

Estimación de biomasa aérea y desarrollo de modelos alométricos para *Leucaena leucocephala* en sistemas silvopastoriles de alta densidad en el valle del Cauca, Colombia

Ligia María Arias-Giraldo¹;
Juan Carlos Camargo²;
Miguel Angel Dossman³;
Mauricio Alejandro Echeverry⁴;
José Alexander Rodríguez⁵;
Carlos Hernando Molina⁶;
Enrique José Molina⁶;
Iván Darío Melo⁷

Los SSP son una alternativa económica importante para los productores de la región del Eje Cafetero colombiano; su alta capacidad de almacenamiento de CO₂ puede considerarse como una ganancia adicional. La presencia de leucaena en los SSP no solo representa un mayor contenido de CO₂ en el sistema, sino que afecta positivamente las pasturas que, junto con leucaena, almacenan más carbono. Es factible predecir con una adecuada precisión la biomasa y el volumen de leucaena, usando como variable independiente el d₃₀. Estos modelos pueden contribuir notablemente en el monitoreo del carbono aéreo de leucaena.

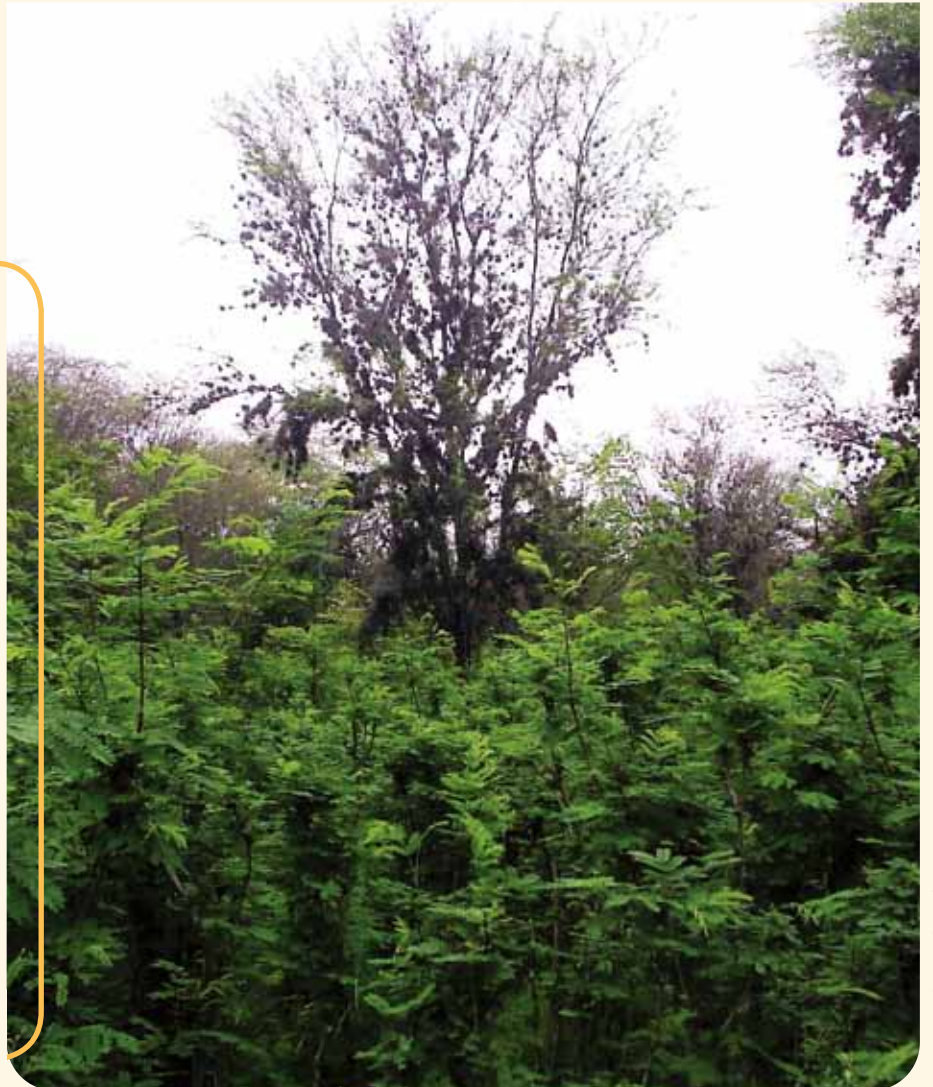


Foto: Grupo Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos.

¹ Investigadora. CIEBREG, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. larias@utp.edu.co
² Profesor Asociado. Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. jupipe@utp.edu.co
³ Investigador CIEBREG. Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. Pereira, Colombia. mdossman@utp.edu.co
⁴ Coordinador Unidad SIG CIEBREG. Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. Pereira, Colombia. mauroe@utp.edu.co
⁵ Investigador Grupo Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos. Universidad Tecnológica de Pereira. pauloalejo@yahoo.com
⁶ Investigador asociado. CIPAV, Cali, Colombia. chmolina@cipav.org.co
⁷ CIPAV, Cali, Colombia.

