



**ARTÍCULOS**  
**DE INVESTIGACIÓN**  
**CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

# MODELO ALOMÉTRICO GENERAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO POR PLANTACIONES DE CAUCHO *Hevea brasiliensis* Müll Arg. EN COLOMBIA

**Palabras clave:** Biomasa, *Hevea brasiliensis*; alometría; MDL; secuestro de carbono, Colombia.

**Key words:** Biomass, *Hevea brasiliensis*, allometric, carbon sequestration, Colombia.

*Jaime Alberto Moreno G.<sup>1</sup>  
Javier Darío Burgos Salcedo<sup>2</sup>  
Helmuth Edison Nieves O.<sup>3</sup>  
Camilo Ernesto Buitrago S.<sup>3</sup>*

## RESUMEN

La Convención Marco de Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas promulga Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) para disminuir los niveles de concentración de gases de efecto invernadero (GEI), sin frenar la tendencia del desarrollo bajo la aplicación de mecanismos de equimarginalidad, incluidos en el Protocolo de Kyoto, referente a las actividades de forestación y reforestación. Estos mecanismos se perfilan como potenciales para generar un desarrollo sostenible en Colombia. El caucho (*Hevea brasiliensis*) es una especie arbórea que, además de su aprovechamiento de látex, permite incursionar en el mercado los servicios ambientales derivado de la captura del carbono atmosférico, posibilitando mayor acceso a los productores debido al aumento de su rentabilidad.

Para concretar lo anterior es necesario contar con información plenamente verificable acerca de la biomasa y secuestro de carbono que produce esta especie en Colombia. La presente investigación partió de un muestreo con ensayos destructivos de biomasa a 39 árboles, 30

contaron con muestreo de raíz, en cinco diferentes regiones del país, que permitió abarcar un rango de edad de 1 a 36 años, a los cuales se les determinó el contenido de carbono para diferentes particiones de biomasa (hojas, ramas, fuste y raíz), mediante un analizador C-H-N 600 LECO.

Con los contenidos medidos de carbono por edad del árbol, se determinó que no es necesario producir ecuaciones regionales, puesto que es posible estimar la biomasa mediante un modelo alométrico general que permite conocer en función de la circunferencia a la altura del pecho (C.A.P) de los árboles, la cantidad de carbono almacenado por hectárea en una plantación de caucho, con la inclusión implícita de edad de la misma en condiciones normales de desarrollo de los vegetales.

## ABSTRACT

The Climatic Change Convention of the United Nations promulgates Clean Development Mechanisms (CDM) as a solution for diminishing the high level of Greenhouse gases,

- 1 Investigador Principal. Ingeniero Forestal. M.Sc Economía. Profesor del Área Económica y Política. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail. jmoreno@udistrital.edu.co.
- 2 Coinvestigador Biólogo. M.Sc Matemáticas. Profesor del Área de Estadística y Diseño Experimental. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail. jdariob@udistrital.edu.co.
- 3 Asistentes de Investigación. Ingenieros Forestales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

without braking the low development tendency of the application of equimarginal mechanisms, included in the Kyoto protocol related with afforestation and reforestation activities, these mechanisms are profield as tools to generate sustainable development in Colombia. The rubber, (*Hevea brasiliensis*) is in arboreal species with high potential to allow an important participation in the international market derived from environmental services of atmospheric carbon capture, besides their latex production and use.

To sum up the above-mentioned it is necessary to have certifiable information about the biomass and kidnapping of carbon that it produces this species in Colombia. The present investigation left of a sampling with destructive rehearsals of biomass to 39 trees, 30 had root sampling, in five different regions of the country that allowed to embrace an age range from 1 to 36 years, to which were determined the content of carbon for different partitions of biomass (leaves, branches, shaft and root), by means of an analyzing C-H-N 600 LECO.

With the measured contents of carbon for age of the tree was determined that it is not necessary to produce regional equations, since it is possible to estimate the biomass by means of a general allometric model that allows to know in function from the circumference to the height of the chest (C.A.P) of the trees, the quantity of carbon stored by hectare in a rubber plantation, with the implicit inclusion of age of the same one under normal conditions of development of the vegetables.

## INTRODUCCIÓN

Si se quiere acceder al mercado mundial de Certificación de Reducción de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), deben hacerse estudios a través de actividades forestales que respalden científicamente la cantidad de carbono que puede almacenar una plantación

forestal durante un período dado; información indispensable para poder cumplir las condiciones para la inclusión de las acciones de forestación y reforestación como elegibles dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto, así como dentro de los Sistemas de Mercado Voluntario de CER's.

El caucho *Hevea brasiliensis* permite, además del aprovechamiento industrial del látex y la madera al final del turno, la venta del servicio ambiental de fijación de CO<sub>2</sub> que realiza durante su ciclo productivo de látex, que permitiría aumentar la viabilidad financiera de la plantación convencional.

La cuantificación y comercialización de este servicio podría traducirse en una mayor posibilidad de acceso para los productores colombianos que enfrentan en el período improductivo un obstáculo para su implementación.

Experiencias exitosas de cultivo de caucho como alternativa en zonas afectadas por cultivos ilícitos muestran que el aprovechamiento de este árbol es más rentable que otros cultivos tradicionales, posibilitando mejores condiciones de vida que las alcanzadas con cultivos lícitos o ilícitos en estas áreas. De otra parte, en Colombia se inició la formulación e implementación de proyectos para la siembra masiva de caucho (Zuleta, 2003; Min. Agricultura, 2004) que poseen dentro de sus objetivos obrar como sumidero de carbono. Un caso de estos proyectos es el establecimiento de 20.000 ha de esta especie a ser implementado en la región de la Orinoquía alta (Min. Agricultura, 2004). La venta del servicio captura y secuestro de carbono permitiría aprovechar el mecanismo para contribuir de manera efectiva al desarrollo sostenible del país.

## OBJETIVO

El objetivo de este estudio es elaborar una herramienta para facilitar el diseño de proyectos MDL con *Hevea brasiliensis*, para ello se gene-

ró un modelo general capaz de estimar biomasa y el contenido de carbono de la misma en función de la circunferencia a la altura del pecho (C.A.P), que incorpora la edad de la plantación.

## ANTECEDENTES

En Colombia no existen antecedentes de medición de biomasa del caucho, mientras que a nivel mundial, por ejemplo en India, varios estudios de determinación de biomasa aérea de algunos clones (Chaudhuri et al., 1995; Dey et al., 1996; Schroth et al., 2002), llegaron a ecuaciones alométricas de la especie para plantaciones inferiores a 14 años.

La tendencia actual en los estudios de biomasa forestal, así como en varios de los de ámbito agroforestal, tienen el propósito adicional de determinar la capacidad de secuestro de carbono de especies arbóreas ampliamente usadas para la reforestación e implementación de sistemas agroforestales (Delaney et al., 1999; Díaz y Molano, 2001; López et al., 2001; Son et al., 2001; Aristizabal et al., 2002; Kraenzel et al., 2003; Montagu et al., 2004).

