

Artículo de investigación

## BIOMASA AÉREA Y CONTENIDO DE CARBONO DEL SALADILLO (*Caraipa llanorum*) EN PUERTO CARREÑO, VICHADA, COLOMBIA

### Aerial biomass and carbon content of Saladillo (*Caraipa llanorum*) in Puerto Carreño, Vichada, Colombia

**Palabras clave:** árbol, compartimento, densidad, ecuación, fuste, muestreo, volumen.

**Keywords:** tree, compartment, density, equation, sampling, trunk, volume.

Román Ospina Montealegre<sup>1</sup>

Andrés Felipe Ardila Fernández<sup>2</sup>

Diego Fernando Martínez Bolaños<sup>3</sup>

Edwin Rengifo Canizales<sup>4</sup>

#### RESUMEN

Se determinaron el volumen, la biomasa y el contenido de carbono aéreo por hectárea para los bosques de Saladillo (*Caraipa llanorum*) en la finca Canapro Forestal, en el municipio de Puerto Carreño, del departamento de Vichada; para ello, se realizó un muestreo destructivo de 30 individuos para ajustar un modelo con el fin de estimar estas variables; fue necesario determinar el peso fresco de los diferentes compartimentos de cada árbol, así como el volumen de cada fuste; luego, se obtuvieron submuestras de la biomasa del fuste, las ramas y las hojas por árbol para llevar al laboratorio y obtener la densidad y el contenido de carbono de la madera. El inventario forestal reportó una densidad de 342 árboles por hectárea de *C. llanorum* con  $dap \geq 10$  cm, que representan un volumen de  $37,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , correspondientes a  $26,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de carbono; la densidad reportada para la madera fue de  $0,65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  y su contenido de carbono, de 52,96 %. Para estimar la biomasa aérea de la especie, la ecuación que mejor ajuste presentó fue  $BT = e^{-9.47559 + 2.56189 \cdot \ln(dap)}$  y el factor de expansión de biomasa reportado fue de 1,52; para estimar el carbono, la ecuación ajustada fue  $C = e^{-10.2355 + 2.59771 \cdot \ln(dap)}$ .

#### ABSTRACT

We determined the volume, biomass and carbon content per hectare for aerial forest Saladillo (*Caraipa llanorum*) at the Canapro Forestry farm (Puerto Carreño, Vichada), by destructively sampling 30 individuals. In order to fit a model to estimate variables, it was necessary to determine the fresh weight of the different components of each tree, and the volume of each stem. Subsamples were taken to determine the biomass of the stem, branches and leaves of each tree in order to obtain the density and carbon content of the wood. Forest inventory reported a density of 342 trees per hectare of *C. llanorum* with  $dbh \geq 10$  cm. This represents a volume of  $37,4 \text{ m}^3$  corresponding to  $26,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  of carbon. The wood density was  $0,65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  and the carbon content 52,96 %. To estimate the biomass of the species a best fit equation was used  $BT = e^{-9.47559 + 2.56189 \cdot \ln(dap)}$  with a biomass expansion factor of 1,52 reported for estimating the carbon balanced equation,  $C = e^{-10.2355 + 2.59771 \cdot \ln(dbh)}$ .

#### INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero que más contribuye al calentamiento

1 Universidad del Cauca, Departamento de Ciencias Agropecuarias. Popayán, Colombia. rospina@unicauca.edu.co

2 Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. andresardilaf@gmail.com

3 Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. diegofmb127@hotmail.com

4 Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. edwinren@gmail.com

global; la tasa de incremento de este gas por año es de 1 ppm. Ante la preocupación por el constante aumento de este gas, se han implementado diferentes estrategias para capturar el carbono y reducir la concentración de este en la atmósfera. En muchos estudios se han utilizado los muestreos destructivos para estimar el contenido de carbono a través de la biomasa de los árboles (Díaz *et al.*, 2007).

Alrededor del 40% del contenido total de carbono de la Tierra y el 36% de la productividad primaria neta (PPN) corresponden a los bosques tropicales. La necesidad actual de conservar los bosques para reducir la tasa de aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera requiere de mediciones y monitoreo, donde el punto de partida lo constituye la estimación de biomasa en el ecosistema (Agudelo, 2009). Schleguel *et al.* (2001) mencionan en su informe que la estimación adecuada de la biomasa de un bosque es un elemento de gran importancia ya que esta permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos presentes en cada uno de los componentes, y representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera o conservado y fijado en una determinada superficie cuando los bosques son manejados para alcanzar los compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero.

Como se mencionó anteriormente, el carbono se puede estimar a través de la biomasa, por eso los modelos de biomasa han aumentado en los últimos años, y posiblemente sean más los desarrollados para árboles individuales que para bosques. Para estimar la biomasa se utilizan varios tipos de modelos de regresión y combinación de variables. En general, y así lo demuestran muchas investigaciones, el dap es la variable que mejor se correlaciona y predice la biomasa. Además, el dap es una variable de fácil medición y que se registra en la mayoría de los inventarios forestales (Fonseca *et al.*, 2009).

Con base en lo descrito anteriormente, este estudio tuvo como propósito determinar el contenido de biomasa forestal aérea y la cantidad de carbono capturado para la especie *Caraipa llanorum*, y establecer las relaciones existentes entre las varia-

bles dasométricas y el carbono almacenado para lo cual se procedió, en primera medida, a determinar la cantidad de biomasa contenida en los diferentes compartimentos (fuste, ramas y hojas) de la especie forestal y generar ecuaciones que permitieran la estimación de esta biomasa aérea acumulada en los individuos.

Además, se calculó el factor de expansión de biomasa (FEB) para el cálculo de la biomasa total por árbol, el cual no mostró relación con ninguna variable que permitiera la construcción de un modelo de predicción de este, mientras que los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa de los diferentes compartimentos del árbol en función del dap presentaron un ajuste satisfactorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los predios de la finca Canapro Forestal, ubicada al suroccidente de la cabecera municipal de Puerto Carreño, departamento de Vichada, extremo oriental de Colombia, en la región de la Orinoquía; está localizada entre los 6°19'34" y los 5°53'05" latitud norte y los 67°25'1" y los 67°48'25" longitud oeste, el área reportada para el predio fue de 7522,38 ha, el cual presenta tres sitios diferentes correspondientes a la cobertura vegetal de sabanas arboladas, donde la especie predominante es el Saladillo (*Caraipa llanorum*); las alturas de los sitios muestreados se encontraron entre los 55 m a los 84 m de altitud. Estos saladillales o sitios donde predomina el Saladillo se encuentran generalmente al borde de los bosques de galería. Para conocer el volumen, la biomasa y el carbono aéreo por hectárea se realizó un inventario forestal aleatorio simple, que consiste en 30 parcelas circulares de 0,05 hectáreas (12,61 m de radio); las variables registradas fueron la altura total y comercial en metros, el dap en centímetros, el diámetro de la copa y el estado fitosanitario de cada individuo; los árboles registrados durante el muestreo se marcaron con pintura roja. Para determinar la biomasa y el contenido de carbono aéreo de *C. llanorum* se realizó un muestreo destructivo donde se derribaron 30

árboles distribuidos aleatoriamente en toda la sabana arbolada dentro de la finca Canapro Forestal; esta muestra fue estratificada considerando como estratos las diferentes categorías diamétricas con amplitud de 10 cm de acuerdo con los registros del inventario forestal.