Resumen

La biomasa aérea y el carbono contenido en la misma fueron estimados dentro de sistemas silvopastoriles (SSP) con *Leucaena leucocephala* (leucaena) establecida entre dos y 14 años en la Reserva Natural El Hatico, municipio de El Cerrito, Valle del Cauca (Colombia). Las estimaciones se realizaron para la especie arbórea y las pasturas; adicionalmente se evaluó el carbono orgánico del suelo hasta 0,5 m de profundidad. Las mediciones se realizaron dentro de los SSP, tomando en cuenta el tiempo de establecimiento, y se compararon con pasturas sin árboles, tanto en la época seca como de lluvias. Se utilizó un muestreo anidado con parcelas rectangulares de 60 m x 30 m (1800 m²), dentro de las cuales se localizaron tres subparcelas circulares de 177 m² para la evaluación del carbono en el suelo y, dentro de estas, tres de 50 m² para la evaluación de biomasa y variables dendrométricas de la leucaena para el ajuste de modelos alométricos. Se encontraron contenidos de dióxido de carbono total (biomasa aérea y suelo) que van desde 369,44 t/ha para SSP con ocho años de establecidos hasta 724,38 t/ha en los sistemas con dos años de establecimiento (584,14 t/ha en sistemas de 14 años). En promedio, la biomasa aérea de leucaena contiene el 1,7% del carbono total, las pasturas el 3,6% y el suelo el 94,6% del total. Las pasturas bajo los SSP tienen un mayor contenido de biomasa y carbono que las pasturas sin árboles (22,72 t CO₂/ha vs. 11,71 t CO₂/ha). De los ocho modelos alométricos evaluados, el que usó la variable diámetro a 30 cm de altura (d₃₀) mostró la mejor respuesta y permite hacer una estimación de la biomasa aérea de leucaena con una precisión adecuada (R²adj= 0,83; RCME= 266,5). Los resultados permiten evidenciar que los SSP con leucaena cumplen un papel muy importante como sumideros de carbono hasta los cinco años; después de los 11 años el incremento es menor.

Palabras claves: *Leucaena leucocephala*; sistemas silvopastoriles; biomasa aérea; carbono; carbono orgánico del suelo; modelos alométricos; análisis de regresión; Valle del Cauca, Colombia.

Summary

Aboveground biomass estimates and allometric models for *Leucaena leucocephala* in high density silvopastoral systems in Valle del Cauca, Colombia. In the Natural Reserve of El Hatico, municipality of Cerrito (Valle del Cauca, southwest Colombia), the aboveground biomass and carbon content were estimated in silvopastoral systems (SPS) with *Leucaena leucocephala* (leucaena) established between 2 and 14 years earlier, and in treeless pastures. Additionally, soil carbon was also measured at 0,5 m depth. The time after establishment and climate conditions (rainy and dry season) were considered as comparison factors. A nested sampling design was used; plots of 60 m x 30 m (1800 m²) with three circular subplots of 177 m² for soil carbon and inside sub-subplots of 50 m² for measuring biomass and dendrometric variables (to fit allometric models) were established. Total carbon dioxide content (biomass and soil) ranged from 369,44 t/ha in 8-year-SPS to 724,38 t/ha in 2-year-SPS (584,14 t/ha in 14-year-SPS). The soil carbon content represented 94.6% of total amount, while pastures and leucaena biomass represented 3,6% and 1,7%, respectively. Both biomass content and carbon sink are higher in pastures with trees than in treeless pastures (22,72 t CO₂/ha vs. 11,71 t CO₂/ha, respectively). From the eight allometric models evaluated, the best response was obtained with the one that used d₃₀ as an independent variable; this model allows for proper biomass estimates (R²adj= 0,83; RMSE= 266,5). The obtained results showed that SPS are better than pastures as carbon sinks with an incremental tendency up to five years of establishment; after that, the increment rate is lower.

Keywords: *Leucaena leucocephala*; silvopastoral systems; aerial biomass; carbon: soil organic carbon; allometric models; regression analysis; Valle del Cauca, Colombia.

Introducción

Durante los últimos años en la zona cafetera de Colombia se han dado cambios importantes en la cobertura de la tierra. Actualmente, la ganadería ocupa cerca del 40% del área total y, de hecho, es el uso de la tierra más abundante (Murgueitio 2003). Estos cambios han ocasionado efectos negativos en los suelos, la biodiversidad, e incluso en las condiciones económicas de los productores (Murgueitio et ál. 2003). No obstante, diferentes proyectos ejecutados en la región cafetera han enfatizado sus acciones en la reconversión de la ganadería; tal es el caso del Proyecto “Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas” desarrollado en Colombia por el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (Cipav). Otras acciones y proyectos son promovidos por instituciones como la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) y el Centro de Investigaciones y Estudios en Biodiversidad y Recursos Genéticos (CIEBREG).

Este proceso busca, en esencia, cambiar la forma de hacer ganadería hacia un modelo ambientalmente más viable, que mantenga una productividad adecuada con prácticas que no degraden los recursos naturales. Para ello se requiere de una adecuada planificación de las fincas que incluye la eliminación de potreros en sitios de alta fragilidad (p.e. pendiente alta, orillas de ríos y quebradas), el manejo adecuado de la carga animal y la incorporación de especies leñosas a los potreros para la conformación de sistemas silvopastoriles (SSP). Así, se han promovido distintos arreglos como cercas vivas, árboles dispersos y sistemas de alta densidad con *Leucaena leucocephala* (leucaena). Este último es uno de los arreglos más comu-

nes que se ha implementado como parte de las estrategias de reconversión ganadera en la región del Eje Cafetero de Colombia debido a su capacidad nutricional, fijación de nitrógeno, crecimiento y adaptación al ramoneo (Shelton 1996 citado por Murgueitio e Ibrahim 2008). También se han implementado otros SSP con *Tithonia diversifolia* (botón de oro) y bancos de proteína con *Gliricidia sepium* (matarratón), *Trichanthera gigantea* (nacedero), *Morus alba* (morera) y *Boehmeria nivea* (ramio) (Murgueitio y Galindo 2008). Estos SSP han tenido buena acogida en la cuenca del río La Vieja, lo que ha permitido incrementar la productividad en términos de carne y leche y mejorar las condiciones ambientales, en relación con las pasturas sin árboles (Cardona y Suárez 1996, Calle et ál. 2002, Calle 2003).

