aérea total (kg)	Porcentaje materia seca (%)
1	8	22.5	15	397.6	9.1	0.35	0.48	127	40	20	15	202	117.2	33.7	11.8	5.9	168.6	47.7	13.4	4.6	2.8	68.5	83.5
1	9	22.5	16	397.6	9.3	0.38	0.49	129	43	20	15	207	117.5	33.8	11.8	5.9	169.0	47.8	13.5	4.6	2.8	68.7	81.7
2	2	20	15	314.2	8.5	0.29	0.48	121	36	18	14	189	98.9	28.5	10.0	5.0	142.3	40.2	11.3	3.9	2.4	57.8	75.3
2	9	20	15	314.2	8.4	0.30	0.48	124	35	19	14	192	96.9	27.9	9.8	4.9	139.4	39.4	11.1	3.8	2.3	56.7	72.6
3	5	20	16	314.2	8.6	0.31	0.49	126	37	20	14	197	103.2	29.7	10.4	5.2	148.5	42.0	11.8	4.0	2.5	60.3	75.4
3	12	19.5	15	298.6	8.2	0.28	0.48	119	33	18	12	182	91.5	26.3	9.2	4.6	131.7	37.2	10.5	3.6	2.2	53.5	72.4
4	7	19.5	13	298.6	8.1	0.26	0.48	117	31	16	12	176	89.7	25.8	9.0	4.5	129.1	36.5	10.3	3.5	2.2	52.4	73.3
4	12	20	15	314.2	8.3	0.29	0.49	120	35	19	13	187	100.8	29.0	10.1	5.1	145.0	41.0	11.5	3.9	2.4	58.9	77.5
5	5	22	15	380.1	8.6	0.32	0.49	125	40	22	15	202	107.9	31.0	10.9	5.4	155.2	43.9	12.4	4.2	2.6	63.1	76.8
5	10	22.5	15	397.6	9.1	0.37	0.49	127	42	22	15	206	113.9	32.8	11.5	5.7	163.9	46.3	13.0	4.4	2.8	66.6	79.5
6	3	22	15	380.1	8.8	0.32	0.49	126	38	21	15	200	104.4	30.1	10.5	5.3	150.3	42.5	12.0	4.1	2.5	61.1	75.1
6	7	22.5	15	397.6	9.1	0.36	0.48	130	42	19	15	206	114.6	33.0	11.5	5.8	164.9	46.6	13.1	4.5	2.8	67.0	80.0
7	4	23	16	415.5	9.5	0.46	0.5	130	45	19	15	209	114.9	33.1	11.6	5.8	165.3	46.7	13.2	4.5	2.8	67.2	79.1
7	9	23	16	415.5	9.4	0.45	0.5	129	44	20	15	208	113.1	32.6	11.4	5.7	162.8	46.0	13.0	4.4	2.7	66.1	78.3
7	11	23	15	415.5	9.4	0.42	0.5	125	42	23	15	205	115.1	33.1	11.6	5.8	165.7	46.8	13.2	4.5	2.8	67.3	80.8
8	10	24	16	452.4	9.6	0.54	0.5	134	45	23	15	217	123.6	35.6	12.5	6.2	177.9	50.3	14.2	4.8	3.0	72.3	82.0
8	11	24	17	452.4	9.9	0.59	0.5	136	46	23	15	220	126.2	36.3	12.7	6.4	181.6	51.3	14.5	4.9	3.1	73.8	82.5
Prom		21.8	15.3	373.9	8.9	0.37	0.49	126.2	39.6	20.1	14.4	200.3	108.8	31.3	10.90	5.5	156.5	44.3	12.5	4.2	2.6	63.6	78.0

Anexo E. Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.

Variable dependiente: Biomasa seca aérea total (kg.)

Variable independiente: Diámetro a la altura de pecho (D.A.P.) (cm.)

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	0,81812	0,317152	2,57958	0,0218
Pendiente	1,37321	0,102847	13,3519	0,0000

NOTA: ordenada = $\ln(a)$

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,14782	1	0,14782	178,27	0,0000
Residuo	0,0116084	14	0,000829171		
Total (Corr.)	0,159428	15			

Coefficiente de Correlación = 0,962906

R-cuadrado = 92,7187 %

Error estándar de estimación = 0,0287953

Anexo F. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 2,26623 * D.A.P. \text{ (cm.)}^{1,37321}$.