A cada árbol escogido le fueron registradas las variables en pie de dap, altura total y comercial, así como su localización; después de apeadas a cada árbol, se separaron las hojas (biomasa de hojas Bh), las ramas (biomasa de ramas Br) y el fuste (biomasa del fuste Bf); posteriormente, se agruparon los diferentes tipos de ramas, así como las hojas para registrar su peso; también se registraron las longitudes y los diámetros de los tocones, al igual que la longitud total de los fustes medidos desde la altura del tocón hasta la rama más larga (altura total) y la longitud desde la base del árbol hasta la primera bifurcación (altura comercial); después de conocer la longitud total de los fustes, estos se dividieron en 10 secciones iguales para registrar su peso y los diámetros al inicio, al centro y al final de cada troza para establecer su volumen, así como los cocientes de forma y el factor de forma verdadero para la especie; después de hallado el factor de forma para *C. llanorum*, se procedió a calcular el volumen en pie para todos los individuos muestreados en el inventario forestal.

La densidad de la madera y su contenido de carbono se adquirieron a partir de muestras obtenidas de diferentes individuos y sus compartimentos; el porcentaje de carbono contenido en la madera de la especie se obtuvo a través de un análisis elemental. Por otro lado, se calculó el factor de expansión de biomasa (FEB) considerando el cociente entre la biomasa total y la biomasa del fuste de los árboles reportados en cada clase diamétrica y, luego, se obtuvo un promedio para la especie. Para el ajuste de los modelos, inicialmente se elaboraron los diagramas de dispersión con el fin de identificar algún patrón o forma de (patrones de) asociación, fuerza de correlación y tendencias de covariación entre las variables, así como para identificar datos atípicos *outliers* como lo sugiere Vanclay (1994); de igual manera, se validaron los supuestos de normalidad,

independencia y varianza constante de los errores, al igual que la homogeneidad de varianzas, como lo sugieren Segura & Andrade (2008).

Posteriormente, se realizaron los análisis de correlación de Pearson ( $r$ ) para las variables dasométricas medidas en el muestreo destructivo y los datos de biomasa; de esta manera, se identificaron las variables a relacionar en los modelos; se ensayaron 27 modelos de regresión, a partir de los cuales se seleccionaron los más favorables desde el punto de vista de su calidad estadística para futuras estimaciones; para ello, se consideraron los coeficientes de determinación ( $r^2$ ), el error estándar de las estimaciones (S) y la suma de cuadrados de los residuos predichos (PRESS).

De esta manera, se generaron modelos para altura total, volumen del fuste y de biomasa total (BT), así como para cada componente de la biomasa (Bh, Br y Bf) de la especie Saladillo (*C. llanorum*). Todos los análisis se realizaron con ayuda de los *software* estadísticos Statgraphics Centurion XVII, SPSS 11.5 para Windows y CurvExpertpro 1.5.

## RESULTADOS

El inventario forestal reportó un promedio de 342 árboles por hectárea y un volumen de  $37,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  para *C. llanorum*, se incluyen árboles con dap  $\geq 10$  cm; estos parámetros resultaron ser heterogéneos debido probablemente a la notable diferencia entre las densidades encontradas en las parcelas (tabla 1). Las estimaciones de los promedios presentan una precisión aceptable, al observar el E%. Como se muestra en la tabla 1, los resultados para el volumen por hectárea son bajos si se tiene en cuenta la densidad reportada para el rodal, la cual coincide con lo reportado para bosques de la cuenca del Orinoco (Lampretch, 1990).

La baja existencia de madera se puede explicar desde la distribución diamétrica que presenta la especie, la cual muestra que la mayoría de los individuos registrados pertenecen a las dos primeras clases de diámetro, y muy pocos individuos fueron

**Tabla 1.** Estadísticos por hectárea para el inventario forestal para *C. llanorum*

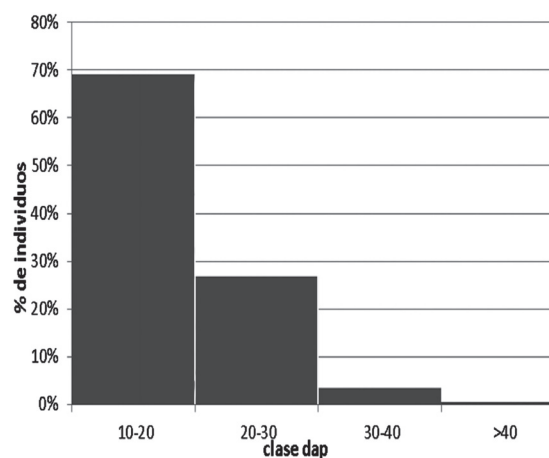
Parámetro	Densidad	Área basal	Volumen (m <sup>3</sup> )
Promedio	342,7	9,2	37,4
Desv. est	214,7	4,1	17,8
CV%	63	45	48
E	80,2	1,5	6,6
E%	23,40	16,70	17,71

Nota: Desv. est: desviación estándar, E. est: error estándar, CV% es el coeficiente de variación, E: error de muestreo, E%: error relativo de muestreo.

de diámetros grandes, lo que indica un flujo adecuado de la regeneración hacia los diámetros mayores (Villa & Ramírez, 2005) (figura 1).

Los diámetros y las alturas reportados para la especie resultaron ser variables homogéneas; sin embargo, las alturas fueron muy inferiores a las reportadas por Quintero (2001), quien afirma que la especie puede presentar alturas mayores a los 20 m. Por otra parte, el peso tanto de las hojas como para las ramas presentó datos heterogéneos; como se muestra en la tabla 2.