Con el propósito de evaluar el efecto benéfico que pueden tener estos SSP como sumideros de carbono, se eligió un sitio de referencia donde se encuentran SSP de entre dos y 14 años de establecidos (en el año 2007 cuando se realizaron los muestreos de campo). Los objetivos del estudio fueron: (i) cuantificar y comparar el contenido de biomasa y carbono; (ii) identificar cambios en la biomasa asociados al tiempo de establecimiento; (iii) desarrollar modelos alométricos para la estimación de biomasa y volumen de la leucaena.

Área de estudio

El estudio se realizó en la Reserva Natural El Hatico, municipio de El Cerrito, Valle del Cauca; a una altura de 1000 msnm y precipitación promedio anual de 750 mm con dos periodos más lluviosos en los meses de marzo-mayo y octubre-noviembre. La temperatura promedio es de 24°C y la humedad relativa media es del 75%. En la evaluación se incluyeron nueve sitios de SSP de leucaena con

una densidad promedio de 10.000 árboles/ha y entre dos y 14 años de establecimiento. También se incluyó un sitio con pasturas sin árboles destinado a ganadería de leche y toros de lidia, con más de 20 años de establecido. Los tipos de pasturas presentes en los sitios son estrella (*Cynodon plectostachyus* Vanderyst) y guinea tanzania y mombasa (*Panicum maximum*) (Fig. 1 y Cuadro 1).

Diseño muestral

Para la cuantificación de la biomasa y el carbono se realizaron dos muestreos: uno en la época seca (21-23 de marzo 2007) y otro en la lluviosa (14-15 de junio 2007). Se utilizó un muestreo anidado con parcelas rectangulares de 60 m x 30 m (1800 m²) siguiendo la orientación de las hileras de leucaena. En cada parcela se localizaron tres subparcelas circulares de 177 m² para la evaluación del carbono en el suelo y dentro de estas tres subparcelas de 50 m² para la evaluación de biomasa y variables dendrométricas de leucaena para el ajuste de modelos alométricos. El muestreo incluyó la evaluación de los compartimientos de biomasa aérea de leucaena (tronco, ramas y hojas), pasturas y suelo.

El muestreo de suelo se realizó hasta 50 cm de profundidad, tomando muestras disturbadas en cada sitio para medir el contenido de materia orgánica, y muestras no disturbadas en cilindros de volumen conocido para determinar su densidad aparente. La materia orgánica se midió en el laboratorio de suelos mediante el método Walkley-Black (MacDicken 1997). Dentro de las parcelas circulares pequeñas (8 m de diámetro) se seleccionó al azar una planta de leucaena a la cual se midió el diámetro a 30 cm de altura (d_{30})⁸ sobre el suelo y su altura total. Para las pasturas se realizó el muestreo con un marco de 0,25 m² en tres puntos al azar dentro

⁸ La medida del diámetro a 30 cm sobre el suelo se hace teniendo en cuenta que, en promedio, la altura de la leucaena es de 147,6 ± 7,8 cm, por lo que no es adecuado usar variables como el diámetro a la altura del pecho (dap).

de cada parcela circular; además, se midió la altura de la pastura en cada uno de los tres puntos.

Mediante un muestreo destructivo se determinaron los pesos húmedos en campo de tronco, ramas y hojas de leucaena y de la biomasa correspondiente al marco de 0,25 m² en los tres puntos. De cada uno de los tres compartimientos de leucaena y de la pastura se tomaron submuestras de 250 g, las cuales fueron llevadas a laboratorio y secadas en horno a 60°C durante 48 horas. A partir de los pesos iniciales y los pesos secos hallados se estimó la biomasa y el carbono; mediante un factor de conversión de 3,67 (Márquez et ál 2000) se calculó el contenido de dióxido de carbono (CO₂) en cada compartimiento, el total por leucaena y en la pastura. Posteriormente, de acuerdo con la densidad de plantas de leucaena por hectárea y al área para las pasturas se extrapolaron los valores de CO₂.

Análisis

Se realizaron comparaciones de la biomasa y el contenido de CO₂ entre los SSP de distintas edades y las pasturas, teniendo en cuenta la época (seca y lluviosa). Como los sistemas se eligieron de forma sesgada, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para determinar diferencias estadísticamente significativas entre sitios y épocas. Los análisis se realizaron usando el software SPSS 10.0 para Windows (SPSS 1999).

Ajuste de modelos alométricos

Teniendo en cuenta las variables dendrométricas que se midieron en las plantas de leucaena (d₃₀ y altura), se evaluaron distintos modelos encontrados en la literatura para la estimación de biomasa y volumen y se probaron algunas funciones lineales usando las dos variables. La evaluación se realizó mediante técnicas

de regresión; los modelos con mayor precisión se seleccionaron teniendo en cuenta estadísticos como el error medio cuadrado (EMC), el sesgo y el coeficiente de determinación ajustado R²_{adj}. Para los análisis se utilizó el software SAS (1999).