Al estudiar las relaciones existentes entre el tamaño, incremento y peso de las diversas partes que componen las plantas y animales, algunos investigadores se percataron que éstas seguían cierta regla general, y que al ser graficadas generaban una curva muy similar a la de cualquier otro ser viviente. Esta curva es llamada curva de crecimiento alométrico y representa una razón casi constante entre incrementos de estructuras de diferentes tamaños; esto produce un gran incremento relativo de una variable con respecto a otra, en una escala lineal (Sokal & Rohlf, 1981). Hay que anotar que estas relaciones no sólo se representan en las características de un individuo o un grupo de ellos, sino también pueden llegar a hacerlo a nivel ecosistémico (Niklas & Enquist, 2002a). Dichas relaciones pueden representarse mediante la expresión matemática potencial:  $Y = \beta X^\alpha$ .

Donde Y y X son variables interdependientes, como biomasa y diámetro,  $\beta$  es la constante alométrica y  $\alpha$  es el exponente escalar. Algunos autores han estudiado profundamente esta teoría, y empíricamente han llegado a demostrar que los valores de  $\beta$  y  $\alpha$  se mantienen relativamente constantes de una especie a otra (Niklas & Enquist, 2002a); además,  $\alpha$  es indiferente al tamaño y filiación taxonómica (Niklas & Enquist, 2002b) y siempre es múltiplo de  $\frac{1}{4}$  (West et al., 1999a), teoría que el mismo (West et al., 1999b) ha probado para las plantas, donde se mantienen estas relaciones a través de 12 órdenes de magnitud.

Niklas & Enquist (2002a) propusieron una serie de reglas canónicas que gobiernan la masa y crecimiento de las plantas; así, concluyen que el crecimiento anual es proporcional a la  $\frac{3}{4}$  potencia (escala  $\frac{3}{4}$ ) de la biomasa del cuerpo, y que el crecimiento total anual escala es isométrico con respecto a la capacidad del individuo de captar luz. De igual forma, en un momento dado la biomasa de las hojas escala en una potencia de  $\frac{3}{4}$  del tallo y la raíz, y el tallo y la raíz escalan isométricamente uno respecto al otro (al igual que la biomasa aérea y la raíz), las dos primeras relaciones anteriores se representan mediante las ecuaciones  $M_L = 0,195M_S^{3/4}$  y  $M_L = 0,407M_R^{3/4}$  ( $M_L$  biomasa de hojas,  $M_S$  biomasa de tallo,  $M_R$  biomasa de raíz), que generan los porcentajes de biomasa para hojas, tallo y raíz como 5%, 70% y 25%, respectivamente. Este modelo se cumple para biomasa a través de 10 órdenes de magnitud (Niklas & Enquist, 2002a) y aseveran que la biomasa de hojas escala a la segunda potencia del diámetro (o circunferencia).

En el mismo trabajo, los autores señalan que conocer las magnitudes de  $\beta$  y  $\alpha$  para una especie puntual puede resultar difícil debido a la variación de densidad aparente de los diversos tejidos, a factores fenotípicos y ontogenéticos, no obstante, al conocer exactamente el valor constante alométrico y el exponente escalar,

éstos se encontrarían dentro de los rangos que ellos proponen.

## METODOLOGÍA

### POBLACIÓN

La población arbórea objeto de este estudio se encuentra conformada por las plantaciones de la especie *Hevea brasiliensis* establecidas en Colombia a escala comercial, sin discriminar los diferentes clones que actualmente están sembrados en el país, que son principalmente el FX 3864, FX 25, FX 2261, IAN 713, IAN 873 y PB 86 (Torres, 2003a). Se decidió estudiar el caucho específicamente y no subespecíficamente, ya que no hay exactitud en la información secundaria disponible acerca de localización geográfica, edades y áreas de plantaciones para un clon dado.

### MUESTREO

La plantación de caucho *Hevea brasiliensis* en el país no ha tenido una continuidad temporal ni espacial, es decir, no muestra ningún esquema de ordenación que obedezca a una distribución sistemática por edad, superficie y ubicación, por lo que resulta ser muy heterogénea, tal como ocurre en el Departamento del Caquetá, región que concentra mayor área (51,5%) de las plantaciones de caucho del país (Torres, 2003a).

La determinación de la muestra para este estudio se basó en información secundaria, referente al área actual de las plantaciones de caucho en Colombia (Torres 2003b), la cual fue distribuida en 5 rangos de edades; es claro que los sitios en donde se ha concentrado esta actividad 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 crecimen-

to de los árboles. Dichas variables son consideradas en el presente estudio de forma independiente; por tanto, se aplicó un método de muestreo multicriterio.

Para determinar los municipios a muestrear (de acuerdo con la información disponible), se optó por elaborar una Matriz Binaria que tomó como criterio el área y el rango de edad, elementos tenidos en cuenta para la escogencia de los lugares. El resultado de esta valoración se expone en la **Tabla 1**, indica además la ubicación (municipio) de los árboles que hicieron parte de la muestra.

Para hallar la muestra por municipio, se aplicó un muestreo por conglomerados (Ospina, 2001), y ésta se distribuyó de forma proporcional de acuerdo con el área plantada en cada rango de edad; posteriormente, con la densidad de siembra actual de las plantaciones se determinó el número de árboles que corresponden a la muestra de superficie. Se encontró el área total de la muestra como 43 (unidades muestrales) parcelas de 250 m<sup>2</sup> cada una, que significa en individuos 43 árboles a muestrear, 17 con una edad de 0 a 7 años, 16 con edad de 8 a 15 años, 6 con 16 a 22 años y 4 mayores de 30 años. En campo, por dificultades de apeo, no se pudieron muestrear cuatro (4) árboles en Puerto López. La ubicación de las parcelas en cada municipio se efectuó al azar, apoyándose para ello en cartografía y sistemas de posicionamiento global.

No se utilizaron las metodologías recomendadas por Macdicken (1997) y Schlegel (2001), pues requieren un premuestreo de la población para conocer la variación de ésta en términos de error estándar de C.A.P y/o biomasa, lo que teóricamente se puede compensar con el manejo estadístico del universo muestral bajo parámetros de edad, lo cual genera mayor eficiencia en el trabajo de campo dado el carácter nacional del estudio.

**Tabla 1.** Municipios que hacen parte de la muestra y número de árboles a muestrear

Departamento	Municipio	> = 80 ha	Distribución de edades					Total	Número de árboles a muestrear				
									Por edades				Total
			0 - 7	8-15	16-22	23 -30	>30		0 - 7	8-15	16-22	>30	
Caquetá	Belen de los And.	1	1	1	1		1	5	1	2	1	2	6
	Doncello	1	1	1	1		1	5	0	2	3	1	6
	Florencia	1	1	1	1			4	1	3	1	0	5
	Milán	1	1	1				3	0	1	0	0	1
	Morelia	1	1	1	1		1	5	0	0	0	1	1
Guaviare	El Retorno	1	1	1	1			4	1	2	0	0	3
	San Jose del G.	1	1	1				3	2	0	0	0	2
Meta	Puerto López	1	1	1				3	6	5	0	0	11
Santander	Cimitarra	1	1	1				3	5	0	0	0	5
Tolima	Mariquita		1	1	1			3	1	1	1	0	3
<b>TOTAL</b>									17	16	6	4	43

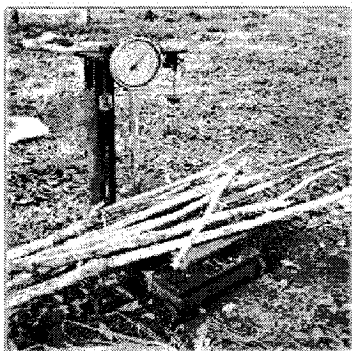
Municipios con plantaciones de caucho que por accesibilidad (orden público y vías) no se tuvieron en cuenta son: Albania, Cartagena del Chaira, Curillo, Puerto Rico, San Vicente del Caguán y Valparaíso-Solita, todos en el departamento del Caquetá.