La mayor cantidad de biomasa aérea para la especie se encontró en el fuste, lo que representa un 64%, porcentaje muy superior a los demás componentes del árbol. De otro lado, la densidad específica encontrada para la madera de *C. llanorum* fue de 0,65 kg·m<sup>3</sup><sup>-1</sup>, lo que la clasifica como una madera



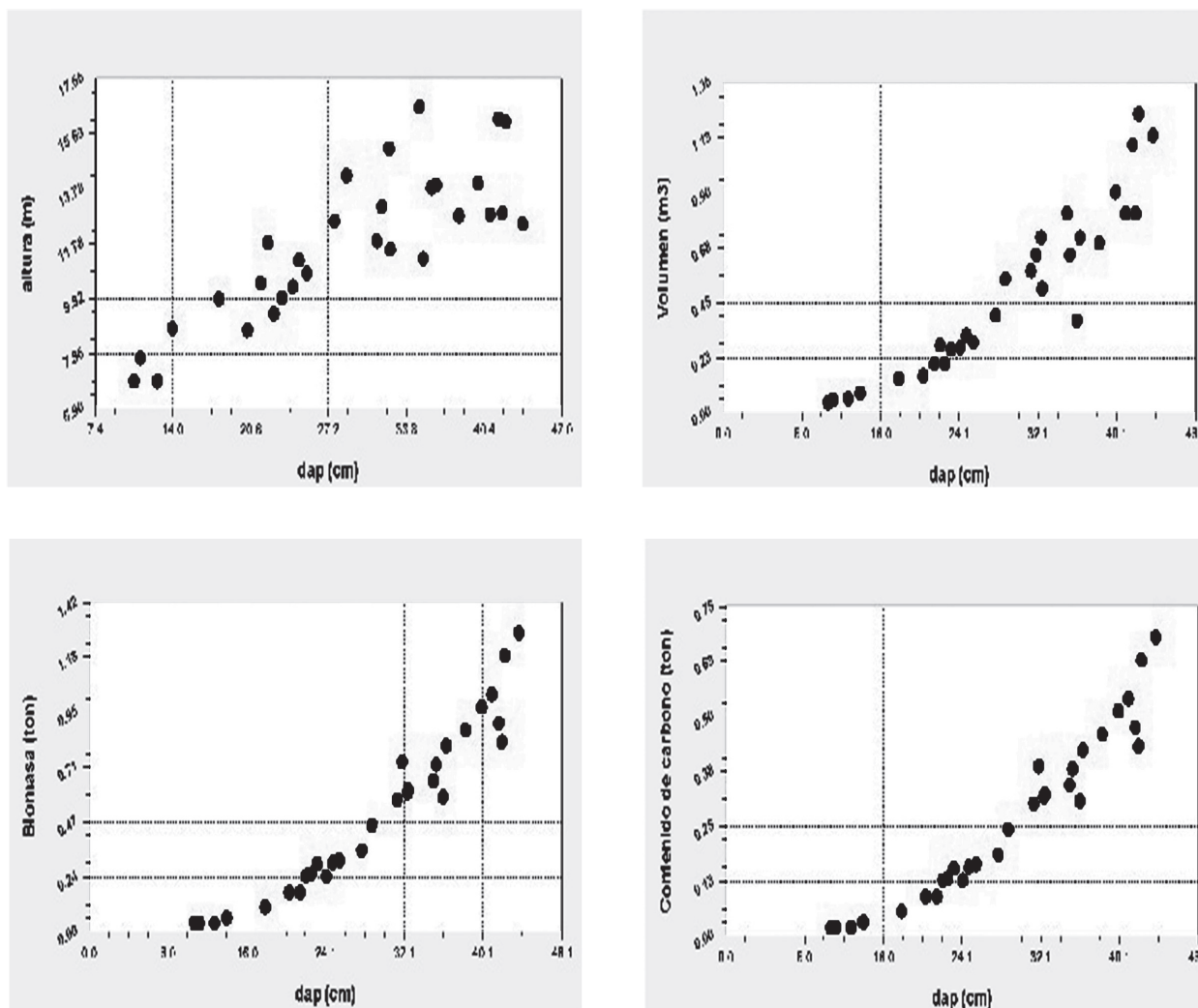
**Figura 1.** Distribución por clase de diámetro para los individuos de *C. llanorum* registrados en el inventario forestal, finca Canapro Forestal, Puerto Carreño, Vichada, 2012

semipesada de acuerdo con Díaz (2005); mientras que el análisis elemental reportó un contenido de carbono en su madera de 52,96%, el cual es superior a los reportados para otras especies latifoliadas de bosques tropicales (Brown & Lugo, 1984; Figueroa, *et al.*, 2005; Gayoso & Guerra, 2005; De Petre, *et al.*, 2005; Domínguez *et al.*, 2009). La variable que presentó mejor correlación con la biomasa total fue el dap; en este sentido, esta variable fue utilizada como base para ajustar los modelos de biomasa para cada compartimento (Bh, Br, Bf), así como para estimar la altura, el volumen y la biomasa total (figura 2).

**Tabla 2.** Resumen de los estadísticos de las variables medidas en el muestreo destructivo para *C. llanorum*

Parámetro	Variables					
	Peso hojas (kg)	Peso ramas (kg)	dap (cm)	Altura comercial (m)	Altura total (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
N	30	30	30	30	30	30
Promedio	23,96	287,16	28,91	4,77	11,78	0,5
Desviación estándar	18,08	244,48	9,93	1,51	2,64	0,34
Mínimo-máximo	1,8-73	7,05- 819	10,7-43,7	2,5- 8,8	6,9-16,7	0,04-1,2
CV%	75	85	34	32	22	68

Nota: N corresponde al número de árboles medidos; CV% es el coeficiente de variación.

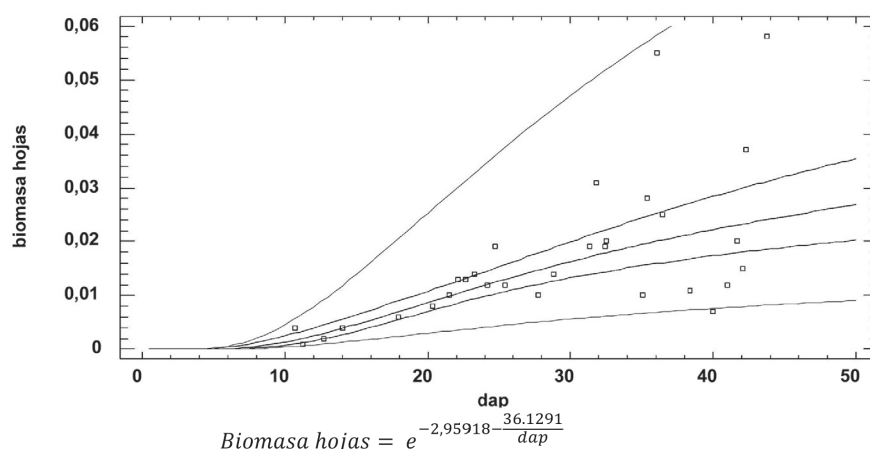


**Figura 2.** Diagramas de dispersión de puntos de la relación entre el dap y la altura, el volumen, la biomasa total y el contenido de carbono, para *C. llanorum* en la finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

Con respecto a la biomasa de las hojas, el modelo con mejor calidad estadística fue una ecuación exponencial inversa, que incluyó como variable independiente el dap y presentó un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,69, lo cual indica que el modelo ajustado explica una buena proporción (69%) de la variabilidad de los datos de la biomasa de las hojas y un buen ajuste del modelo a los datos de biomasa de hojas y dap, de acuerdo con lo que afirman Segura & Andrade (2008); además, fue el modelo que reportó un menor valor para el error estándar (0,509), así como para la suma de cuadrados de los residuos PRESS (0,259) (figura 3).