Resultados y discusión

Estimación de la biomasa, carbono aéreo y carbono edáfico

La cantidad de biomasa -y por lo tanto, el contenido de CO₂- no mostró diferencias significativas entre y dentro de los sitios ni épocas de mues-

treo (p>0,05). En la época seca se encontró en promedio 5,38 ± 0,61 t/ha⁹ de biomasa seca y 5,77 ± 0,55 t/ha en la época lluviosa, equivalentes a 9,87 ± 1,12 t CO₂/ha y 10,59 t ± 1,01 CO₂/ha respectivamente. El compartimiento con mayor contenido de biomasa fue el tronco, seguido por las ramas y hojas. Las pasturas presentaron contenidos de biomasa de 11,45 ± 0,68 t/ha equivalentes a 21,01 ± 1,24 t CO₂/ha en la época seca y 11,90 ± 1,27 t/ha equivalentes a 21,83 ± 2,34 t CO₂/ha en la lluviosa. Estos valores de almacenamiento de carbono

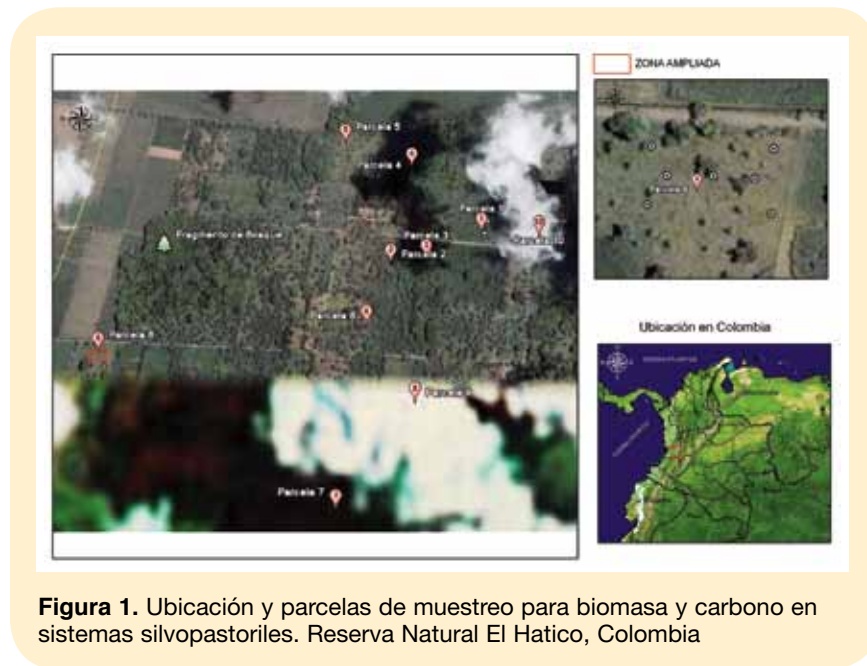


Figura 1. Ubicación y parcelas de muestreo para biomasa y carbono en sistemas silvopastoriles. Reserva Natural El Hatico, Colombia

Cuadro 1. Sitios de muestreo de sistemas silvopastoriles con leucaena, Reserva Natural El Hatico, Colombia

Sitio	Tiempo de establecido (años)	Tipo de pastura
Ceros	2	Estrella - guinea tanzania
Paramonte	4	Estrella - guinea tanzania
Crías	5	Guinea mombasa
Palmas	7	Estrella - guinea tanzania
Eles	8	Estrella
Burras	9	Estrella
Balastrea	11	Estrella
Mamoncillo	13	Estrella
Chiminangos	14	Estrella
Pastura sin árboles	Más de 20	Estrella

⁹ E.S. = Error estándar de la muestra

son superiores a los encontrados en pasturas de sistemas silvopastoriles en Costa Rica: 8,99 t CO₂/ha para *B. brizantha* con eucalipto y 7,87 t CO₂/ha para *B. brizantha* con *A. mangium* (Ávila 2000). Los resultados de biomasa y carbono aéreo concuerdan con los encontrados por Ávila et ál. (2001) en sistemas agroforestales de café–*Eucalyptus deglupta*, donde se encontraron contenidos de carbono en la parte aérea entre 10,6 t C/ha y 12,6 t C/ha. En SSP de *B. brizantha* con *A. mangium* y *B. brizantha* con *E. deglupta* se obtuvieron almacenamientos de 8,90 t C/ha y 7,48 t C/ha respectivamente (Ávila 2000); superiores a los encontrados por Andrade (1999) en SSP de brachiaria con acacia y eucalipto: 3,7 t C/ha y 4,7 t C/ha.

El suelo es el componente del sistema que más tiene almacenado CO₂: 555,43 ± 26,73t/ha en la época seca y 559,27 ± 29,11 t/ha en la lluviosa. Estas cifras son superiores a las encontradas en zonas del Eje Cafetero colombiano en suelos bajo sistemas silvopastoriles con leucaena de menos de tres años de establecimiento: entre 255,9 y 495,2 t CO₂/ha (Arias-Giraldo et ál. *En preparación*). El contenido promedio total en los SSP fue de 580,84 t ± 44,11 CO₂/ha en la época seca y 566,90 ± 57,48 t CO₂/ha en la lluviosa; no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre épocas. Dichos contenidos se encuentran dentro del rango encontrado en sistemas agroforestales de café con *E. deglupta* y *Erythrina poeppigiana* en Costa Rica, donde se reportan valores entre 120,92 y 195 t C/ha (Ávila 2000). En general, se observa que los valores de biomasa y carbono no se ven afectados por los cambios en precipitación.