**MUESTREO  
DESTRUCTIVO DE BIOMASA**

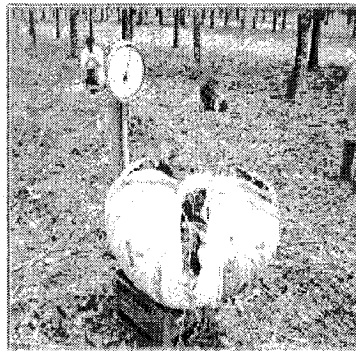
El muestreo se realizó por método destructivo de biomasa en cada una de las parcelas seleccionadas, para lo cual se usó el método del árbol de área basal promedia para seleccionar individuos de caucho tipo a cosechar (Lopera & Gutiérrez, 2000). Se cotejaron además los caracteres morfológicos de este árbol (altura, ramificación, forma de copa, etc.) con los pre-

sentados por los árboles de la parcela para constatar que sus caracteres eran los típicos de la plantación.

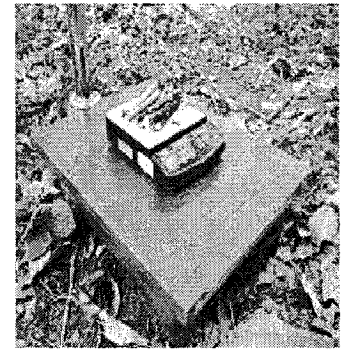
La biomasa aérea y subterránea se estudió en términos alométricos, para lo cual se efectuó un muestreo destructivo a nivel nacional, que abarcó medición de árboles en los departamentos de Caquetá, Tolima, Santander, Guaviare y Meta, los cuales además de presentar la mayor extensión plantada, tienen diversos estados de desarrollo de las plantaciones. Se efectuaron muestreos destructivos de biomasa a un total de 39 árboles de los cuales a 30 se les extrajo la raíz, y se discriminó para cada unidad muestral particiones de biomasa que separan diferentes órganos de los individuos (fuste, ramas, ramitas, hojas y raíces).



**Figura 1**  
Peso y muestreo de ramas



**Figura 2**  
Peso y muestreo de hojas



**Figura 3**  
Peso y muestreo de ramitas

El muestreo destructivo consistió en apearse el árbol, y determinar la totalidad de su peso húmedo; para ello se consideraron 5 particiones: fuste, raíz, ramas ( $2 \text{ cm} < \text{diámetro} < 5 \text{ cm}$ ), ramitas ( $\text{diámetro} < 2 \text{ cm}$ ) y hojas. El peso húmedo fue la base para estimar la biomasa (peso seco) y más adelante el carbono. **Figuras 1, 2 y 3.**

Una vez apeado el árbol, se procedió a medir en campo su longitud total; seguidamente se separaron las particiones y se realizó su pesaje de forma independiente; una pequeña porción (más o menos 1 kg) de cada una de las particiones, se recolectó para hallar el contenido de humedad y de carbono en el laboratorio. La biomasa subterránea correspondió a la totalidad de raíces encontradas en un hoyo de 1 m de radio y 1,3 m de profundidad; la culminación de la raíz o raíces pivotantes se extrajo con ayuda de palancas mecánicas o manuales.

#### **ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA CH% Y CONTENIDO DE CARBONO (%)**

Para obtener el contenido de humedad de las muestras recolectadas en campo, éstas fueron sometidas a secamiento en estufa a temperatura constante de  $100^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  hasta obtener peso constante (peso seco). El análisis de contenido de carbono se efectuó para 55 muestras en el Laboratorio de Carbones del Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS) en Bogotá, mediante el uso de un Analizador elemental para macromuestras C-H-N-600 marca LECO sistema 785-500.

#### **ANÁLISIS DE DATOS**

Para la obtención del modelo general de biomasa aérea por árbol, se utilizaron los datos provenientes de los 39 individuos cosechados en todos los sitios muestreados y se realizó esto mismo únicamente para los diecinueve (19) árboles apeados en el Caquetá (modelo lo-

cal), por ser de las regiones escogidas la que presenta la mayor cantidad de datos.

La explicación del comportamiento del contenido de biomasa en las diferentes particiones de los árboles de caucho se logró relacionando este contenido con los datos de otras variables obtenidas en campo con cada unidad experimental. Se comparó su comportamiento respecto a altura, edad, C.A.P., explorando la relación existente entre ellas. Se tomó C.A.P y no D.A.P, pues este último asume que la sección de los árboles es una circunferencia perfecta, hecho que no es siempre cierto (Ong *et al.*, 2004).

Se probaron regresiones lineales y no lineales; la escogencia de la más adecuada se realizó teniendo en cuenta el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), los cuadrados medios del error (CME) y la menor suma de cuadrados de los valores reales menos los estimados (SCOE). Además, para las regresiones se eliminaron datos "outliers" buscando incrementar el ajuste de las regresiones escogidas. Finalmente, las regresiones obtenidas se linealizaron con una transformación logarítmica (base 10) de las variables en estudio, técnica utilizada por diversos autores para facilitar el tratamiento estadístico del modelo y cumplir las premisas sobre homoscedasticidad de un análisis paramétrico (Stell & Torrie, 1980; Sokal & Rohlf, 1981; Niklas & Enquist, 2002a; del Valle, 2003; Ong *et al.*, 2004).

Dado que se conoce la existencia de sesgos estimativos al utilizar en los cálculos ecuaciones transformadas logarítmicamente, al operar los antilogaritmos sobre los resultados de la estimación, es normalmente aceptado el uso de factores de corrección por sesgo; Snowdon, 2002); razón por la cual en la presente investigación se calculó la corrección de sesgo propuesta por Snowdon *et al.* (2002).

#### **RESULTADOS**

De los 43 árboles que inicialmente se debían muestrear, únicamente se muestrearon 39, pues

4 de los árboles correspondientes a Puerto López no se pudieron apelar para adelantar los muestreos destructivos. Esto no incide en la representatividad estadística de los resultados, puesto que la muestra fue concebida con una sobrestimación del veinte por ciento (20%), para contrarrestar dificultades estimativas surgidas de no haber realizado un premuestreo, y superar posibles eventualidades que impidiesen la consecución total de la muestra establecida. Así, la disminución del número de árboles muestreados, frente a la calculada, se encuentra dentro del rango de seguridad preestablecido.

### BIOMASA AÉREA

La biomasa aérea total de cada árbol contenida en la respectiva partición varía significativamente (Tabla 2); los valores de biomasa de ramitas,

ramas y hojas son ampliamente diferentes, presentándose en hojas cambios debido a la defoliación de los árboles del Departamento de Caquetá, que padecen del mal suramericano de la hoja (*Microcyclus ulei*), llegando al extremo de defoliar totalmente los individuos, de otra parte, los valores de biomasa en el fuste son los que menos varían. Para disminuir la variación porcentual de cada partición respecto al peso total en biomasa aérea, se sumaron los valores de ramitas y ramas, para conformar una nueva partición (Ramas totales) que tiene un coeficiente de variación menor (CV = 49%) que la presentada por ramas y ramitas. Sin embargo, este valor es sumamente alto, por lo que se definió una nueva partición de agregación en tallo, es compuesta por las ramitas, ramas y fuste. Esta partición presenta un coeficiente de variación de 3,85%, muchísimo menor al que muestran cada uno de sus componentes por separado.