El comportamiento del modelo ajustado frente a los datos de biomasa de hojas contra dap revela que no hay un cambio drástico en la curva del modelo; por otra parte, también muestra una lógica biológica en la distribución de los datos ya que a mayor dap, presenta mayor biomasa de las hojas; así como las bandas que representan los intervalos de confianza se encuentran alejadas de la recta de regresión en los diámetros mayores, lo que indica que el modelo presenta menor confiabilidad al intentar predecir los datos en estos rangos diamétricos (figura 3).



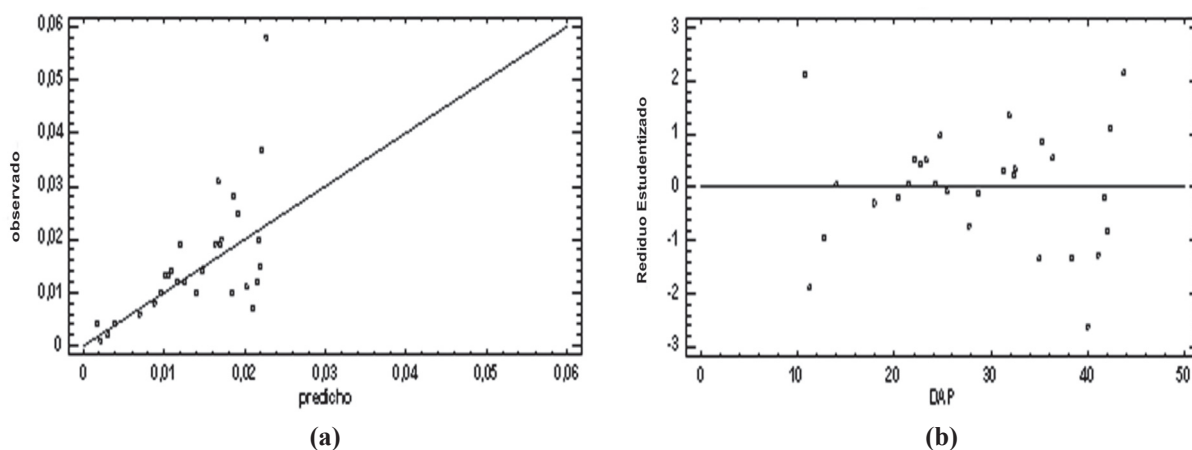


**Figura 3.** Modelo ajustado para estimar la biomasa de las hojas de *C. llanorum* en la finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

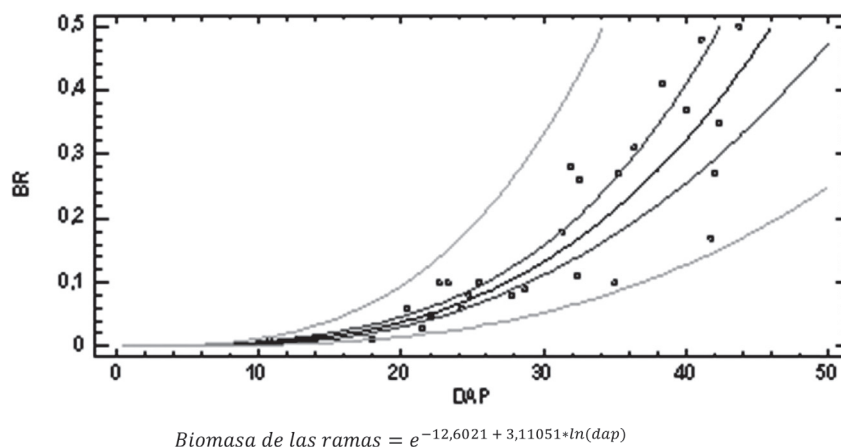
En la figura 4a se observa cómo los puntos que representan la relación entre los datos observados y los estimados por el modelo se ubican cerca de la recta; igualmente, se distingue de qué manera los datos de biomasa en árboles con mayor diámetro tienden a alejarse por encima y por debajo de la recta, lo que indica una sobrestimación o subestimación de los valores estimados por el modelo, a diferencia de lo observado para árboles con menor diámetro donde los puntos se distribuyen sobre la recta o muy cerca a ella, lo cual indica la bondad del modelo para predecir la biomasa en estos rangos de distribución diamétrica. Por otro lado, como

se presenta en la figura 4b, se encontraron tres residuos mayores que 2, pero ninguno mayor a 3 en valor absoluto, lo que muestra que no existen datos atípicos dentro de las estimaciones, así como tampoco se observa un patrón de distribución de los residuos.

Para la biomasa de las ramas, la mejor ecuación considero como variable independiente el dap en centímetros, lo que arrojó un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,90, que indica que el modelo ajustado explica una buena proporción (90%) de la variabilidad de los datos de la biomasa de las



**Figura 4.** (a) Relación entre los datos observados y estimados para la biomasa de las hojas de *C. llanorum*. (b) Residuos estudentizados para el modelo. Finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos



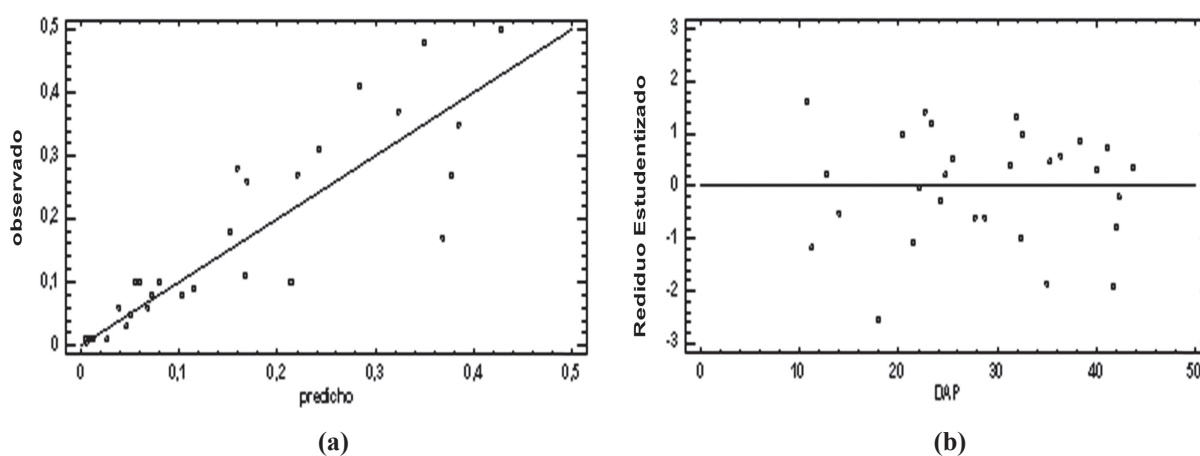
**Figura 5.** Modelo ajustado para estimar la biomasa de las ramas de *C. llanorum* en la finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

ramas, como lo indican Segura & Andrade (2008). Además, fue el modelo que reportó un menor valor para el error estándar (0,432), así como para la suma de cuadrados de los residuos PRESS (0,187) (figura 5).

El modelo ajustado no presentó cambios drásticos en la curva que lo representa, tal y como se muestra en la figura 5, donde también se da a conocer una lógica biológica en la distribución de los datos, y se presenta que las bandas de intervalos de confianza se encuentran alejadas de la recta de regresión en los diámetros mayores, lo que indica que el modelo

tiene menor confiabilidad al intentar predecir los datos en estos rangos de diámetro.

En la figura 6a se observa cómo los puntos que representan la relación entre los datos observados y los estimados por el modelo se ubican cerca de la recta, lo cual muestra que los valores estimados para la biomasa de las ramas son estadísticamente confiables. Para el compartimento de las ramas, hay un residuo estudentizado mayor que 2, pero no mayor que 3, lo que significa que la mayor parte de los residuos se encuentran agrupados cerca a la media de los datos observados y que no existen



**Figura 6.** (a) Relación entre los datos observados y estimados para la biomasa de las ramas de *C. llanorum*. (b) Residuos estudentizados del modelo ajustado. Finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

**Tabla 3.** Ecuaciones para la estimación del volumen del fuste de *C. llanorum*

No.	Modelo	$r^2$		S		PRESS	
		Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación
1	$Vf = (-0.0897986 + 0.0261839*dap)^2$	0,962	3	0,052	1	0,003	1
2	$Vf = (-0.726255 + 0.263452*dap^2)$	0,955	4	0,058	2	0,003	2
3	$Vf = *$ $\ln(Vf) = -8.7929 + 2.36436*\ln(dap) *$	0,980	1	0,140	4	0,020	3

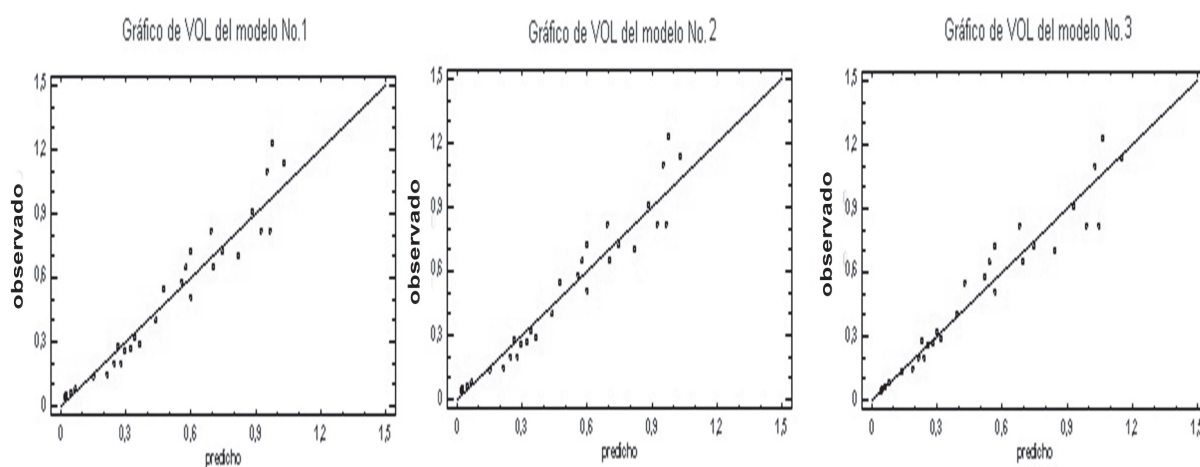
Nota: Vf: volumen del fuste;  $r^2$ : coeficiente de determinación; S: el error estándar de la estimación y PRESS: la suma de cuadrado de los residuos predichos.

datos atípicos estimados, para este caso tampoco se ve un patrón de dispersión para los datos de los residuos (figura 6b). Con respecto al volumen y la biomasa del fuste, se ajustaron 27 modelos y se escogieron los tres mejores, teniendo en cuenta la calidad estadística de estos (tabla 3).

El análisis de varianza (Anova) no reportó diferencias significativas entre los valores estimados por las tres ecuaciones y los datos observados para volumen del fuste con un nivel de confiabilidad del 100%. La figura 7 muestra las relaciones entre los valores estimados y los observados, empleando los tres modelos, según lo recomendado por Segura y Andrade (2008); como se puede observar, los puntos se agrupan a lo largo de las rectas para los tres casos; se muestra una mayor

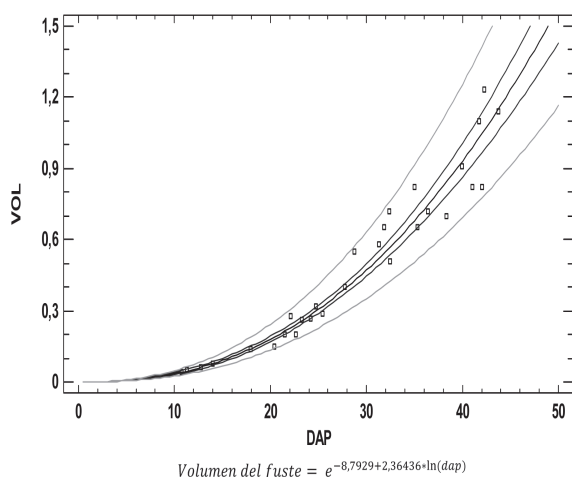
cercanía de los datos a la recta para la gráfica del modelo 3, que corresponde a un modelo multiplicativo con  $r^2= 0,98$ , lo que indica que el dap explica estadísticamente un 98% de la variación del volumen del fuste (Vf) de acuerdo con lo que indican Kometter & Maravi (2007).