Al comparar la biomasa y el contenido de carbono aéreo y en el suelo entre sitios, las diferencias fueron estadísticamente significativas (P<0,05). La biomasa aérea de leucaena tiende a aumentar significativamente hasta los cinco años, para

luego estabilizarse aunque existe una variabilidad muy alta. El valor promedio más alto se observó a los 11 años con 8,52 ± 2,43 t/ha de biomasa que equivalen a 15,63 ± 4,46 t CO₂/ha; esto probablemente tiene que ver con el mayor diámetro promedio de los individuos de leucaena en este sitio (d₃₀= 5,38 cm). Los SSP con mayor tiempo de establecimiento (14 años) tuvieron valores en biomasa que no difieren estadísticamente de los recién establecidos (dos años), lo que se asocia a la alta variabilidad encontrada en los datos de los sistemas más viejos (Fig. 2).

Con respecto a la biomasa y al contenido de CO₂ en las pasturas, el valor significativamente (p<0,05) más bajo se encontró en pasturas sin árboles: 6,38 ± 0,35 t/ha de biomasa seca equivalentes a 11,71 ± 0,63 t CO₂/ha. Sin embargo, estos valores son superiores a los encontrados por Ávila (2000) en pasturas de *B. brizantha* sin árboles: 2,04 t C/ha equivalentes a 7,49 t CO₂/ha. Los valores promedio más altos se obtuvieron en los SSP de 4 y 11 años: 17,45 ± 4,67 t/ha de biomasa seca equivalentes a 32,03 ± 8,57 t CO₂/ha

y 16,21 ± 1,61 t/ha de biomasa seca equivalentes a 29,74 ± 2,96 t CO₂/ha respectivamente. Para pasturas bajo sistemas silvopastoriles en Costa Rica se reportaron valores entre 1,28 t CO₂/ha y 8,99 t CO₂/ha (Andrade 1999, Ávila 2000). En nuestro estudio no se observa ninguna tendencia en especial; no obstante, se destaca que el SSP de 11 años mostró nuevamente uno de los valores más altos de biomasa (Fig. 3). También, es importante anotar que los tipos de pasturas y arreglos evaluados (estrella-guinea tanzania; estrella; guinea mombasa) no presentaron diferencias estadísticamente significativas (p>0,05) en los contenidos de biomasa y carbono.

El suelo es el componente que más carbono puede almacenar en el sistema; sin embargo el contenido no mostró relación con el tiempo de establecimiento del SSP (Fig. 4), a pesar de que se presentaron diferencias significativas (p<0,05) entre los sitios para esta variable. El valor más alto se obtuvo en el SSP de dos años: 698,11 ± 27,98 t CO₂/ha, y el más bajo en el sistema de ocho años: 333,65 ± 29,71 t CO₂/ha.

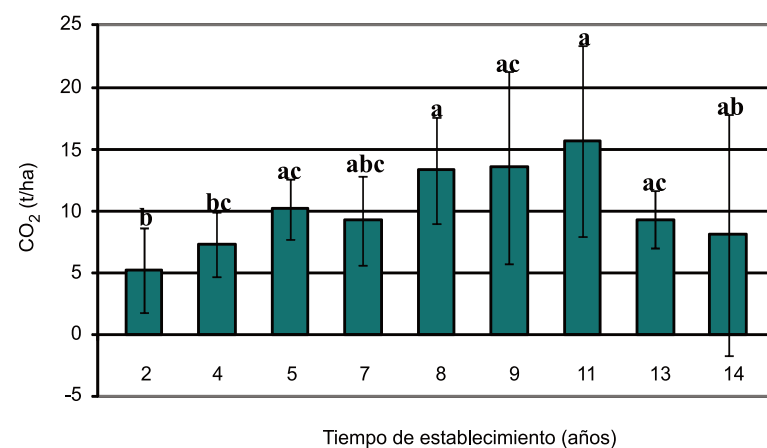


Figura 2. Contenidos de CO₂ (t/ha) en la biomasa aérea de leucaena en sistemas silvopastoriles con diferentes tiempos de establecimiento. Reserva Natural El Hatco, Colombia

Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).

Modelos alométricos para la estimación de biomasa y volumen de leucaena

Las variables dendrométricas de leucaena mostraron que en promedio un tronco tiene $3,34 \pm 0,16$ cm de diámetro a los 30 cm de altura (d_{30}), $147,5 \pm 7,79$ cm de altura total y $1,387 \pm 172$ cm³ de volumen. Los valores por sitio pueden observarse en el Cuadro 2.

De los modelos alométricos probados para la estimación de la biomasa aérea de la leucaena, el que mejor se ajusta según los estadísticos evaluados es el modelo (5) (RCME = $\pm 266,5$ g; $R^2_{adj} = 0,83$); su aplicación permite predecir la biomasa a partir del logaritmo natural en base “e” del d_{30} (Cuadro 3). Este resultado es consistente con modelos de biomasa ajustados para especies como *Acacia harpophylla*, los cuales mostraron $R^2 = 0,96$ (Eamus et ál. 2000). De acuerdo con el análisis de residuos, el modelo (5) brinda una estimación apropiada de la biomasa y no presenta problemas de sesgo ni homeostasis de la varianza (Fig. 5).