**Tabla 2.** Promedio, rango de variación y coeficiente de variación (CV) de la biomasa total aérea para cada partición

Componente	Promedio (%)	Rango (%)		Desviación estándar	CV (%)
		Min	Max		
Partición					
(1) Fuste	74,77	43,34	90,93	11,28	15,088
(2) Ramitas	7,96	3,06	20,06	4,15	52,135
(3) Ramas	13,52	4,60	37,67	8,88	65,699
(2+3) Ramas totales	21,48	6,96	47,85	10,53	49,021
(1+2+3) Tallo	96,22	84,39	100,00	3,71	3,852
(4) Hojas	3,78	0,00	15,61	3,71	98,043

Esta nueva partición (Tallo) es utilizada ampliamente en varios estudios de biomasa y alometría (NiKlas & Enquist, 2002a; NiKlas & Enquist, 2002b), elemento que se acomoda muy bien a los requerimientos para el comercio de CER, puesto que lo importante es el peso total (que contiene un determinado porcentaje de carbono) en términos de biomasa aérea y subterránea, y no el peso de cada partición.

### BIOMASA TOTAL (INCLUYE SUBTERRÁNEA)

Para analizar este ítem, consideramos además de las particiones aéreas, la partición subterránea de la raíz, para lo cual sólo se tuvieron en cuenta los 29 árboles a los cuales se les extrajo esta partición.

En las muestras tomadas no se encontraron sistemas radiculares pivotantes y profundos



como algunos autores lo describían (Rincón, 1996; Torres, 1999), solamente los árboles de poca edad (menos de 3 años) poseían dichas características, los demás individuos tenían

entre 2 y 5 raíces principales simulando una pivotante, y no profundizaban en el suelo, más de 1,3 m aproximadamente.

**Tabla 3.** Promedio, rango de variación y coeficiente de variación de la biomasa total para cada partición.

Componente	Promedio (%)	Rango (%)		Desviación estándar	CV (%)
		Min	Max		
Partición					
(1) Fuste	60,83	35,55	79,09	10,13	16,6559725
(2) Ramitas	6,76	2,96	14,15	3,17	46,8855049
(3) Ramas	10,76	4,00	32,66	8,02	74,5119534
(2+3) Ramas totales	17,52	4,68	41,49	9,01	51,3897321
(1+2+3) Tallo	78,35	46,10	87,92	6,87	8,76948451
(4) Raíz	18,39	10,51	47,40	6,11	33,2315852
(5) Hojas	3,26	0,00	13,83	3,26	99,8133521

La variación de las raíces es alta (**Tabla 3**), el coeficiente de variación del porcentaje que del peso total le corresponde a las raíces considerando todos los individuos es alto (33,23%) debido principalmente a la dificultad de extraer la raíz en su totalidad y a las diferencias morfológicas entre ellas, que como es obvio, dependen de las características del suelo, ambientales y de las condiciones de manejo a las que fueron sujetos en el proceso de injertación y trasplante. El peso de las raíces de los individuos considera su gran mayoría pero no toda ella, pues las raicillas (< 5 mm de diámetro) no fueron consideradas en este estudio.

### **ECUACIONES DE REGRESIÓN DE BIOMASA AÉREA**

Luego de relacionar la biomasa con diversas variables independientes, se definió que la biomasa aérea respondía mejor a la relación con el C.A.P, pues presenta mayor asociación que otras como la edad o la altura. No se consideró por cada análisis más de una variable independiente, pues al utilizar una combinación de variables predictoras que están íntimamente relacionadas podría generar error de multicolinealidad.

Los resultados de las regresiones estimadas para biomasa aérea tiene su mejor ajuste en su forma potencial, aun cuando SCOE (la suma de cuadrados de los valores reales menos los estimados) de la regresión (alométrica) no fue la más baja, y genera sobrestimaciones en el modelo (Lopera & Gutiérrez, 2000), se optó por utilizar esta regresión para describir el comportamiento de la biomasa aérea, pues la diferencia con el valor de la SCOE más bajo (modelo raíz cuadrada de  $y$ ) no es mucha; además, la regresión potencial presenta el mayor  $R^2$  y los menores CME (cuadrados medios del error), que dan cuenta del buen ajuste de la ecuación. La eliminación de datos "outliers" no aumentó significativamente el  $R^2$  de las regresiones y sí disminuyó el número de datos que afecta los grados de libertad, por lo cual se decidió dejar las regresiones iniciales, conservando el  $R^2$  original que de hecho es alto. Finalmente se linealizó la regresión seleccionada (dada su forma), mediante una transformación logarítmica (base 10) de las variables en estudio (**Tabla 4**).

La regresión potencial seleccionada posee un coeficiente de determinación mayor al 95%, lo

que según Novales (1993), elimina la necesidad de aplicar factores de corrección por sesgo, sin embargo, en la **Tabla 4** se muestra la corrección de sesgo (para biomasa aérea) pro-

puesta por Snowdon et al. (2002), que bien podría reducir la sobrestimación del modelo alométrico que evidencia la SCOE.

**Tabla 4.** Regresiones lineales y no lineales para biomasa aérea general y local (Caquetá)

Modelo	$\beta$	$\alpha$	SCOE	CME	R <sup>2</sup>	FC sesgo <sup>b</sup>
Potencial ( $y = \beta x^\alpha$ )	0,00411323	2,59558	74650,9382	0,0573718	0,979	--
Raíz cuadrada $Y [y = (\beta + x \alpha)^2]$	-2,01494	0,255611	62411,2802	1,99002	0,949	--
Curva S ( $y = 10^{(\beta + \alpha x)}$ )	6,01748	57,0179	464687,25	0,27838	0,899	--
Lineal ( $y = \beta + \alpha x$ )	-148,336	6,00693	148335,557	4009,07	0,836	--
Lineal ( $y' = \beta' + \alpha x'$ )	-2,3858	2,59558	74649,7071	0,010821 <sup>a</sup>	0,979	0,996
Lineal Caquetá ( $y' = \beta' + \alpha x'$ )	-2,3748	2,5739	27507,2512	0,0153653 <sup>a</sup>	0,971	0,987

y = biomasa aérea (kg); x = c.a.p (cm). y' = log biomasa aérea (kg);  $\beta'$  = log  $\beta$ ;  $x'$  = Log c.a.p (cm).

Las regresiones tuvieron una interrelación estadísticamente significativa a un 99% de nivel de confianza. a en unidades logarítmicas.

b Calculado según Snowdon 2002. Fuente: Presente estudio.

**Tabla 5.** Regresiones lineales para biomasa aérea

Partición	$\alpha$	B	Intervalo para $\alpha$ IC 95%	R <sup>2</sup>
(1) Fuste	2,6603	-2,6248	[2,452 - 2,869]	0,9761
(2) Ramitas	2,1767	-2,8453	[0,760 - 3,594]	0,8683
(3) Ramas	1,7064	-1,7257	[0,618 - 2,715]	0,5907
(2+3) Ramas totales	2,6406	-3,1807	[1,721 - 3,560]	0,882
(1+2+3) Tallo	2,6345	-2,4673	[2,510 - 2,759]	0,9796
(4) Hojas	1,8894	-2,8141	[-0,142 - 3,925]	0,5268
(1+2+3+4) Biomasa aérea	2,5956	-2,3858	[2,474 - 2,717]	0,9793

Todas las ecuaciones tienen la forma  $y = \beta + \alpha x$ . Donde: y = Logaritmo de la biomasa del componente (kg), x = Log CAP (cm). Todas las regresiones conservaron una interrelación estadísticamente significativa a un 99% de nivel de confianza. Fuente: Presente estudio.

Dado el tipo de regresión elegido para biomasa aérea, su aplicación está para cada partición por separado. Como era de esperar (teniendo en cuenta los resultados de las particiones de biomasa aérea), las regresiones lineales bilogarítmicas no se ajustaron muy bien, sobre todo para hojas, ramitas y ramas (R<sup>2</sup> = 52,68%,

86,83%, 59,07%, respectivamente) ver **Tabla 5**. Al unir las particiones leñosas en tallo se aumenta bastante la explicación de los datos, se incrementa ostensiblemente y alcanza un R<sup>2</sup> de 97,96%; aunque la biomasa aérea total tiene un R<sup>2</sup> inferior a la que se obtuvo para el tallo, dada la inclusión de un elemento tan variable como las hojas, presenta un coeficiente de determinación (97,93%) como se ve en la regresión lineal (**Figura 4**) que junto con otros atributos, como el intervalo para  $\alpha$  (2,47 - 2,72, 95% de confianza) y los residuos (**Figura 5**), permiten su utilización como modelo general. De estos

resultados también se concluye que la biomasa aérea total y el tallo presentan un comportamiento alométrico.

Los gráficos de residuos de la regresión tomada cumple con las premisas sobre distribución

normal de los residuos y que no poseen un patrón particular de distribución, reafirmando la validez de la regresión lineal bilogarítmica como modelo para describir el comportamiento de la biomasa aérea del *Hevea brasiliensis* en Colombia.

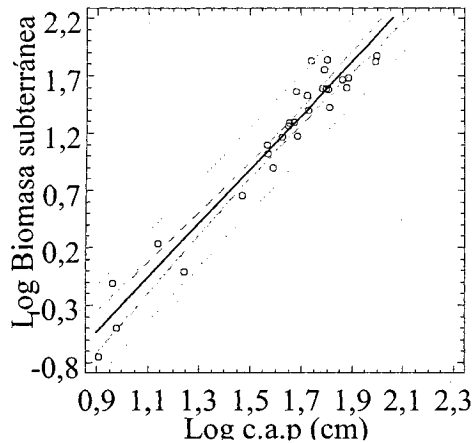


Figura 4. Regresión lineal C.A.P vs biomasa aérea.

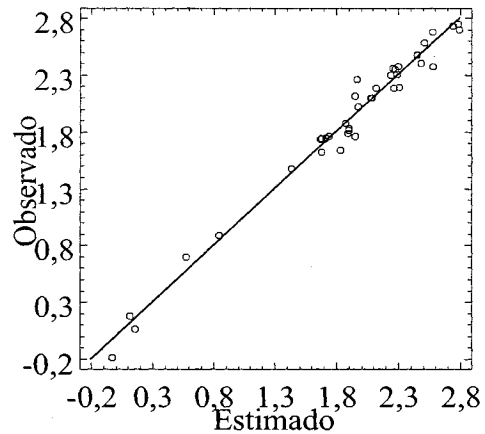


Figura 5. Probabilidad normal de los residuos.

En la **Tabla 4**, además de las ecuaciones probadas de biomasa aérea para el total de los 39 datos, se encuentra la regresión efectuada para el conjunto de datos del Caquetá, tomado como modelo local. Para comparar los modelos se efectuó una comparación de los residuos que ambos arrojan (**Figura 6**), además de un análisis de varianza para el exponente escalar  $\alpha$  y la constante alométrica  $\beta$ . Los resultados muestran que los residuos tienen distribución normal y son estadísticamente iguales a un nivel de confianza del 95% (los promedios, las desviaciones estándar son iguales a un nivel de confianza del 95%). De igual forma, el análisis de varianza demuestra que las constantes  $\alpha$  y  $\beta$

para ambos modelos son iguales a un nivel de confianza del 95% (**Tabla 6**), que permite utilizar el modelo general para determinar la biomasa aérea del *Hevea brasiliensis* sin necesidad de usar modelos específicos para cada sitio.

No se elaboró división alguna y análisis para las regiones restantes, ya que la coetaneidad de posibles datos, no permiten un tratamiento estadístico adecuado; además, no existe un criterio para generar otra región con un número suficiente de datos, uniendo los de los árboles cosechados en un lugar con los de los cosechados en otra área del muestreo.

**Tabla 6.** Análisis de varianza para  $\alpha$  y  $\beta$  de los modelos general y Caquetá

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados medios	RV	Valor de P
Entre grupos	0,00026732	1	0,00026732	0,01	0,9203
Dentro de grupos	0,0418284	2	0,0209142		
Total (Corr.)	0,0420957	3			

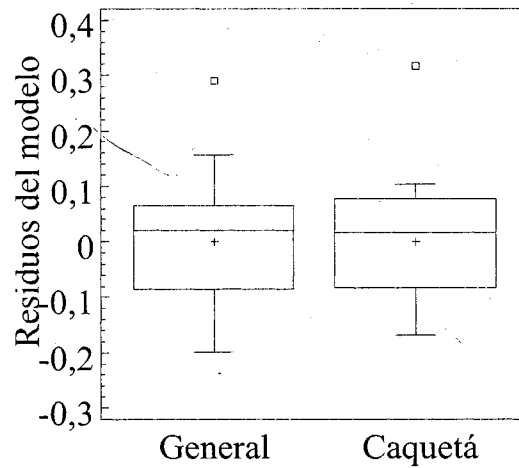


Figura 6. Comparación de residuos entre modelos.

### ECUACIONES DE REGRESIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA

Para este análisis se contó únicamente con los datos correspondientes a los 30 árboles a los cuales se les extrajo la raíz, donde la modelación de los datos respondió mejor a la relación con la C.A.P que con altura o edad (Figura 7). Los resultados muestran algo similar a lo ocurrido con la biomasa aérea (Tabla 7), en este caso el mayor R<sup>2</sup> y SCOE se obtienen con la regresión potencial; sin embargo, se tomó como modelo la regresión po-

tencial por las mismas razones expuestas para biomasa aérea, es decir, poca diferencia entre la SCOE menor y la que presenta esta regresión, distribución normal de los residuos (Figura 8), intervalo para  $\alpha$  (2,12 - 2,59, 95% de confianza). La eliminación de datos “outliers” no aumentó de manera significativa el R<sup>2</sup> y se redujo el número de datos, por lo que se mantuvo la regresión lineal bilogarítmica original (R<sup>2</sup>=94,2%).