Número parcela	Número árbol	D.A.P. (cm)	Biomasa seca aérea total real (kg)	Biomasa seca aérea total estimada (kg)
1	8	22.5	168.6	163.0
1	9	22.5	169	163.0
2	2	20	142.3	138.6
2	9	20	139.4	138.6
3	12	19.5	131.7	133.9
4	7	19.5	129.1	133.9
4	12	20	145	138.6
5	5	22	155.2	158.0
5	10	22.5	163.9	163.0
6	3	22	150.3	158.0
6	7	22.5	164.9	163.0
7	4	23	165.3	168.0
7	9	23	162.8	168.0
7	11	23	165.7	168.0
8	10	24	177.9	178.1
8	11	24	181.6	178.1

Se ejecuta la **prueba de "t"** para comparar las medias de las dos muestras. También se establece los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -11,1511 hasta 11,2636. Dado que el intervalo contiene el valor 0.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95,0%.

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total real (kg.):
157,044 +/- 8,41994 [148,624, 165,464]

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total estimada (kg.):
156,987 +/- 8,11904 [148,868, 165,107]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: 0,05625 +/- 11,2074 [-11,1511,11,2636]

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: $media1 = media2$

Hipótesis alternativa: $media1 <> media2$

suponiendo varianzas iguales: $t = 0,0102502$ P-Valor = 0,99189

En este caso, la prueba de "t" se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0,0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0,0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0,05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

Anexo G. Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.

Variable dependiente: Biomasa seca aérea total (kg.)

Variable independiente: Altura total (m)

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	1,55357	0,73998	2,09948	0,0559
Pendiente	1,28832	0,271586	4,74368	0,0004

NOTA: ordenada = $\ln(a)$

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,081258	1	0,081258	22,50	0,0004
Residuo	0,0469438	13	0,00361106		
Total (Corr.)	0,128202	14			

Coefficiente de Correlación = 0,796134

R-cuadrado = 63,3829 %

Error estándar de estimación = 0,0600921

Anexo H. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 4,72832 * \text{Altura total (m)}^{1,28832}$

Número parcela	Número árbol	Altura total (m)	Biomasa seca aérea total real (kg)	Biomasa seca aérea total estimada (kg)
1	8	15	168.6	154.8
1	9	16	169	168.3
2	2	15	142.3	154.8
2	9	15	139.4	154.8
4	7	13	129.1	128.8
4	12	15	145	154.8
5	5	15	155.2	154.8
5	10	15	163.9	154.8
6	3	15	150.3	154.8
6	7	15	164.9	154.8
7	4	16	165.3	168.3
7	9	16	162.8	168.3
7	11	15	165.7	154.8
8	10	16	177.9	168.3
8	11	17	181.6	181.9

Se ejecuta la **prueba de "t"** para comparar las medias de las dos muestras. También se establece los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -9,73233 hasta 10,2523. Dado que el intervalo contiene el valor 0.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95,0%.

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total real (kg.):
158,733 +/- 8,18734 [150,546, 166,921]

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total estimada (kg.): 158,473 +/- 6,5139 [151,959, 164,987]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: 0,26 +/- 9,99233 [-9,73233, 10,2523]

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alternativa: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = 0,0532996 P-Valor = 0,957872

En este caso, la prueba de "t" se ha realizado para determinar para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0,0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0,0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0,05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

Anexo I. Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$.

Variable dependiente: Biomasa seca aérea total (kg.)