Para el volumen se probaron cerca de 15 modelos; sin embargo, solo se ofrecen los de mejor respuesta. Entre estos se destaca el modelo (2), que solo utiliza como variable independiente el d_{30} , lo que hace muy práctica su aplicación. Este modelo ha sido ajustado con éxito también para especies arbóreas latifoliadas como *Carpinus caroliniana*, *Carya ovata*, *Clethra pringleii* y *Quercus xalapensis* con coeficientes de determinación entre 0,97 y 0,99 (Rodríguez et ál. 2006). En el caso de leucaena, su estimación es adecuada de acuerdo con los estadísticos evaluados (RCME = $\pm 597,9$ cm³; $R^2_{adj} = 0,91$). Otros modelos mostraron también una buena respuesta, pero la mayoría de ellos involucran también la altura (Cuadro 4). En la Fig. 6 se puede ver, a partir del análisis de residuos, que el modelo (2) brinda una estimación apropiada de la biomasa y no presenta problemas de sesgo ni homeostasis de la varianza.

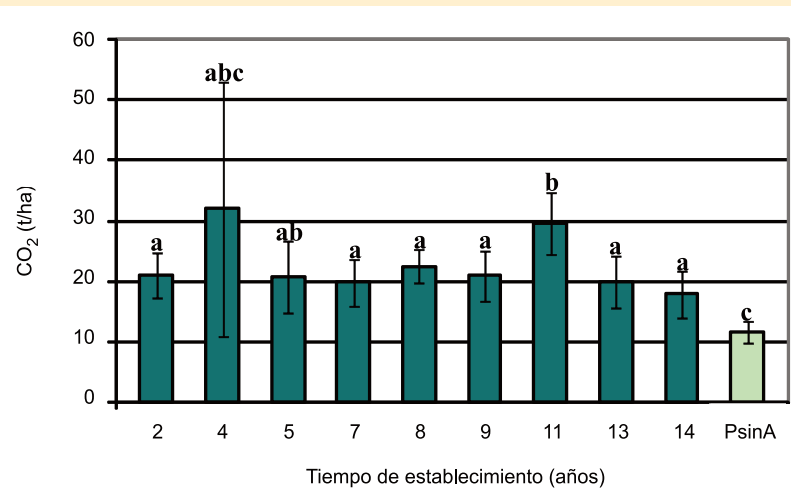


Figura 3. Contenidos de CO₂ (t/ha) en la biomasa aérea de las pasturas en sistemas silvopastoriles con diferentes tiempos de establecimiento y en pasturas sin árboles (PsinA). Reserva Natural El Hatico, Colombia

Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

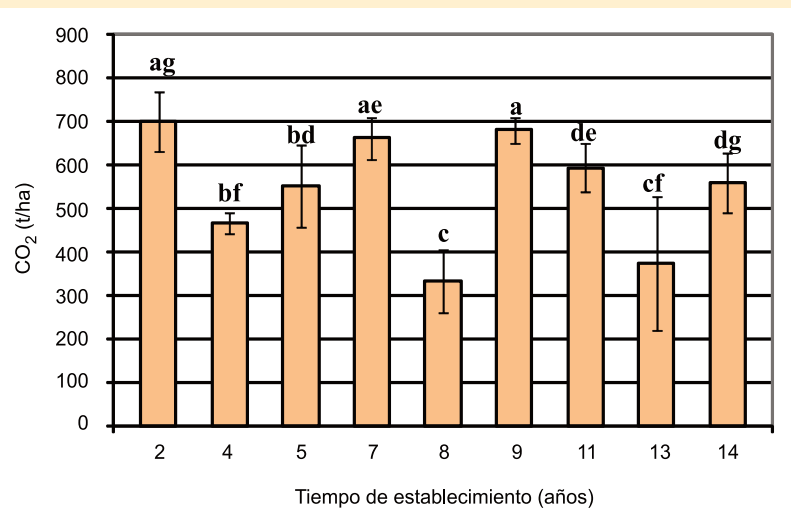


Figura 4. Contenido de CO₂ (t/ha) en el suelo a 50 cm de profundidad en sistemas silvopastoriles con diferentes tiempos de establecimiento. Reserva Natural El Hatico, Colombia

Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Conclusiones y recomendaciones

Los SSP son una alternativa económica importante para los productores de la región del Eje Cafetero colombiano; su alta capacidad de

almacenamiento de CO₂ puede considerarse como una ganancia adicional. La presencia de leucaena en los SSP no solo representa un mayor contenido de CO₂ en el sistema, sino que afecta positivamente las

Cuadro 2. Variables dendrométricas medidas para los troncos de *Leucaena leucocephala*, Reserva Natural El Hatico, Colombia

Sitio	TE (años)	d ₃₀ (cm)	Variable	
			Altura (cm)	Volumen (cm ³)
Ceros	2	2,29 ± 0,21	221,0 ± 16,2	996,2 ± 244,5
Paramonte	4	2,81 ± 0,17	150,8 ± 27,9	947,2 ± 192,8
Crías	5	3,21 ± 0,09	138,8 ± 10,0	1137,8 ± 120,2
Palmas	7	3,15 ± 0,24	168,3 ± 17,9	1367,5 ± 294,5
Eles	8	3,79 ± 0,19	126,0 ± 15,9	1457,3 ± 265,7
Burras	9	3,98 ± 0,62	101,1 ± 7,6	1360,5 ± 403,0
Balustrera	11	5,38 ± 1,96	119,0 ± 15,0	3889 ± 2910,7
Mamoncillo	13	4,03 ± 0,48	77,2 ± 3,7	1038,4 ± 266,8
Chiminangos	14	1,95 ± 0,48	155,7 ± 53,1	684,5 ± 480,3