Un modelo multiplicativo fue escogido para calcular el volumen del fuste; este utiliza como variable dependiente el dap medido en centímetros; además, el comportamiento de los datos de volumen del fuste ( $m^3$ ) contra dap (cm) indica que no hay cambios drásticos en la curva del modelo, lo cual muestra una buena confiabilidad a lo largo de esta (figura 8). Por otro lado, no se evidenciaron residuos estudentizados mayores a 2, en valor absoluto, lo que supone que no hay valores atípicos

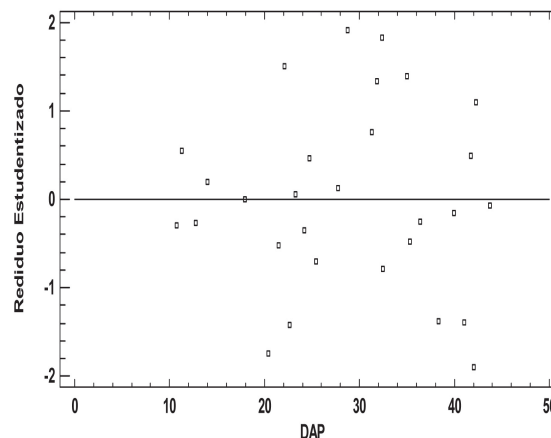


**Figura 7.** Relación volumen de fuste observado y estimado para tres modelos de volumen de *C. llanorum*. Finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos





**Figura 8.** Modelo ajustado para la estimación del volumen del fuste de *C. llanorum*. Finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos



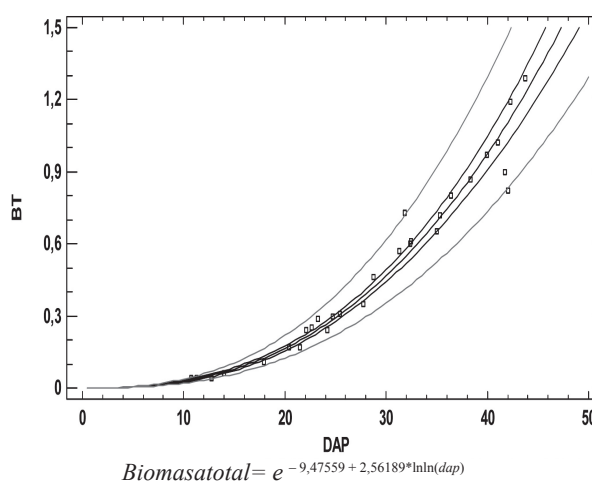
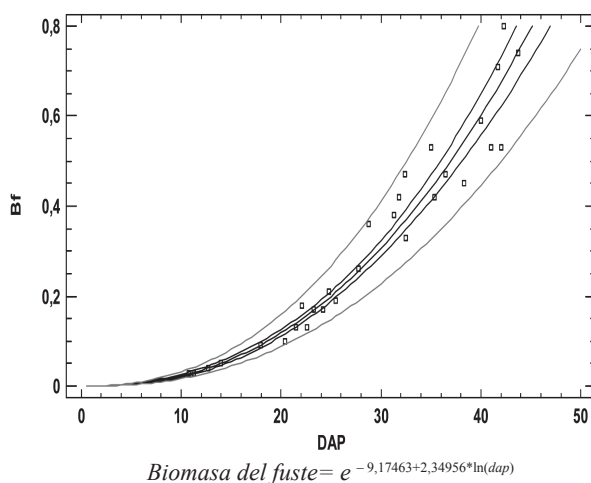
**Figura 9.** Residuos estudentizados para el modelo de volumen del fuste de *C. llanorum*. Finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

en las estimaciones hechas con este modelo; tampoco se observa un patrón definido en los residuos (figura 9).

Para obtener la biomasa del fuste se ajustó una ecuación con la que se puede estimar directamente este parámetro para la especie. El comportamiento del modelo indica un incremento en la biomasa para los individuos con diámetros mayo-

res, sin presentar un cambio drástico en la curva (figura 10).

Los modelos multiplicativos fueron los que mayor ajuste presentaron para estimar la biomasa tanto del fuste como la total ( $r^2= 97,9$  y  $98,4$ , respectivamente); además, se encontró que el error estándar de los residuos y el error absoluto medio (MAE) fueron los más bajos (0,14 y 0,11 para la



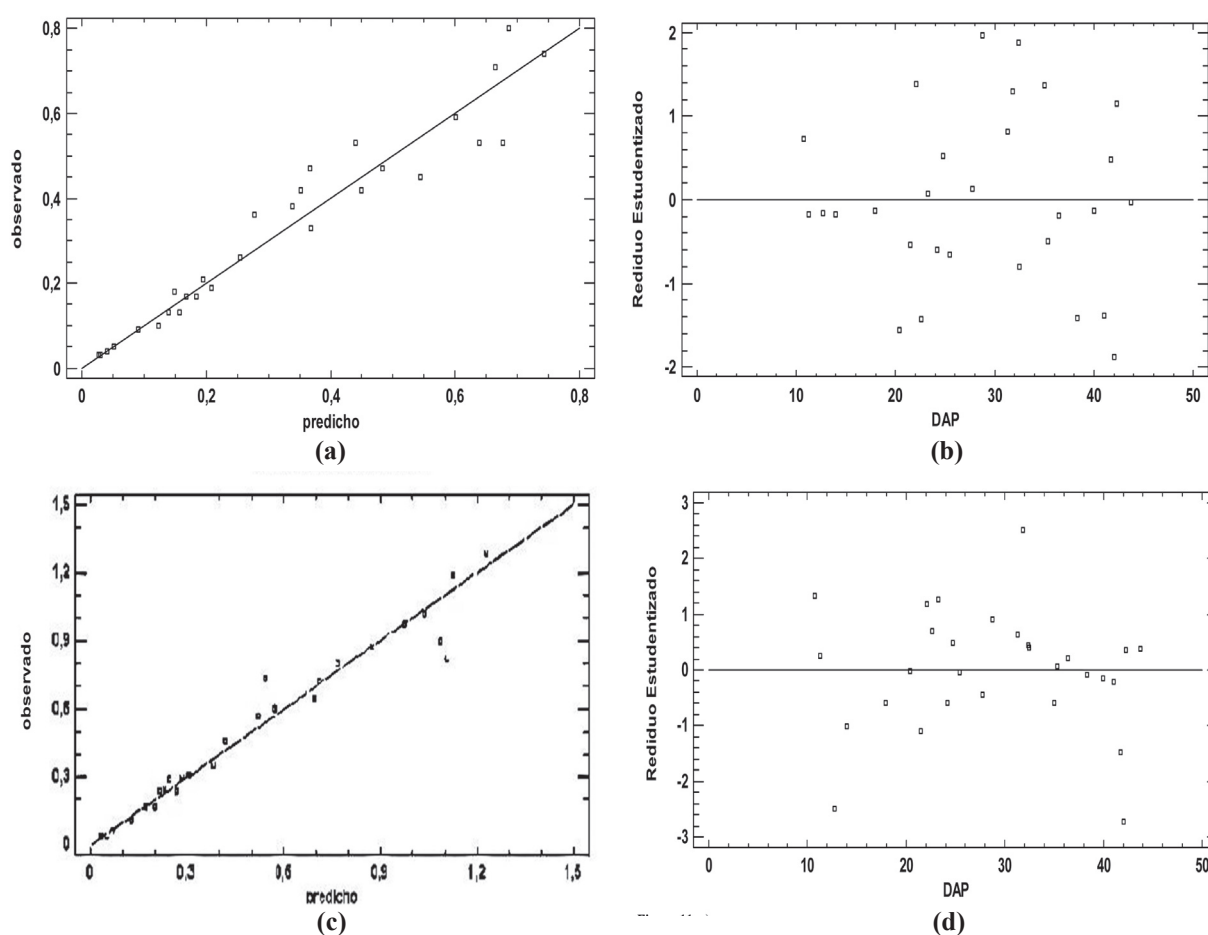
**Figura 10.** Modelo ajustado para estimar la biomasa del fuste de *C. llanorum* en la finca Canapro Forestal, Vichada, 2012. Tamaño de muestra de 30 individuos