Variable independiente: Área basal (cm²)

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	0,983922	0,304362	3,23274	0,0060
Pendiente	0,686615	0,051361	13,3684	0,0000

NOTA: ordenada = ln(a)

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,147846	1	0,147846	178,71	0,0000
Residuo	0,0115818	14	0,000827274		
Total (Corr.)	0,159428	15			

Coefficiente de Correlación = 0,962992

R-cuadrado = 92,7354 %

Error estándar de estimación = 0,0287624

Anexo J. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = 2,67493 \cdot \text{Área basal (cm}^2\text{)}^{0,686615}$

Número parcela	Número árbol	Area basal (cm ²)	Biomasa seca aérea total real (kg)	Biomasa seca aérea total estimada (kg)
1	8	397.6	168.6	162.979
1	9	397.6	169.0	162.979
2	2	314.2	142.3	138.654
2	9	314.2	139.4	138.654
3	12	298.6	131.7	133.889
4	7	298.6	129.1	133.889
4	12	314.2	145.0	138.654
5	5	380.1	155.2	158.019
5	10	397.6	163.9	162.979
6	3	380.1	150.3	158.019
6	7	397.6	164.9	162.979
7	4	415.5	165.3	167.982
7	9	415.5	162.8	167.982
7	11	415.5	165.7	167.982
8	10	452.4	177.9	178.088
8	11	452.4	181.6	178.088

Se ejecuta la **prueba de "t"** para comparar las medias de las dos muestras. También se establece los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -11,1459 hasta 11,2564. Dado que el intervalo contiene el valor 0.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95,0%.

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total real (kg.):
157,044 +/- 8,41994 [148,624, 165,464]

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total estimada (kg.):
156,989 +/- 8,10963 [148,879, 165,098]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: 0,05525 +/- 11,2011 [-11,1459, 11,2564]

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alternativa: $\mu_1 < \mu_2$

suponiendo varianzas iguales: $t = 0,0100736$ P-Valor = 0,992029

En este caso, la prueba de "t" se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0,0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0,0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0,05, no podemos rechazar la hipótesis nula.

Anexo K. Análisis de Regresión - Modelo Curva-S: $Y = \exp(a + b/X)$.

Variable dependiente: Biomasa seca aérea total (kg.)

Variable independiente: Diámetro de copa (m²)

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	6,62795	0,127878	51,8304	0,0000
Pendiente	-14,0628	1,13669	-12,3717	0,0000

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,147431	1	0,147431	153,06	0,0000
Residuo	0,0144484	15	0,000963228		
Total (Corr.)	0,16188	16			

Coefficiente de Correlación = -0,95433

R-cuadrado = 91,0746 %

Error estándar de estimación = 0,0310359

Anexo L. Prueba de t para validación del modelo $B_{sat} \text{ (kg.)} = \exp(6,62795 - 14,0628/\text{Diámetro de copa (m}^2\text{)})$.

Número parcela	Número árbol	Diámetro de copa (m ²)	Biomasa seca aérea total real (kg)	Biomasa seca aérea total estimada (kg)
1	8	9.1	168.6	161.18
1	9	9.3	169.0	166.63
2	2	8.5	142.3	144.53
2	9	8.4	139.4	141.71
3	5	8.6	148.5	147.33
3	12	8.2	131.7	136.04
4	7	8.1	129.1	133.19
4	12	8.3	145.0	138.88
5	5	8.6	155.2	147.33
5	10	9.1	163.9	161.18
6	3	8.8	150.3	152.91
6	7	9.1	164.9	161.18
7	4	9.5	165.3	172.02
7	9	9.4	162.8	169.33
7	11	9.4	165.7	169.33
8	10	9.6	177.9	174.7
8	11	9.9	181.6	182.62

Se ejecuta la **prueba de “t”** para comparar las medias de las dos muestras. También se establece los intervalos de confianza o los límites para cada media y para la diferencia entre las medias. De particular interés está el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -10,5458 hasta 10,6764. Dado que el intervalo contiene el valor 0.0, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95,0%.

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total real (kg.): 156,541 +/- 7,93814 [148,603, 164,479]

95,0% intervalo de confianza para la media de Biomasa seca aérea total estimada (kg.): 156,476 +/- 7,67733 [148,799, 164,153]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:
suponiendo varianzas iguales: 0,0652941 +/- 10,6111 [-10,5458, 10,6764]

contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alternativa: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = 0,012534 P-Valor = 0,990077

En este caso, la prueba de “t” se ha realizado para determinar si la diferencia entre las dos medias es igual a 0,0 frente a la hipótesis alternativa en la que la diferencia no es igual 0,0. Puesto que el p-valor calculado no es inferior a 0,05, no podemos rechazar la hipótesis nula.