TE= Tiempo de establecimiento

Cuadro 3. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de *Leucaena leucocephala*, Reserva Natural El Hatico, Colombia

Modelo*	RCME	R ²	R ² ajustado	Fuente
$e^B = -22,13 + 23,09 \cdot e^{(d_{30}^{0,89,41})}$	0,57	0,28	0,25	Ávila (2000)**
$B = 116,5 + 131,5 \cdot d_{30}$	269,57	0,28	0,27	Segura et ál. (2006)
$\log(B) = -0,97 + 1,27 \cdot \log(d_{30})$	0,20	0,47	0,46	
$\log(B) = -1,46 + 1,32 \cdot \log(d_{30}) + 0,22 \cdot \log(h)$	0,20	0,49	0,47	Scanlan (1991)***
$B = e^{(5,41 + 0,77 \cdot \ln(d_{30}))}$	266,53	0,83	0,83	
$\ln(B) = 4,68 + 1,27 \cdot \ln(d_{30})$	0,47	0,47	0,46	Harrington (1979)
$\ln(B) = 3,56 + 1,32 \cdot \ln(d_{30}) + 0,22 \cdot \ln(h)$	0,47	0,49	0,47	Saldarriaga et ál. (1988)
$\ln(B) = \ln(2,470 - 2,57 \cdot \ln(d_{30}) - 0,67 \cdot \ln(h) + 0,81 \cdot \ln(d_{30}) \cdot \ln(h))$	0,46	0,51	0,49	Fehrmann y Kleinn (2006)

*Todos los modelos presentan una P<0,0001

**Se usó la variable d₃₀ en vez de la altura

***Se usó la variable d₃₀ en vez de la circunferencia a 30 cm

B = biomasa aérea total; d₃₀ = diámetro a 30 cm de altura; h = altura total

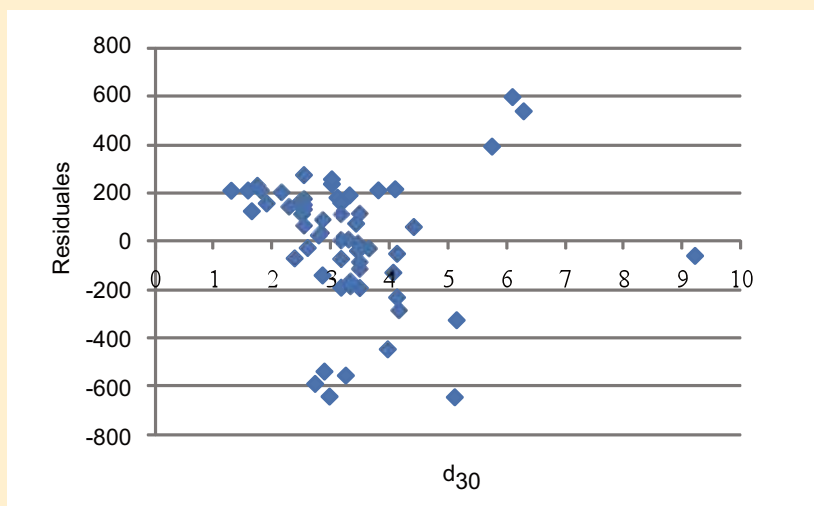


Figura 5. Distribución de los residuales de la biomasa con respecto a los valores del d₃₀. Reserva Natural El Hatico, Colombia

pasturas que, junto con leucaena, almacenan más carbono.

Es factible predecir con una adecuada precisión la biomasa y el volumen de leucaena, usando como variable independiente el d₃₀. Estos modelos pueden contribuir notablemente en el monitoreo del carbono aéreo de leucaena.

En los SSP más antiguos, sería importante introducir nuevas plantas ya que algunas se han deteriorado; esto activaría el sistema en términos de incremento de biomasa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Reserva Natural El Hatico y al Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV); a Colciencias por la financiación del Proyecto “Valoración de los bienes y servicios de la biodiversidad para el desarrollo sostenible de paisajes rurales colombianos: Complejo Ecorregional Andes del Norte” desarrollado por el Centro de Investigaciones y Estudios en Biodiversidad y Recursos Genéticos (CIEBREG); a la Universidad Tecnológica de Pereira por la cofinanciación del Proyecto; a John Heiber Ospina, Giovanni Grajales, Harold Cardona y Juan Carlos Botero, compañeros del Grupo de Investigación.

Literatura citada

- Andrade, HJ. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- Arias-Giraldo, LM; Camargo, JC; Dossman, MA. *En preparación*. Almacenamiento de carbono en suelos bajo diferentes usos en la cuenca del río La Vieja, Colombia. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Centro de Investigaciones y Estudios en Biodiversidad y Recursos Genéticos (CIEBREG).
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.

Ávila, G; Jiménez, F; Beer, J; Gómez, M; Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.

Calle, Z. 2003. Restauración de suelos y vegetación nativa: ideas para una ganadería andina sostenible. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (Cipav).

Calle, Z; Murgueitio, E; Calle, N. 2002. Enfoques silvopastoriles integrados para el manejo de ecosistemas: ganadería productiva y sostenible. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (Cipav).