biomasa del fuste y 0,13 y 0,10 para la biomasa total); de igual manera, el estadístico de Durbin-Watson (DW) para ambos modelos mostró que no existe autocorrelación serial entre los residuos para un nivel de confianza del 95,0%, lo que indica que estos modelos son válidos para estimar datos por fuera del rango de diámetros incluidos en el muestreo destructivo.

Por otra parte, la confrontación de los datos observados contra los estimados por ambos modelos indica una buena estimación por parte de estos, como se muestra en la figura 11a; mientras que los residuos estudentizados presentados por el modelo ajustado indicaron que no existen valores atípicos para los dos modelos (figuras 11b y 11d).

El factor de expansión de biomasa (FEB) total para *C. llanorum* fue de 1,54, el cual es un dato cercano al reportado para diferentes tipos de bosques tropicales por Brown & Lugo (1984). Por otra parte, los parámetros asociados al factor de expansión de biomasa (FEB) calculados mostraron que el promedio más bajo (1,26) fue el registrado para los individuos presentes en la primera categoría diamétrica ( $10 \leq dap \leq 20$  cm); asimismo, se encontró que el promedio más alto (1,69) se presentó en el tercer estrato ( $30 \leq dap \leq 40$  cm).

El FEB no mostró relación con ninguna variable que permitiera la construcción de un modelo de predicción de este, lo cual coincide con los resultados presentados por Montero & Kanninen (2002).



**Figura 11.** a) Relación biomasa del fuste observada y estimada; b) residuos estudentizados para la biomasa del fuste; c) relación biomasa total observada y estimada y d) residuos estudentizados para la biomasa total. Para una muestra de 30 individuos de *C. llanorum*

El contenido de carbono para cada árbol de la especie *C. llanorum* está dado por la relación ; los estadísticos calculados para esta ecuación son similares a los que presentaron las ecuaciones ajustadas para la biomasa del fuste y la biomasa total; esto se debió a que en el fuste se encuentra concentrado el mayor porcentaje de biomasa del árbol, de esta manera se determinan los modelos que más se ajustan para establecer el contenido de biomasa total, lo que coincide con el mismo modelo utilizado para estimar la biomasa total aérea que ajustaron Montero & Kanninen (2002) y Díaz *et al.* (2007).

Al relacionar los datos observados y estimados, se observó que la mayoría de los puntos se agruparon sobre la recta o cerca a ella, lo que representa una buena estimación por parte del modelo (figura 12b); igualmente, se analizó la dispersión de los residuos estudentizados del modelo en la figura 12c, los cuales muestran que no se encuentran puntos mayores a 3 desviaciones en valor absoluto, esto supone que no existen datos atípicos en la estimación del modelo, sin mostrar patrones de tendencia de los residuos.

Los valores estimados para la biomasa y carbono contenidos en los bosques de *C. llanorum* fueron 50,2 y 26,3  $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectivamente, los valores se observan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Resumen de estadísticos calculados de las estimaciones por hectárea en bosques de *C. llanorum*.

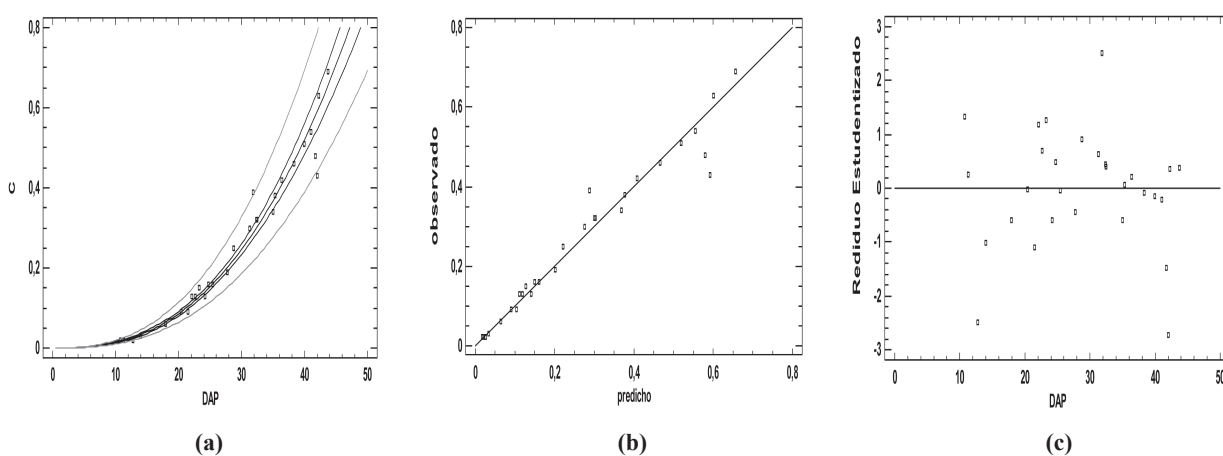
Parámetro	Densidad	BT (ton)	C (ton)
Promedio	342,7	50,2	26,3
Desv. est	214,7	22,1	11,5
E. est	39,2	8,2	2,1
E%	11,4	16,3	8,0

**Nota:** BT: biomasa total, C: contenido de carbono, Desv. est: desviación estándar, E. est: error estándar. E%: error relativo.