Tabla 7. Regresiones lineales y no lineales para biomasa subterránea

Modelo	$\beta$	A	Interv- lo para $\alpha$ IC 95%	SCOE	EMS	R <sup>2</sup>	FC ses- go <sup>b</sup>
Potencial ( $y = \beta x^\alpha$ )	0,00217582	2,35688	---	7039,62326	0,1667	0,942	---
Curva S ( $y = 10^{(\beta + \alpha x)}$ )	4,27355	50,6788	---	6162,52957	0,314303	0,890	---
Raíz cuadrada Y Y [ $y = (\beta + x \alpha)^2$ ]	0,0401325	0,0956745	---	4575,86742	0,982503	0,847	---
Lineal ( $y' = \beta' + \alpha x'$ )	-2,66238	2,35688	[2,125 - 2,589]	7039,52423	0,0314416 <sup>a</sup>	0,942	0,989

y = biomasa de raíz (kg); x = c.a.p (cm). y' = log de la biomasa de raíz (kg);  $\beta'$  = log  $\beta$ ; x' = Log c.a.p (cm). Las regresiones tuvieron una interrelación estadísticamente significativa a un 99% de nivel de confianza. a en unidades

logarítmicas. b Calculado según Snowdon 2002.

La menor interrelación de la biomasa de raíces con la C.A.P frente a la obtenida con la bioma-

sa aérea ( $R^2 = 94,2\%$  y  $97,93\%$  respectivamente), se debe básicamente a la dificultad de medir esta partición en campo y a las diferencias morfológicas en las raíces, generadas probablemente por el tipo de suelo y las prácticas de manejo al momento de su trasplante.

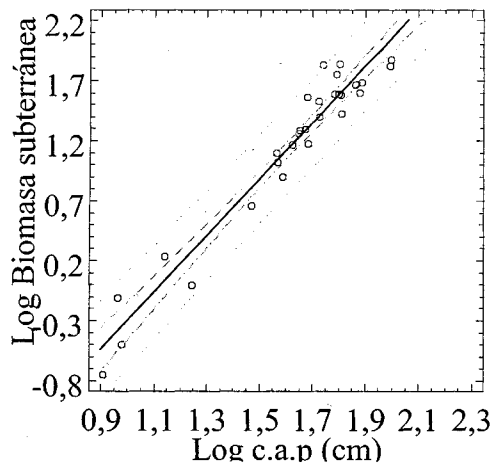


Figura 7. Regresión lineal C.A.P vs Biomasa subterránea

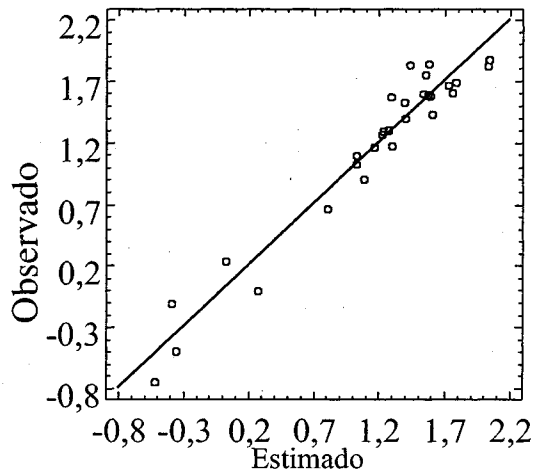


Figura 8. Probabilidad Normal de los residuos

## BIOMASA TOTAL

Para la obtención de la biomasa total hay que considerar las ecuaciones de biomasa aérea y biomasa subterránea por separado, pues no es posible hacer un análisis integrado cuando existe diferencia entre los datos de los dos. De esta forma, para conocer la biomasa total del caucho *Hevea brasiliensis* hay que estimar los valores por separado con las ecuaciones estimadas significativamente y sumarlos.

## ALOMETRÍA

Para comprobar si los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  propuestos por Niklas & Enquist (2002<sup>a</sup>) a relaciones de particiones de biomasa se cumplían en este estudio, fue necesario eliminar dos datos “outliers”, correspondientes a árboles con pocas hojas, que reducían significativamente la correlación entre las variables. Los resultados generados con los datos restantes muestran que las particiones de biomasa para el caucho siguen muy de cerca las reglas propuestas por estos autores, la **Tabla 8** muestra esta condición.

Únicamente en las relaciones biomasa de hojas-biomasa de tallo (MI-Ms), biomasa de hojas-biomasa de raíz (MI - Mr) y circunferencia (C.A.P), los intervalos para  $\alpha$  contienen el valor estimado por Niklas & Enquist (2002a); en los otros casos,  $\alpha$  se encuentra por fuera de los intervalos, esto puede atribuirse a que no se muestreó totalmente la partición de biomasa subterránea. Para las relaciones que incluyen a las hojas, se ve que los intervalos de confianza son más amplios que los obtenidos por Niklas & Enquist (2002a), hecho derivado de la defoliación de algunos árboles muestreados.

Tabla 8. Modelos de regresión para la estimación de biomasa contenida en árboles de caucho

	Predicho	Observado	IC 99%	R <sup>2</sup> (%)	n
Log Mh Vs Log MI	0.75	0.71+/- 0.66	0.65 - 0.77	81.29	35
Log Mh Vs Log Mr	0.75	0.76+/- 0.08	0.68 - 0.84	78.06	26
Log MI Vs Log Mr	1.00	1.08+/- 0.04	1.03 - 1.12	95.63	29
Log Ms + 1 Vs Log Mr	1.00	1.06+/- 0.04	1.01 - 1.10	95.41	29
Log c.a.p Vs Lg Hojas	2.00	1.85+/- 0.17	1.68 - 2.02	78.56	35

## CONTENIDO DE CARBONO

El contenido de carbono para los diferentes componentes resultó ser más bajo de lo que generalmente reseñan diversos autores (Brown, 1997; McDicken, 1997); el promedio para la biomasa fue de 44,42%, variando de 41,47% en

el fuste a 49,86 en hojas. Como se ve en la Tabla 9, con una desviación estándar para el promedio de las particiones apenas de 1,87 y el coeficiente de variación (CV%) para este mismo, fue de 4,21%, lo que posibilita usar este valor medio como contenido de carbono para la biomasa del caucho.

**Tabla 9.** Contenido de carbono promedio, máximo y mínimo para los componentes analizados.

Partición	N° de muestras	Promedio C%	Rango (%)		Desviación estándar	CV (%)
			Máximo	Mínimo		
Fuste	14	43,96	45,06	41,47	1,167	2,65
Ramas totales	10	43,89	45,24	42,83	0,82	1,87
Hojas	5	47,1	49,86	44,96	1,86	3,95
Raíz	5	42,76	43,64	41,41	0,86	2,01
Promedio		44,42	47,1	42,76	1,87	4,21
Mediana		44,22				
Necromasa	10	43,11	47,66	38,03	2,64	6,12

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El menor ajuste de las regresiones alométricas de ramas y ramitas respecto al de otras particiones, de manera general puede atribuirse a diferencias entre el manejo de las podas de formación de los individuos y la densidad de siembra de las diversas plantaciones muestreadas, que hace variar la cantidad relativa de estas particiones respecto a la biomasa total; sin embargo, estas actividades de manejo no hacen variar la biomasa total sin considerar las hojas de los individuos, pues se elevan los coeficientes de determinación al reunir estas variables en las particiones “generadas” (ramas totales y tallo), aumentando levemente el valor en ramas totales y mucho más en tallo ( $R^2 = 97,96\%$ ). De esta manera se confirma el porqué otros autores no subdividen los individuos en más de tres particiones, tallo, raíz y hojas (Niklas & Enquist, 2002a, 2002b).

El poco ajuste de la regresión alométrica de hojas con el CAP se puede atribuir a la alta va-

riación porcentual de esta partición con respecto a la biomasa aérea total, producto de condiciones ambientales, que en algunos sitios mantienen el medio adecuado para la proliferación del mal suramericano de la hoja, que aumenta la defoliación de los árboles y, por tanto, reduce ostensiblemente la cantidad de biomasa de esta partición. Si el muestreo en el Caquetá se hubiese realizado luego de una época seca, cuando los árboles se recuperan de la afectación, es probable que la biomasa de hojas en sus individuos se elevara, al igual que la correlación general de todos los datos con el CAP.

Aunque la partición hojas al ser considerada independientemente presenta altas variaciones y un bajo  $R^2$ , no incide de forma contundente en el modelo de la biomasa aérea total, pues posee una relativa poca cantidad de biomasa. Así, se ve que el modelo mostrado en la **Tabla 5** posee un  $R^2$  (97,93%) levemente inferior al de la partición tallo (97,96%), valor generado por la inclusión de las hojas en el modelo de regresión.

Podría pensarse que el manejo cultural de la plantación infringe cambios importantes en la biomasa de los individuos; sin embargo, lo que se observa es que al analizar algunas de sus particiones por separado, no presentan un comportamiento alométrico definido. Los datos que surgen al unificar las particiones de ramitas y ramas con el fuste (tallo) y considerar la biomasa aérea total, demuestran que la cantidad de biomasa en función de la C.A.P sigue un comportamiento alométrico y lo conserva independientemente de cómo se distribuya.

Los valores predichos por Niklas & Enquist (2002a) de  $\alpha$  y  $\beta$  pueden usarse para estudios generales o exploratorios, pues dan cuenta de las particiones de biomasa de un amplio espectro de plantas a través del mundo, pero pueden subestimar o sobrestimar los valores para una especie estudiada particularmente, hecho que no es muy aceptado al momento de realizar una transacción de CER.

Al igual que Montagu *et al.* (2004), se determinó que no es necesario realizar modelos específicos para la estimación de biomasa en cada región, pues se demostró que el modelo general no posee diferencias significativas con el modelo del Caquetá, permitiendo el uso general del mismo, para estimar la biomasa en cualquier sitio en Colombia, a diferencia a lo que sugiere De Jong (2001) sobre ecuaciones de biomasa para sitios específicos. Lo anterior, junto a las conclusiones respecto al comportamiento alométrico de la biomasa total, permiten asegurar que no es necesario realizar más ensayos destructivos de biomasa para esta especie en el país.

Por otra parte, es discutible que el contenido de carbono sea bajo, como consecuencia de la temperatura de secado, pues las hojas, que se secaron a la misma temperatura, presentan un promedio de contenido de carbono más alto que las otras particiones. Para aclarar esta situación se requiere efectuar estudios que comparen el contenido de carbono de muestras

iguales, secadas a esta temperatura ( $100^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) y otra u otras más bajas, pues Losi *et al.* (2003) y Swamy *et al.* (2003) recomiendan efectuar la determinación de contenido de humedad a una temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  hasta llegar a peso constante para evitar pérdidas de carbono (oxidación) como si ocurre al hacerlo a  $105^{\circ}\text{C}$ .

Aunque el contenido promedio de carbono para la biomasa de *Hevea brasiliensis* (44,42%) se encuentra por debajo de lo que generalmente se reporta como promedio (Brown 1997; Lopera & Gutiérrez, 2000; Losi *et al.*, 2003; Albrecht, 2003), es un resultado mucho más válido por haber sido determinado por medio de un método cuantitativo. Además, Kraenzel *et al.*, (2003) reporta 44,2% como contenido medio de carbono en Teca *Tectona grandis*. Estos resultados permiten concebir mas amplio el rango del contenido de carbono en tejidos vegetales, sin restringirse al 50% teórico que se acepta tradicionalmente (Brown, 1997), que significa sobrestimaciones en los modelos de remoción de  $\text{CO}_2$ .

La utilidad de las ecuaciones de biomasa aérea y subterránea, radica en la posibilidad de modelar la estimación de manera confiable, la cantidad de biomasa en los árboles de esta especie, que junto con el contenido promedio de carbono en la biomasa de todas las particiones y las condiciones de densidad y superficie de siembra, que sumado permite obtener un monto del carbono almacenado en una plantación de caucho de un momento dado, herramienta indispensable para entrar al mercado de t o l CER's de los proyectos MDL.

Al usar las ecuaciones con los datos de C.A.P promedio obtenido durante la selección de los árboles para cosechar en cada una de las parcelas, y al tomar los resultados dentro de los parámetros de densidad de siembra para cada plantación y contenido promedio de carbono, se obtienen los resultados que muestra la **Tabla 9**. En ésta se observa una variación amplia,

acentuada aún más en la tasa media de remoción (en Ton CO<sub>2</sub>/ha/año) para cada plantación, que obedece a las diversas velocidades de cre-

cimiento en función de las condiciones ambientales y de manejo (Tabla 10).

**Tabla 10.** Fijación de CO<sub>2</sub> en los árboles de las plantaciones muestreadas

Ubicación de la plantación	Edad	Biomasa total (kg)	CO <sub>2</sub> Ton/ha	Ton CO <sub>2</sub> /ha/año
Retorno	9	338,23	253,68	28,19
Milán	11	91,57	68,68	6,24
Cimitarra	12	395,28	296,47	25,56
Puerto López	12	195,72	146,79	12,23
Florenia	13	80,80	60,60	4,66
Doncello	19	710,94	533,23	14,81
Doncello	36	187,36	140,53	7,40

Los valores aquí expresados asumen una densidad de siembra de 500 árboles por hectárea y un contenido de carbono de 44,42% para biomasa total.

Estas ecuaciones podrían ser utilizadas para estimar el CO<sub>2</sub> capturado en una plantación de *Hevea brasiliensis* dada y así proponer un proyecto MDL de acuerdo con las ratas específicas de crecimientos que se reporte para la plantación, teniendo en cuenta además las condiciones del Protocolo de Kyoto para este tipo de actividades en la mitigación del cambio climático. Así se ampliaría la posibilidad de acceso a este tipo de proyectos en Colombia, contribuyendo con el objetivo del MDL de aportar a la consecución de un desarrollo sostenible de los países en vía de desarrollo.

## CONCLUSIONES

Después de desarrolladas las muestras destructivas para el contenido de carbono en la biomasa aérea para el caucho *Hevea brasiliensis* en condiciones de plantación, el contenido resulta ser de más o menos un 44%, lo que significa una reconsideración del 50% teórico estimado en tejidos vegetales.

Las pruebas destructivas son la herramienta idónea para poder construir ecuaciones que modelen de manera confiable la estimación de carbono contenido en especies forestales.

El desarrollo de transacciones económicas para la liberación de certificados de reducción de emisiones requieren el montaje de modelos alométricos bionómicos para poder eliminar sesgos de sobrestimación o subvaloración de los niveles de captura y secuestro de carbono obtenidas de plantaciones multipropósito.

El desarrollo de proyectos MDL con plantaciones forestales deben considerar los ingresos percibibles por servicios ambientales como un ingreso complementario al tardío rendimiento de la actividad forestal.

Los modelos alométricos son una herramienta apropiada para la modelación del comportamiento de la captura del carbono, derivada de la bioacumulación vegetal en plantaciones forestales.

Las variables explicativas de mayor relevancia en la modelación del comportamiento de captura de carbono son las de medida directa, que permiten percibir cambios en la bioacumulación dentro de los individuos forestales; por esta razón, el perímetro resulta ser más sensible a la estimación que el diámetro a la altura del pecho.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, A., KANDJI, S., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. En: Agriculture Ecosystems & Environment. 99: 15-27p.



- ARISTIZABAL, J., GUERRA, A., GUTIÉRREZ, BRAULIO., ROMERO, MANDIUS., 2002.** Estimación de la Tasa de Fijación de Carbono en el Sistema Agroforestal (SAF) Nopal Cafetero (*Cordia alliodora*)-Cacao (*Theobroma cacao* L)-Plátano (*Musa paradisiaca*). Universidad Distrital – Corpoica - Casa Luker. Trabajo de grado para optar por el título de ingenieros forestales. Santafé de Bogotá, D.C., 124 p.
- BROWN, S., 1997.** A primer for estimating biomass and biomass change of tropical forest. FAO Forestry paper 134. Rome.
- CHAUDHURI, D., VINOD, K.K., POTTY, S.N., SETHURAJ, M.R., POTHEN J., NANJA REDDY, Y.A., 1995.** Estimation of biomass in Hevea clones by regression method: Relation between girth and biomass. En: Indian Journal of Natural Rubber Research, 8 (2): 113–166p.
- DE JONG, H., 2001.** Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *Forest Ecology and Management* 154, 85-114.
- DELANEY, M. ROSHETKO, J., 1999.** Field Test of Carbon Monitoring Methods for Home Gardens in Indonesia. En: *Field Tests of Carbon Monitoring Methods in Forestry Projects*. Forest Carbon Monitoring Program, Winrock International, Arlington, VA, USA. pp.45-51.
- DEL VALLE, J.I., ORREGO, S.A., MORENO, F.H., BLACK, T., 2003.** Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) – CAEMA, Colombia, 314p.
- DÍAZ, S., MOLANO, M., 2001.** Cuantificación y valoración económica de la captura de CO<sub>2</sub> en plantaciones de *Eucalytus* sp ubicadas establecidas por el Preca en las cuencas carboníferas del Valle del Cauca, Cauca, Cesar y altiplano Cundiboyacense. Universidad Distrital. Tesis para optar por el grado de ingenieros forestales. Santafé de Bogotá, D.C., 219 p.
- DEY, S.K., CHAUDHURI, D., VINOD, K.K., PHOTEN, J., SETHURAJ, M.R., 1996.** Estimation of biomass in Hevea clones by regression method: 2. Relation of girth and biomass for mature trees of clone RRIM 600. En: *Indian Journal of Natural Rubber Research*, 9 (1): 40-43p.
- KRAENZEL, M., CASTILLO, A., MOORE, T., POTVIN, C., 2003.** Carbon estorage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. En: *Forest Ecology and Management* 173, 213–235.
- LOSI, C., SICCAMI, T., CONDIT, R., MORALES, J. 2003.** Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. En: *Forest Ecology and Management* 184: 355-368.
- LOPERA ARANGO, GABRIEL JAIME., GUTIÉRREZ VÉLEZ, VÍCTOR HUGO., 2000.** Viabilidad técnica y económica de la utilización de plantaciones de *Pinus patula* como sumideros de CO<sub>2</sub>. Tesis para optar por el grado de ingenieros forestales. Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín), Medellín, 146 p.
- LÓPEZ, J.C., RIAÑO, N.M., LÓPEZ, Y., 2001.** Características fotosintéticas de cinco especies forestales. *CENICAFE*. 52 (3): 161-169.
- MACDICKEN, K.G., 1997.** A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agriculture Development, Arlington, 87 p.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA., 2004.** El renacimiento de la Orinoquia alta de Colombia: un megaproyecto para el mundo. 34 p.
- MONTAGU, K.D., DÜTTMER, K., BARTON, C.V.M., COWIE, A.L., 2004.** Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration – an

- example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. En: Forest Ecology and Management (ARTICLE IN PRESS).
- NIKLAS, K.J., ENQUIST, B.J., 2002A.** Canonical rules for plant organ biomass partitioning and annual allocation. En: American Journal of Botany, 89 (5): 812-819.
- NIKLAS, K.J., ENQUIST, B.J., 2002B.** On the vegetative biomass partitioning of seed, plant leaves, stems and roots. En: The American Naturalist, 159 (5): 490-497p.
- NOVALES, A., 1993.** Econometría. McGraw-Hill. Madrid. 32-35p.
- ONG, J.E., GONG, W.K., WONG C.H., 2004.** Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. En: Forest Ecology and Management 188: 395-408.
- OSPINA, D., 2001.** Introducción al muestreo. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de matemáticas y estadística. Bogotá D.C. 262 p.
- RINCÓN, O., 1996.** Manual para el cultivo del caucho. Corporación para la diversificación del ingreso cafetero (CORDICAFE). Santafé de Bogotá, 194p.
- SCHLEGEL, B., GAYOSO, J., GUERRA, J., 2001.** Manual de Procedimientos para Inventarios de Carbono en Ecosistemas Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia. 17 p
- SCHROTH, GÖTZ., D'ANGELO, S.A., TEXEIRA W.G., HAAG, D., LIEBEREI, R., 2002.** 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 163: 131-150p.
- SNOWDON, P., RAISON, J., KEITH, HEATHER., RITSON, P., GRIERSON, P., ADAMS, M., MONTAGU, K., BI, H., BURROWS, W., EAMUS, D., 2002.** Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. Technical report no. 31. The Australian Greenhouse Office, Australia, 66p.
- SOKAL, R., ROHLF, J., 1981.** Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research, second edition. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 859p.
- SON, Y., HWANG, J., KIM, Z., LEE, W., KIM, J., 2001.** Allometric and biomass of Korean pine (*Pinus Koraiensis*) in central Korea. En: Bioresource Technology 78, 251-255.
- STEEL, R., TORRIE, J., 1985.** Bioestadística principios y procedimientos. Segunda edición. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 622 p.
- SWAMY, S., PURY, S., 2003.** Growth, biomass, carbon storage and nutrient distribution in *Gmelina arborea* Roxb. stands on red lateritic soils in central India. En: Bioresource Technology 90: 109-126.
- TORRES, C.H., 1999.** Manual para el cultivo del caucho en la Amazonia. Universidad de la Amazonia. Florencia. 149p.
- \_\_\_\_\_, 2003a. Análisis de la situación histórica y actual de los cultivos de caucho en Colombia. Documento realizado para CIPAV - ECONOMETRÍA, Proyecto OIMT Madera de caucho. Bogotá, 32p.
- \_\_\_\_\_, 2003b. Información digital sobre el inventario de caucho en el Caquetá y áreas plantadas por edades y municipios. Sin publicar, Bogotá.
- WEST, GEOFFREY., BROWN, JAMES., QUIST, BRIAN., 1999A.** The Fourth Dimension of Organisms. En: Science, Vol 284: 1667-1679 p.
- WEST, GEOFFREY., BROWN, JAMES., QUIST, BRIAN., 1999B.** Allometry of plant vascular systems. En: Nature, 400: 664-667 p.
- ZULETA, J., 2003.** Visión mundial y nacional del cultivo del caucho. FEDECAUCHO. 21 p.