Cardona, MC; Suárez, S. 1996. Utilización de leucaena en bancos de proteína y en asocio con gramíneas. Plan de modernización tecnológica de la ganadería bovina colombiana. Silvopastoreo: alternativa para mejorar la sostenibilidad y competitividad de la ganadería colombiana. Compilación de las Memorias de dos Seminarios Internacionales sobre Sistemas Silvopastoriles. Bogotá, Colombia, CORPOICA, Fedegan, Colciencias, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Dieguez, U; Barrio, M; Castedo, F; Ruiz, AD; Álvarez, MF; Álvarez, JG. 2003. Dendrometría. Madrid, España, Mundiprensa.

Eamus, D; McGuinness, K; Burrows, W. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and Western Australia. Queensland, Australia, Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System. Technical Report N° 5A.

Fehrmann, L; Kleinn, C. 2006. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecology and Management* 236:412-421.

Harrington, G. 1979. Estimation of above-ground biomass of trees and shrubs in a *Eucalyptus populnea* F. Muell. woodland by regression of mass on trunk diameter and plant height. *Australian Journal of Botany* 27:135-143.

MacDicken, KG. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VI, US, Winrock International Institute for Agricultural Development.

MacDicken, KG; Brewbaker, JL. 1988. Growth rates of five tropical leguminous fuel wood species. *Journal of Tropical Forest Science* 1(1):85-93.

Márquez, L; Roy, A; Castellanos, E. (Eds.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, Fundación Solar.

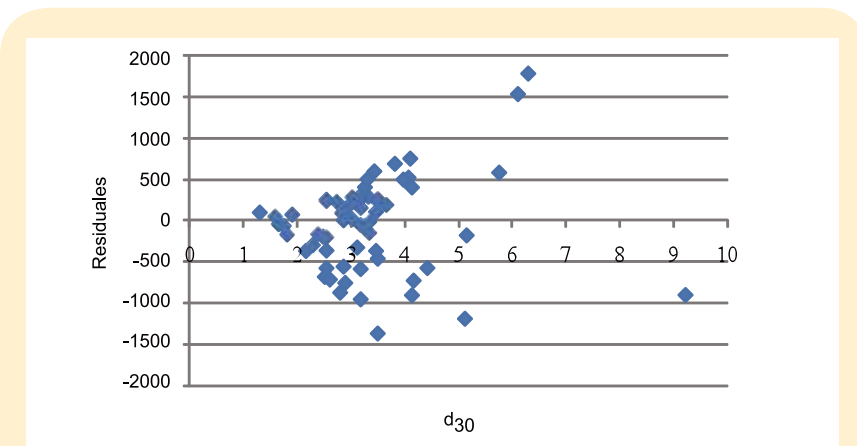


Figura 6. Distribución de los residuales del volumen con respecto a los valores del d_{30} . Reserva Natural El Hatico, Colombia

Cuadro 4. Modelos alométricos para la estimación del volumen de leucaena. Reserva Natural El Hatico, Colombia

Modelo*	RCME	R ²	R ² ajustado	Fuente
$V = 121,6 + 98,28*(d_{30})^2$	591,90	0,81	0,81	MacDicken y Brewbaker (1988)
$V = 105,6*(d_{30})^{1,99}$	597,89	0,91	0,91	Dieguez et ál. (2003)
$V = 0,71*(d_{30})2,01*h1.02$	60,75	0,99	0,99	
$\ln(V) = 4,92 + 1,78*\ln(d_{30})$	0,41	0,69	0,68	Harrington (1979)**
$\ln(V) = -0,30 + 1,99*\ln(d_{30}) + 1,01*\ln(h)$	0,06	0,99	0,99	Saldarriaga et ál. (1988)**
$\ln(V) = \ln(0,82 + 1,90*\ln(d_{30}) + 0,99*\ln(h) + 0,02*\ln(d_{30})*\ln(h))$	0,06	0,99	0,99	Fehrmann y Kleinn (2006)**

*Todos los modelos presentan una $P < 0,0001$; **Modelos usados en literatura para estimar biomasa; V = volumen total; d_{30} = diámetro a 30 cm de altura; h = altura total

Murgueitio, E. 2003. Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución (en línea). *Livestock Research for Rural Development* 15(10): Consultado 24 ene. 2005. Disponible en <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd15/10/murg1510.htm>.

Murgueitio, E; Galindo, W. 2008. Reversión ambiental de fincas ganaderas en los andes centrales de Colombia. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, J. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.

Murgueitio, E; Ibrahim, M. 2008. Ganadería y medio ambiente en América Latina. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, J. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.

Murgueitio, E; Ibrahim, M; Ramírez, E; Zapata, A; Mejía, CE; Casasola, F. 2003. Usos de la tierra en fincas ganaderas; guía para el pago de servicios ambientales en el Proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.

Rodríguez, R; Jiménez, J; Aguirre, O; Treviño, E. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *México, Universidad Autónoma de Nuevo León. Ciencia IX(2):179-187*.

Saldarriaga, JG; West, DC; Tharp, ML; Uhl, C. 1988. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *The Journal of Ecology* 76(4):938-958.

SAS Institute. 1999. SAS/STAT User's guide, Release 8.0 Edn. Cary, NC, US.

Scanlan, JC. 1991. Woody overstorey and herbaceous understorey biomass in *Acacia harpophylla* (brigalow) woodlands. *Australian Journal of Ecology* 16:521-529.

Segura, M; Kanninen, M; Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforest Syst. Springer Science + Business Media*.

SPSS. 1999. SPSS 10.0 Syntax Reference Guide. SPSS Inc. USA.