## DISCUSIÓN

Se puede afirmar que los bosques de Saladillo *C. llanorum* pertenecen a la categoría de bosque abierto si se consideran sus características estructurales; esto se puede argumentar con los datos de volumen, biomasa y carbono por hectárea, los cuales resultaron ser bajos aun para los sitios con alta densidad de individuos; de igual manera, con la distribución diamétrica que presenta la especie, que muestra un flujo importante de la regeneración hacia los diámetros mayores según Lamprecht (1990) y Villa & Ramírez (2005).

Por otra parte, la biomasa estimada de  $50 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  indica un resultado bajo en comparación con otros bosques tropicales (Brown & Lugo, 1984;



**Figura 12.** a) Modelo ajustado para estimar el contenido de carbono; b) relación del contenido de carbono observado y el estimado; c) residuos estudentizados para el contenido de carbono. Para una muestra de 30 individuos de *C. llanorum*

Domínguez, *et al.*, 2009). El análisis elemental de la madera de *C. llanorum* reportó un contenido de carbono de 52,96%, que indica un valor ligeramente superior en relación con otras especies latifoliadas registradas en bosques tropicales (De Petre, *et al.*, 2005; Figueroa *et al.*, 2005; Gayoso & Guerra, 2005; Domínguez *et al.*, 2009).

Los análisis de regresión y correlación al igual que los de residuales mostraron que el volumen total y la biomasa aérea total dependen en un alto grado del diámetro de los individuos de la especie estudiada, aspecto que se pudo evidenciar durante el ajuste de los modelos. El FEB no mostró relación con ninguna variable que permitiera la construcción de un modelo de predicción de este, lo cual coincide con los resultados presentados por Montero & Kanninen (2002); además, se observó que el FEB para la especie fue de 1,54, lo que indica que *C. llanorum* es una especie con una baja densidad de copa si se compara con lo reportado para otros bosques tropicales (Brown & Lugo, 1984), el cual fue de 1,6.

Finalmente, con respecto a los modelos ajustados para la biomasa y el carbono, se pudo encontrar que aquellos calculados para el fuste presentaron una mejor calificación que los calculados para los otros compartimentos (hojas y ramas); este aspecto fue esencial para ajustar el modelo de biomasa aérea total, el cual coincidió con el tipo de modelo para estimar la biomasa del fuste y con modelos encontrados en otros estudios (Montero & Kanninen, 2002; Díaz *et al.*, 2007).

## CONCLUSIONES

El diámetro fue la variable que mejor se correlacionó estadísticamente con los diferentes compartimentos de la biomasa aérea, lo cual concuerda con los resultados registrados en la literatura; este hecho revela una ventaja ya que en los inventarios de plantaciones o bosques naturales siempre consideran esta variable por su fácil medición en campo.

Según los indicadores estadísticos de ajuste calculados, se puede inferir que las ecuaciones ajustadas

para la estimación de la biomasa y carbono para el Saladillo (*Caraipa llanorum*) son adecuadas y confiables para usarse bajo las mismas condiciones o el mismo ámbito de datos con los que fueron ajustados. Las ecuaciones de biomasa y el factor de expansión obtenido facilitan el planteamiento y el desarrollo de proyectos dirigidos a la determinación de contenido de biomasa y carbono en los bosques de Saladillo, sin necesidad de utilizar métodos destructivos que implican altos costos y jornadas exhaustivas.

Con este primer estudio se tiene un punto de partida para conocer la dinámica del carbono en este tipo de cobertura, que abre la posibilidad de aprovechar un servicio ambiental que está siendo requerido a nivel mundial y que de ser bien manejado, podría generar beneficios. Se destaca la gran utilidad de los modelos de regresión de tipo estadístico para el análisis, la cuantificación y la predicción de relaciones entre variables en el campo de las ciencias forestales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado gracias a la asesoría técnica y profesional de la Universidad del Cauca y la Organización Acción Verde; también se contó con el apoyo técnico, logístico y financiero de la Cooperativa Canapro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, M. (2009). Biomasa aérea y contenido de carbono en bosques de *Quercushumboldtii* y *Colombobalanusexcelsa*: corredor de conservación de robles Guantiva-la Rusia-Iguaque (Santander-Boyacá) (Trabajo de pregrado, Administración del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales). Cali: Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ciencias Básicas. 110 p.
- Ardila, F. & Martínez, D. (2012). Cuantificación de la biomasa aérea y el contenido de carbon en los bosques de Saladillo *Caripa llanorum*

- en la finca de propiedad de Canapro, municipio de Puerto Carreño, Departamento del Vichada. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero forestal). Universidad del Cauca, Popayán. 68p.
- Brown, S., & Lugo, A.** (1984). Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science*, 223, 1290-1293.
- De Petre, A., Ali, S., & Reynero, N.** (2005). Proyectos de investigación aplicada a los recursos forestales nativos (Piarfon): Alternativas de sustentabilidad del bosque nativo del Espinal. Buenos Aires, Argentina: Banco Mundial. 15 p.
- Díaz, P.** (2005). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Talca: Universidad de Talca. 11 p.
- Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, R., Flores E., & Etchevers, J. D.** (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinuspatula* Schl. Et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34.
- Domínguez, G., Aguirre, O., Jiménez, J., Rodríguez, R., & Díaz, J.** (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15, 59-64.
- Figueroa, C., Etchevers, J., Velásquez, A., & Acosta, M.** (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 57-64.
- Fonseca, W. Alice, F., & Rey, J. M.** (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47.
- Gayoso, J., & Guerra, J.** (2005). Contenido de carbón en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*, 26(2), 33-38.
- Lampretch, H.** (1990). Silvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas. Posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Freiburg, Alemania. 335p.
- Montero, M., & Kanninen, M.** (2002). Comunicación técnica: Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 39-40, 50-52.
- Quintero, T. M.** (2001). Distribución espacial de *Caraipallanorum*, *Xylopialigustrifolia* y *Calophyllum brasiliense*, teniendo en cuenta su comportamiento demográfico y heterogeneidad ambiental en un bosque aluvial del río Yucaoa (Trabajo de pregrado, Ecología). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J.** (2000). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 15 p.
- Segura, M., & Andrade, H. J.** (2008). Captura de carbono en fincas cacaoteras indígenas: Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-95.
- Vanclay, J. K.** (1994). Modeling forest growth and yield: applications to mixed tropical forest. Guildford: Biddles Ltda. 312 p.
- Villa, A., & Ramírez, J.** (2005). Caracterización diamétrica de las especies maderables en bosques primarios del cerro Murrucucú (Tesis de pregrado, Ingeniería Forestal). Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias.