

FIJACIÓN DE CARBONO ATMOSFÉRICO EN LA BIOMASA TOTAL DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA, COLOMBIA

ATMOSPHERIC CARBON FIXATION IN THE TOTAL BIOMASS WITHIN COCOA PRODUCTION SYSTEMS IN THE DEPARTMENT OF TOLIMA, COLOMBIA

María del Pilar Marín Q.¹, Hernán J. Andrade², Angélica P. Sandoval³

¹ Bióloga. Universidad del Tolima, sede principal, barrio Santa Elena, parte alta, Ibagué, Tolima, Colombia, e-mail: mdpmarinq@ut.edu.co; ² Ingeniero Agrónomo, Magister en Agroforestería, Doctor en Agroforestería, Profesor Asociado, Líder Grupo de Investigación PROECUT. Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica, sede principal, barrio Santa Elena, parte alta, Ibagué, Tolima, Colombia, e-mail: hjandrade@ut.edu.co; ³ Ingeniera Química, Doctora en Ingeniería de Alimentos, Profesora Asistente. Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica, sede principal, barrio Santa Elena, parte alta, Ibagué, Tolima, Colombia, e-mail: apsandovala@ut.edu.co

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 19(2): 351-360, Julio-Diciembre, 2016

RESUMEN

Los sistemas de uso del suelo con leñosas perennes, como cacaotales, mitigan el cambio climático, al capturar CO₂ atmosférico. El objetivo del estudio fue estimar la fijación de carbono en biomasa total en los sistemas de producción de cacao, dominantes del Tolima, Colombia. El estudio, se realizó en Rovira y Falan, empleando un diseño experimental, completamente al azar, con seis sistemas de producción de cacao: monocultivo, sistema agroforestal (SAF) con maderables, SAF con aguacate, SAF con cítricos, SAF con frutales, y SAF con maderables y frutales y tres repeticiones. Se establecieron dos parcelas de muestreo rectangulares, de 1.000m² por unidad de muestreo, donde se identificaron y midieron los árboles con dap \geq 10cm (diámetro del tronco a la altura del pecho -dap- y altura total -ht). Se establecieron dos sub-parcelas de 256m², por parcela principal, para medir arbustos de cacao: ht y diámetro del tronco, a 30 cm de altura (D₃₀). Se emplearon modelos alométricos, para estimar la biomasa. El SAF con maderables y frutales y SAF con frutales presentaron la mayor biomasa total (122,0 y 72,5t/ha). En el SAF con maderables y frutales, se evidenció el mayor almacenamiento de carbono, con 61,0t C/ha, mientras que la mayor tasa de fijación de carbono fue de 17,7t/ha/año, para el SAF con cítricos. Los resultados sugieren que la producción de cacao, que incluyen otras especies vegetales, diversifica la producción e incrementa la seguridad alimentaria y la generación de servicios ambientales, tal como la captura de carbono atmosférico.

Palabras clave: Altura total, modelos alométricos, dap, gases de efecto invernadero, sistemas agroforestales.

SUMMARY

The land use systems with woody perennials species, such as cacao plantations, mitigate climate change by capturing atmospheric CO₂. The aim of the study was to estimate the fixation of atmospheric carbon in total biomass in the most dominant cocoa production systems in Tolima, Colombia. The study was carried out in Rovira and Falan using a completely randomized experimental design with six cocoa production systems: monoculture, agroforestry system (SAF) with timber trees, SAF with avocado, SAF with citrus species, SAF with fruit trees and SAF with timber and fruit species with three replications. Two rectangular sampling plots 1000m² were established by sampling unit where trees with diameter of trunk at breast height (dbh) \geq 10cm were identified and measured (dbh and total height - th). Two subplots of 256 m² by main plot, for measuring cocoa bushes were established: ht and trunk diameter at 30cm height (D₃₀). Allometric models to estimate biomass were used. The AFS with timber and fruit species and AFS with fruit species had the greatest biomass (122.0 and 72.5t/ha). In the AFS with timber and fruit species presented the highest carbon storage in biomass with 61.0t C/ha; whereas the greatest carbon fixation rate was 17.7 t/ha/year in AFS with citrus species. The results suggest that cocoa plantations that include other plant species diversify the production and increase food security and generation of environmental services, such as capturing atmospheric carbon.

Key words: Total height, biomass, dbh, greenhouse gases, agroforestry systems.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, generado por el incremento en las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, ha producido continuos acontecimientos climáticos, como el aumento global de la temperatura del aire, océanos, el derretimiento de nieve y hielo y consecuente acrecentamiento del nivel del mar (Panel Intergubernamental en Cambio Climático –IPCC–, 2007). Entre los principales GEI responsables, se tienen el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el ozono (O₃) y los halocarbonos, cuyos niveles elevados tienen una relación directa con el incremento de la temperatura media global, en $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, a partir del siglo XX (IPCC, 2001); por tal motivo, la contribución de las actividades antropogénicas han acentuado las concentraciones de CO₂, CH₄ y clorofluorocarbonos en la atmósfera, lo cual, intensifica el efecto invernadero y, con ello, eleva la temperatura de la superficie de la tierra (Cifuentes, 2010).

Las especies vegetales, como un medio importante para captar y almacenar el carbono, ha sido reconocida ampliamente en la producción agrícola y forestal y fue aprobada como una estrategia importante de mitigación del cambio climático (Nair *et al.* 2009). El secuestro de carbono, por medio de los sistemas de uso de la tierra, incluido los sistemas agroforestales (SAF), gira en torno a la interacción de procesos ecológicos y biológicos, como la fotosíntesis, la respiración y la descomposición (Montagnini & Nair, 2004). Se ha registrado que los SAF pueden modificar el microclima, es decir, mitigar las condiciones climáticas extremas de temperatura, de precipitación, de vientos fuertes o de alta radiación solar; asimismo, son viables para la agricultura, por la combinación de especies leñosas maderables, cultivos agrícolas y ganado (Andrade *et al.* 2013); por lo anterior, estos sistemas de producción se pueden adecuar a las exigencias del ambiente. Cultivos como el cacao, el café y el aguacate aparecen como insignias y tradicionales en el Tolima y pueden, perfectamente, ser producidos bajo estos sistemas de producción (Andrade *et al.* 2013).

En la actualidad, las decisiones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de reducir las emisiones de la deforestación y degradación (REDD+), alientan a los países en desarrollo a contribuir con acciones de mitigación. De hecho, la reducción de estas emisiones, derivadas de la deforestación y la degradación forestal, tal como la conservación de las reservas forestales de carbono, el manejo sostenible de los bosques y el incremento de las reservas forestales de carbono, emprenden, de forma voluntaria, actividades que reducen los GEI y que incrementen los sumideros de carbono en el sector forestal (Sandker *et al.* 2015).

Los sistemas de uso del suelo acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, biomasa abajo del suelo (sistema radicular), necromasa y carbono orgánico del suelo. Segura & Andrade (2012) estimaron tasas de fijación de carbono en la biomasa total en sistemas SAF con café, en un rango de 5,9 a 13,8t CO₂e/ha/año. Por su parte, Arce *et al.* (2008) encontraron en Talamanca, Costa Rica, que los árboles maderables de sombrero en cacaotales, almacenaron 32t C/ha, en la biomasa arriba del suelo. Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5; sin embargo, la fracción de carbono puede variar típicamente entre 0,42 y 0,47, en el fuste de árboles (Brown & Lugo, 1984).

La principal característica de los SAF es que presentan interacciones ecológicas y económicas entre sus componentes, lo que permite la obtención de diversos bienes y beneficios, tal como la madera, el forraje, la leña, la materia orgánica, la medicina, los cosméticos y los aceites (Nair, 1993). Además, estos sistemas son proveedores importantes de servicios, como seguridad alimenticia, conservación de suelos, aumento de la fertilidad del suelo, mejora del microclima, recuperación de tierras degradadas y control de arvenses (Andrade *et al.* 2013). Este trabajo de investigación, se realizó con el objetivo de estimar la fijación de carbono atmosférico en biomasa arriba y abajo del suelo, en los sistemas de producción de cacao más dominantes del Departamento del Tolima. Con base en esto, se identificaron los sistemas de producción que representan una alternativa para los agricultores, en cuanto a la producción y generación de servicios ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y área de estudio. El estudio, se desarrolló en las veredas La Selva, Pueblo Nuevo, Pijaito y Llanitos Predio Dos, del municipio de Rovira y Lajas, Piedra Negra y la Yuca, en el municipio de Falan, en el departamento del Tolima, Colombia (Figura 1). De acuerdo al Proyecto Integral Único de Falan (2009), el municipio se encuentra ubicado en el área de la Región Andina, sobre las estribaciones finales de la Cordillera de los Andes y al noroeste de la ciudad de Ibagué, colindando con los municipios de Fresno, Villahermosa y Casabianca (5° 08' N y 74° 57' O). La altitud promedio del municipio es de 983 m; sin embargo, posee áreas desde los 350 m, en el sector nororiental del municipio, hasta los 1850 m de altitud (Reyes, 2012). El municipio de Falan posee dos pisos térmicos (cálido y templado), con una temperatura media de 23°C y precipitaciones que oscilan alrededor de 2179mm. La economía del municipio gira alrededor del sector agropecuario, presentándose diversidad de productos, localizados, mayormente, en la zona marginal baja, tal como el café, la yuca, el plátano, los frutales, el cacao, el maíz, las hortalizas y pastos. Estos cultivos, se pueden presentar en

forma asociada con árboles o en monocultivo y se propagan en las partes con mayor pendiente (40 al 70%) (PIU, 2009).

El municipio de Rovira, se encuentra situado en el centro del departamento del Tolima (Figura 1). Su cabecera municipal tiene por coordenadas 04° 14' 34" N y 75° 14' 35" O, con una altitud de 900m, una temperatura media de 24°C y una precipitación media anual de 1848mm (Plan de Ordenamiento Territorial –POT-, 2011). La agricultura es la actividad más importante, porque vincula el mayor número de habitantes y genera excedentes económicos de relevancia al mu-

nicipio. Esta actividad está conformada por cultivos asociados e intercalados a los cultivos comerciales permanentes, para que sean productivos en los primeros años. Los cultivos asociados son muy valiosos, como bienes alimentarios básicos en la canasta familiar de los pequeños agricultores, para el intercambio de productos, generando ingresos adicionales, con la venta de los excedentes, siendo los cultivos de hortalizas, maíz, plátano, arveja, yuca, aguacate, arracacha, banano, cacao y frutales, como cítricos, guanábano, mora y curuba, los más representativos (PIU, 2009).

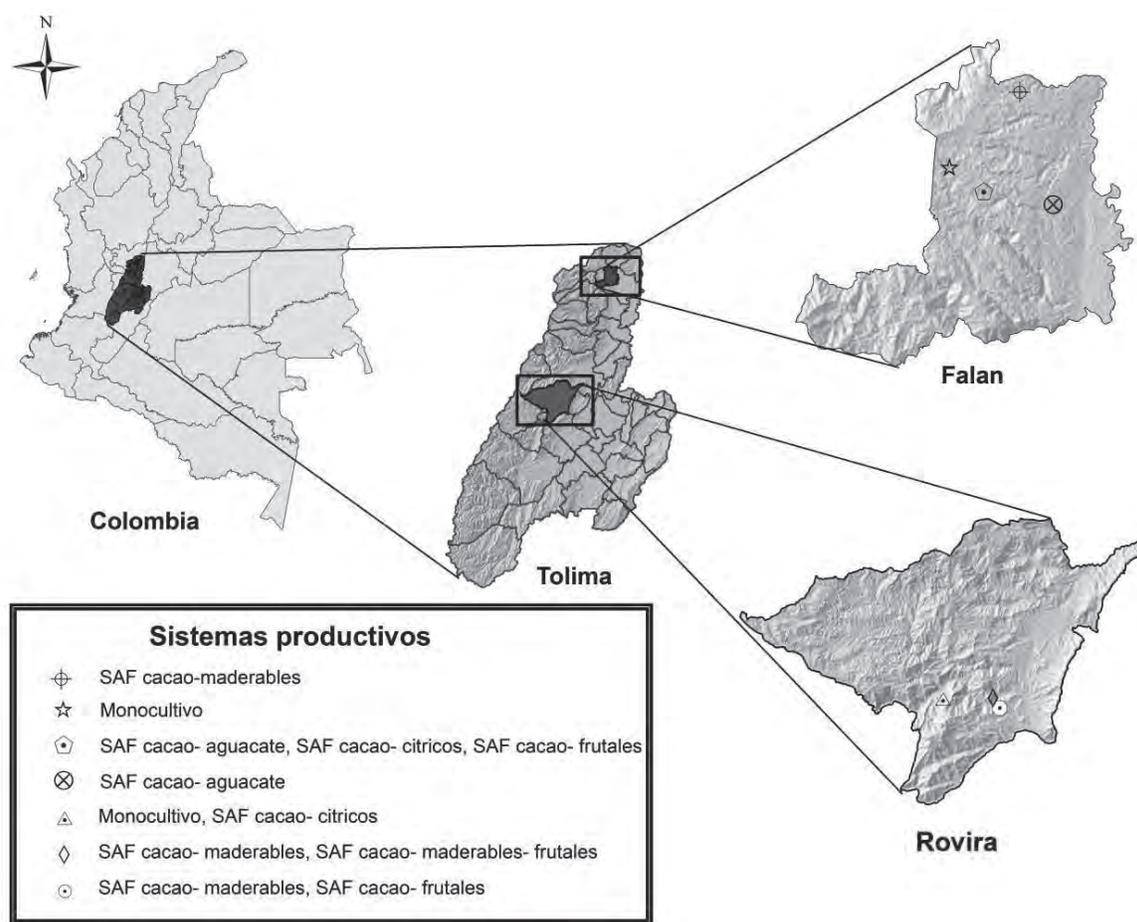


Figura 1. Localización geográfica y sistemas de producción de cacao más dominantes, de los municipios de Rovira y Falan, en el departamento del Tolima.

Selección de sistemas de producción y fincas. Se seleccionó un total de 18 fincas cacaoteras, distribuidas en los dos municipios, con los sistemas de producción de cacao más representativos de la zona. Se empleó un diseño experimental, completamente al azar, con seis tratamientos, consistentes en seis sistemas de producción de cacao: 1) monocultivo (Mo); 2) SAF con maderables (SAF- Ma); 3) SAF con maderables y frutales (SAF- MaFr); 4) SAF con aguacate

(SAF- Ag); 5) SAF con cítricos (SAF- Ci) y 6) SAF con frutales (SAF- Fr) con tres repeticiones.

Estimación del almacenamiento y tasas de fijación de carbono en biomasa. La biomasa aérea, se estimó mediante el establecimiento de dos parcelas temporales de muestreo rectangulares, de 20 x 50m (1000m²), por unidad muestral, para la medición de la altura total (ht) y el diámetro a la altura

del pecho (DAP), de todos los árboles de sombrío (leñosas perennes), con DAP ≥ 10. Asimismo, dentro de cada unidad muestral, se establecieron dos sub-parcelas, de 16 x 16m (256m²), para medir todos los individuos de cacao (diámetro a 30cm de altura - D₃₀- y la altura total - ht) (Figura 2). La biomasa aérea por individuo fue estimada con base en las dimensiones ht y dap o D₃₀ y el uso de modelos alométricos, reportados en la literatura, que han sido desarrollados en condiciones similares (Tabla 1). La biomasa abajo del suelo

o de raíces, se estimó con el modelo desarrollado por Cairns *et al.* (1997) y recomendada por el IPCC (2003), que emplea la biomasa aérea.

$$Br = e^{(-1,0587+0,8836*Ln(Ba))}$$

Donde, Br es la biomasa bajo el suelo (t/ha) y Ba es la biomasa aérea (t/ha).

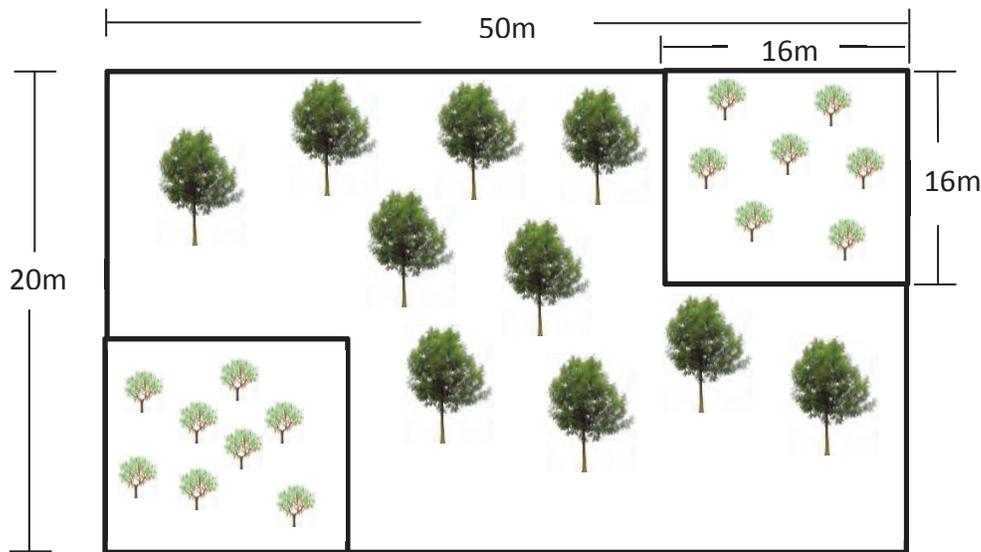


Figura 2. Tamaño de las parcelas de muestreo, de 50 x 20 (1000m²), para medición de árboles de sombra y sub-parcelas, de 16 x 16 (256m²), para medición de árboles de cacao, en los sistemas de producción de cacao más dominantes, de la zona de Rovira y Falan, Tolima.

Tabla 1. Ecuaciones alométricas empleadas para estimar la biomasa arriba de árboles, con dap ≥ 10 cm, en sistemas de producción de cacao, en los municipios de Rovira y Falan, Tolima, Colombia.

Especies	Modelo	R ²	Fuente
Árboles frutales (Modelos multiespecies)	$B = 10^{((1,12+2,62*Log(dap)+0,03*Log(h_t)))}$	0,95	Andrade <i>et al.</i> (2008)
Árboles maderables (<i>Cordia alliodora</i> , <i>Cedrela odorata</i>)	$B = 10^{((-0,94+1,32*Log(dap)+1,14*Log(h_t))}$	0,96	Segura (2005)
<i>Pithecellobium guachapele</i> , <i>acacia glomerata</i> , <i>Croton sp</i> , <i>Carica papaya</i> , <i>Guarea trichiliodes</i>	$B = 21,30 - 6,95 * (dap) + 0,74 * (dap)^2$	0,92	Brown & Iverson (1992)
<i>Theobroma cacao</i>	$B = 10^{((-1,625+2,63*Log(dap_{30}))}$	0,98	Andrade <i>et al.</i> (2008)

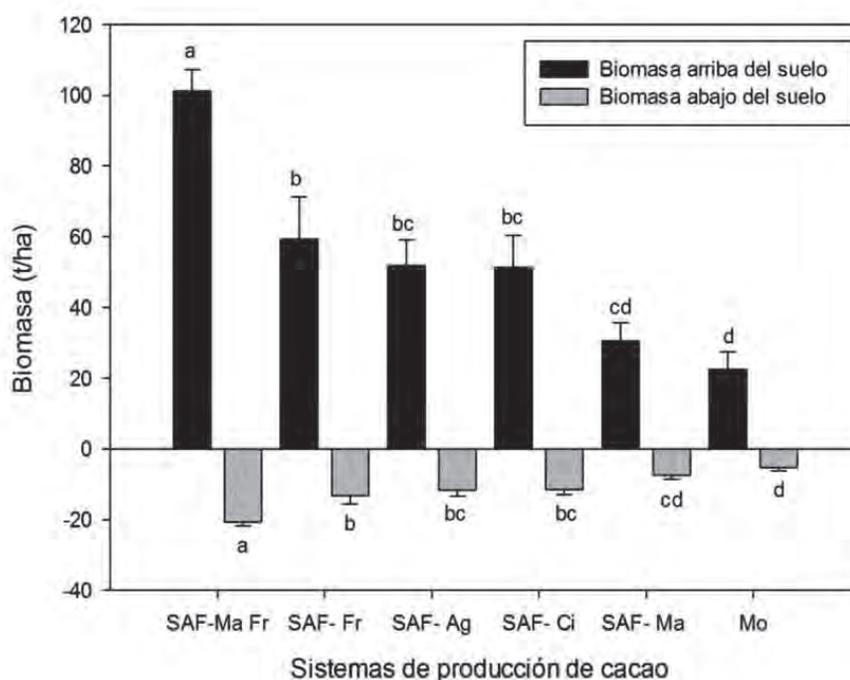
B: biomasa aérea total (kg/árbol); dap: diámetro a la altura del pecho (1,30m) (cm); h: altura total (m); Log: Logaritmo base 10; dap₃₀: diámetro del tronco a 30cm de altura (cm).

La biomasa total es el resultado de la suma de la biomasa aérea y abajo del suelo. El almacenamiento de carbono en la biomasa, se calculó utilizando el valor *default* de fracción de carbono (0,5) (IPCC, 2003). La tasa de fijación de carbono para árboles de sombrío e individuos de cacao fue estimada dividiendo el almacenamiento de carbono entre la edad promedio de cada componente, la cual, fue valorada mediante una entrevista al productor o administrador de la finca. La tasa de fijación fue cuantificada en términos de CO₂e, usando una constante de 3,67 (IPCC, 2006), que consiste en la relación de pesos moleculares del CO₂ y el C. Consecuentemente, la producción anual de cacao fue consultada a los productores y fue empleada para estimar la tasa de fijación de carbono, por unidad de cacao producido.

Análisis estadístico. Los datos colectados fueron analizados con un diseño experimental, completamente al azar, mediante un análisis de varianza. Se realizó la prueba de Shapiro Wilk, para determinar la normalidad de los datos y, para evaluar la significancia estadística, se realizó una comparación de medias, empleando la prueba LSD Fisher ($p < 0,05$). Los análisis estadísticos se ejecutaron en el software Infostat (Di Rienzo *et al.* 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa arriba y abajo del suelo en plantaciones de cacao. En general, en términos de biomasa total, el estudio presentó valores notables, tanto para los SAF, que incluyen especies maderables con frutales (SAF- MaFr), tal como iguá (*Albizia guachapele*), cedro (*Cedrela odorata*), nogal cafetero (*Cordia alliodora*), bayo (*Acacia glomerata Benth*), jobo (*Spondias mombim*), papayo (*Carica papaya*) y aguacate (*Persea americana*), con 122t/ha, así como los SAF, que solo albergan especies frutales (SAF-Fr), fijando 72,5t/ha. La biomasa aérea de estos dos sistemas de producción (101,2 y 59,5t/ha, respectivamente) superó estadísticamente ($p < 0,05$), en un 7 a 16%, a los SAF- Aguacate (SAF- Ag), SAF- Cítricos, SAF- Maderables (SAF- Ma) y sistema en monocultivo (Mo) (Figura 3) y fue el principal componente de biomasa, tal como afirman otros autores (Andrade *et al.* 2014; Andrade *et al.* 2013; Segura & Andrade, 2008). De igual forma, se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la biomasa abajo del suelo, entre sistemas de producción, en un rango entre 5,3 y 20,8t/ha (Figura 3).



SAF- Ma Fr: cacao maderables frutales; SAF- Fr: cacao frutales; SAF- Ag: cacao aguacate; SAF-Ci: cacao cítricos; SAF-Ma: cacao maderables; Mo: Monocultivo. Las barras de error corresponden al error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de producción de cacao.

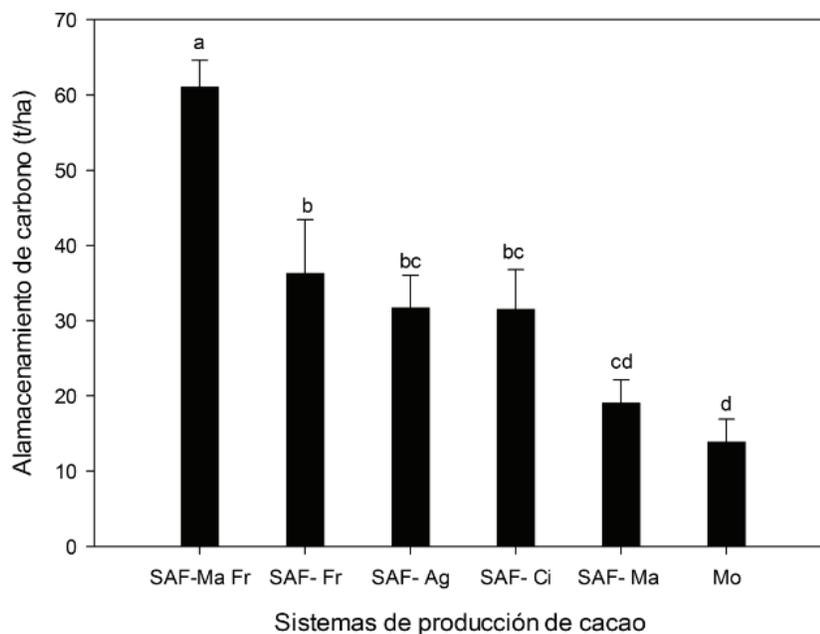
Figura 3. Biomasa arriba y abajo del suelo, en sistemas de producción de cacao más dominantes, de las zonas de Rovira y Falan, Tolima.

Los hallazgos de este estudio guardan relación con la investigación desarrollada por Albrecht & Kandji (2003), en SAF, en zonas bajas húmedas de Sudamérica, entre 39 y 102t C/ha; sin embargo, Corral *et al.* (2006) reportan 121t C/ha, en SAF con cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral Ecuatoriano. Por su parte, Arce *et al.* (2008) encontraron mayor carbono en biomasa arriba del suelo, en SAF con cacao, que en SAF con banano y rastrojos, en fincas indígenas de Talamanca, Costa Rica (36,5 vs 24,0 vs 23,5t C/ha, respectivamente). Andrade *et al.* (2013) estimaron almacenamientos de carbono, de 28,8 y 33,6t C/ha, en cacaotales arbolados del norte del Tolima, Colombia.

Almacenamiento y tasa de fijación de carbono en biomasa en plantaciones de cacao. Se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el almacenamiento de carbono en biomasa total, entre los diferentes tratamientos. El sistema SAF con maderables y frutales (SAF- MaFr) presentó la mayor acumulación de carbono, seguido del SAF con frutales (SAF- Fr), SAF con aguacate (SAF- Ag) y SAF con cítricos (SAF- Ci) (61,0 vs 36,3 vs 31,7 vs 31,5t C/ha, respectivamente). Los SAF con maderables (SAF- Ma) y los cacaotales en monocultivo (Mo) presentaron los menores almacenamientos de carbono, en este componente (19,0 vs 13,8t C/ha, respectivamente) (Figura 4).

El alto almacenamiento de carbono en los SAF con maderables y frutales, se debió a la cantidad de especies forestales asociadas a las plantas de cacao. Estos sistemas presentan maderables, tal como como iguá (*Albizia guachapele*), cedro (*Cedrela odorata*), nogal cafetero (*Cordia alliodora*) y bayo (*Acacia glomerata* Benth) y frutales, como jobo o ciruela (*Spondias mombim*), papayo (*Carica papaya*) y aguacate (*Persea americana*). Estas especies son las más representativas, con edades de entre 15 y 20 años y almacenan gran cantidad de carbono en su biomasa.

Ortiz *et al.* (2008) estimaron valores similares, en SAF con cacao y *Cordia alliodora*, de 25 años de edad, en Changui-nola, Panamá (43 y 62t C/ha). Estos resultados, también son similares a los hallazgos de Andrade *et al.* (2008), en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica: 100 y 50t C/ha, en bosques de galería y SAF con cacao, respectivamente. En la región de San Martín (Perú), Concha *et al.* (2007) reportaron datos superiores a 40 t C/ha, para SAF con cacao, de 12 y 20 años. Estos sistemas incluían especies, como el cedro (*Cedrela odorata*), shaina (*Colubrina glandulosa*) y frutales, como guamo (*Inga sp.*), papaya (*Carica papaya*) y mango (*Mangifera indica*). Estos resultados son similares a los hallazgos del presente estudio en SAF, con frutales de 20 años de edad (61,0t C/ha). Estas estimaciones y la literatura



SAF- Ma Fr: cacao maderables frutales; SAF- Fr: cacao frutales; SAF- Ag: cacao aguacate; SAF-Ci: cacao cítricos; SAF-Ma: cacao maderables; Mo: Monocultivo. Las barras de error corresponden al error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de producción de cacao.

Figura 4. Almacenamiento de carbono en biomasa total, en los sistemas de producción de cacao más dominantes, de Falan y Rovira, Tolima.

científica confirman la importancia de los SAF, como estrategias para mitigar el cambio climático (Segura & Andrade, 2008; 2012; Andrade *et al.* 2014).

La producción de cacao fue estadísticamente similar ($p > 0,05$) en los sistemas de producción, evaluados: entre 308 ± 36 y 592 ± 308 kg/ha/año (Tabla 2). Estos valores resultan bajos respecto a la producción en otras zonas y países, posiblemente, debido a deficiencias en el manejo, tal como el retraso en la recolección de mazorcas maduras, errores en el proceso de injertación de plantas, condiciones climáticas no apropiadas y ataque de enfermedades, como la *Monilia*; por ejemplo, Segura (2005) reporta valores de rendimiento similares en SAF con cacao, en la zona de Talamanca, Costa Rica (500 kg/ha/año), una de las zonas de menor producción en el país.

Se estimó, que los sistemas de producción de cacao fijan carbono atmosférico en biomasa total, a una tasa que varía estadísticamente ($p < 0,05$), entre ellos: 8,3 a 17,7t CO₂/ha/año (Tabla 2). El SAF con cítricos y el SAF con aguacate presentaron la mayor fijación de carbono (17,7 y 16,9t CO₂/

ha/año, lo que corresponde a 64,3 y 46,3 kg CO₂e/kg cacao producido, respectivamente), mientras que los de menor tasa resultaron ser el SAF con frutales, el SAF con maderables y frutales, el SAF con maderables y el monocultivo (13,5; 13,3; 9,4 y 8,3t CO₂e/ha/año, respectivamente). Lapeyre *et al.* (2004) estimaron tasas de fijación de 11,4t CO₂/ha/año, para SAF con cacao, de 15 años de edad, en San Martín, Perú. Andrade *et al.* (2013) valoraron en 1,1t/ha/año, la fijación de carbono, en cacaotales del norte del Tolima, Colombia.

Las máximas tasas de fijación, se mostraron en los primeros 8 años; tal es el caso de los SAF con cítricos, que tiene especies, como *Citrus reticulata* y *C. sinensis* y los SAF con aguacate, con edades entre 4 y 8 años. Resultados similares los reporta Pocomucha & Alegre (2013), donde determinaron que la edad del sistema agroforestal y densidad de árboles forestales son las variables que indican una correlación significativa con el potencial de carbono almacenado. Umaña & Conde (2013), por su parte, reportaron 15,5t CO₂e/ha/año, para el SAF con cacao y aguacate, en Falán, Tolima. Estos hallazgos concuerdan totalmente con los resultados

Tabla 2. Fijación de carbono en biomasa total de SAF, en plantaciones de cacao en Rovira y Falán, Tolima, Colombia.

	SAF-Maderables	SAF Maderables - frutales	SAF-Frutales	SAF-Aguacate	SAF-Cítricos	Monocultivo
	kg/ha/año					
Producción de cacao	316 ± 101,3 a	366 ± 66,6 a	308 ± 36,3 a	591 ± 308,3 a	525 ± 338,1 a	312 ± 62,5 a
Arbustos de cacao	t CO ₂ e/ha/año					
Arriba del suelo	5,55 ± 1,2 ab	2,8 ± 0,5 bc	5,3 ± 0,8 ab	2,1 ± 0,3 c	2,9 ± 0,3 bc	7,6 ± 2,0 a
Abajo del suelo	1,3 ± 0,3 ab	0,75 ± 0,1 bc	1,3 ± 0,2 ab	0,6 ± 0,1 c	0,8 ± 0,1 bc	1,8 ± 0,4 a
Total	6,9 ± 1,4 ab	3,6 ± 0,6 bc	6,6 ± 0,9 ab	2,7 ± 0,4 c	3,7 ± 0,4 bc	9,4 ± 2,4 a
Árboles de sombra	t CO ₂ e/ha/año					
Arriba del suelo	1,3 ± 0,6 c	9,6 ± 1,1 ab	6,5 ± 1,4 b	13,2 ± 1,8 a	12,6 ± 2,9 a	0,0 ± 0,0 c
Abajo del suelo	0,0 ± 0,0 b	0,3 ± 0,0 b	0,3 ± 1,0 b	1,1 ± 0,3 a	1,5 ± 0,4 a	0,0 ± 0,0 b
Total	1,3 ± 0,6 c	9,9 ± 1,1 b	6,8 ± 1,5 b	14,3 ± 1,9 a	14,1 ± 3,1 a	0,0 ± 0,0 c
Total	t CO ₂ e/ha/año					
Arriba del suelo	6,9 ± 1,5 c	12,5 ± 1,1 ab	11,7 ± 1,6 a	15,3 ± 1,6 a	15,4 ± 2,8 a	7,6 ± 2,0 bc
Abajo del suelo	1,4 ± 0,3 bc	1,0 ± 0,1 c	1,7 ± 0,2 abc	1,7 ± 0,2 abc	2,3 ± 0,3 a	1,8 ± 0,4 ab
Total	8,3 ± 1,8 b	13,5 ± 1,2 ab	13,3 ± 1,7 a	16,9 ± 1,8 a	17,7 ± 2,9 a	9,4 ± 2,4 b
Total	kg CO ₂ e/kg					
	31,7 ± 6,84 b	39,3 ± 5,7 ab	46,0 ± 8,7 ab	46,3 ± 13,8 ab	64,3 ± 17,4 a	30,0 ± 7,8 b

SAF: sistemas agroforestales. Los valores corresponden a la media ± error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de producción de cacao.

de esta investigación (Tabla 2) e indican la importancia de la edad y el tipo de asociación en la fijación de carbono, servicio ecosistémico, importante en la actualidad (Andrade *et al.* 2014); por otro lado, Concha *et al.* (2007), para SAF con cacao-guamo, de 5 años y SAF con cacao y frutales, con guamo, mandarina y naranja, en la región de San Martín - Perú (21,3 y 7,3t CO₂/ha/año, respectivamente).

De acuerdo con los resultados anteriores, las plantaciones de cacao en SAF y monocultivo secuestraron carbono atmosférico, en un rango de 8,3 a 17,7t CO₂e/ha/año. El SAF con cítricos y el SAF con aguacate, que tienen árboles de *Citrus reticulata*, *C. sinensis* y *Persea americana*, presentaron la mayor tasa de fijación, con valores de 17,7 y 16,9t CO₂/ha/año, correspondiente a 64,3 y 46,3kg CO₂e/kg cacao, respectivamente. De la misma forma, los SAF con maderables y frutales contuvieron el mayor carbono, con valores de 61,0t C/ha.

El uso de árboles en las plantaciones de cacao favorece la diversificación de la producción, la seguridad alimentaria y la generación de servicios ecosistémicos. Los SAF con cítricos y aguacate aportaron más al almacenamiento de carbono en la biomasa total, destacando que los sistemas, en general, son ambientalmente sostenibles, en términos de mitigación, al cambio climático. Estos sistemas tendrían un potencial importante para involucrarlos en proyectos REDD+.

Es importante incentivar el desarrollo de investigaciones, que permitan identificar la importancia de la fijación de carbono en los SAF con cacao, más dominantes del país y, de esta manera, generar proyecciones futuras y negociaciones, por pago de servicios ambientales. Se recomienda a los productores de cacao, de la zona de Rovira y Falán, el establecimiento de SAF, especialmente, con árboles frutales, en principio, por especies, como el mango (*Mangifera indica*) la Guanabana (*Annona muricata*), el Aguacate (*Persea americana*), la Papaya (*Carica papaya*) y la Mandarina (*Citrus sinensis*), como una estrategia para la captura de carbono, en la cadena de producción de chocolate en Colombia.

Agradecimientos: Los autores agradecen al comité central de investigaciones de la Universidad del Tolima, por la financiación del proyecto de investigación número 1330213, a través de la convocatoria 011-13 de 2013. A los productores cacaoteros de las zonas de Falán y Rovira, quienes facilitaron el ingreso a las plantaciones, para el desarrollo experimental del estudio. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBRECHT, A.; KANDJI, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 99(3):15-27.
2. ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.; SOMARRIBA, E.; VILLALOBOS, M. 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agrofor. Américas*. 46:89-96.
3. ANDRADE, H.J.; FIGUEROA, J.; SILVA, D. 2013. Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima-Colombia). *Scientia Agroalimentaria*. 1:6-10.
4. ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.; CANAL, D.S.; GÓMEZ, M.; MARÍN, M.; SIERRA, E.; GUEPENDE, I.; ALVARADO, J.; FERIA, M. 2013. Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal en el departamento del Tolima. Ibagué. Colombia. Sello editorial Universidad del Tolima. 99p.
5. ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.A.; CANAL, D.S.; FERIA, M.; ALVARADO, J.J.; MARÍN, L.; PACHÓN, D.; GÓMEZ, M. 2014. The carbon footprint of coffee productive chains in Tolima, Colombia. En: Oelbermann, M (ed.). *Sustainable agroecosystems in climate change mitigation*. Ed. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands. p.53-66.
6. ARCE, N.; ORTIZ, E.; VILLALOBOS, M.; CORDERO, S. 2008. Existencias de carbono en charrales y sistemas agroforestales de cacao y banano de fincas indígenas bribri y cabécar de Talamanca, Costa Rica. *Agrofor. Américas*. 46:30-33.
7. BROWN, S.; IVERSON, L.R. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resources Review* 4:366-384.
8. BROWN, S.; LÚGO, A. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Ed. Science. 1293p.
9. CAIRNS, M.A., BROWN, S.; HELMER, E.H.; BAUMGARDNER, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1-11.
10. CIFUENTES, M. 2010. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Turrialba, Costa Rica. Ed. CATIE. 83p.

11. CONCHA, J.; ALEGRE, J.C.; POCOMÚCHA, V. 2007. Determinación de las reservas de Carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*. 6(2):75-82.
12. CORRAL, R.; DUICELA, L.; MAZA, H. 2006. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábigo y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. Ed. Cofenaco (Ecuador). 3p.
13. DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, MG.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2009. InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible desde internet: <http://www.infostat.com.ar> [con acceso el 13/06/2016].
14. LAPEYRE, T.; ALEGRE, J.; AREVALO, L. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*. 3(2):36-44.
15. MONTAGNINI, F.; NAIR, P. 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforest*. 61:281-295.
16. NAIR, P. 1993. An introduction to Agroforestry. Ed 2. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). 499p.
17. NAIR, P.; NAIR, V.D.; KUMAR, B.M.; HAILE, S.G. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ. Sci. Policy*. 10:10-16.
18. ORTIZ, A.; RIASCOS, L.; SOMARRIBA, E. 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y Laurel (*Cordia alliodora*). *Agrofor. Américas*. (46):26-29.
19. PANEL INTERGUBERNAMENTAL EN CAMBIO CLIMÁTICO –IPCC-. 2001. Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Disponible desde internet en: <http://www.ipcc.ch/> [con acceso el 13/06/2016].
20. PANEL INTERGUBERNAMENTAL EN CAMBIO CLIMÁTICO –IPCC-. 2003. Los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Programa intergubernamentales. Guía de Buenas Prácticas para el uso de la tierra, cambio de uso y Silvicultura. Hayama, Kanagawa, Japón. p.113-116.
21. PANEL INTERGUBERNAMENTAL EN CAMBIO CLIMÁTICO –IPCC-. 2006. Guía de las buenas prácticas. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Hayama. p. 51-574 p.
22. PANEL INTERGUBERNAMENTAL EN CAMBIO CLIMÁTICO –IPCC-. 2007. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, SH. 104p.
23. PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL –POT-. 2011. Esquema de ordenamiento territorial municipio de Rovira. Disponible desde Internet en: <http://cdim.esap.edu.co> [con acceso el 06/06/2016].
24. PLAN INTEGRAL ÚNICO DE FALAN –PIU-. 2009. Municipio de Falan plan integral único. Disponible desde Internet en: <http://cdim.esap.edu.co/> [con acceso el 06/06/2016].
25. POCOMÚCHA, V.; ALEGRE, J. 2013. La interacción de carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) en Huanúco, Perú.. *Investigación y Amazonía*. 3(1):36-46.
26. REYES, F.H. 2012. Plan de desarrollo del municipio de Falan, Tolima: Alcaldía de Falan. Disponible desde Internet en: <http://cdim.esap.edu.co> [con acceso el 13/06/2016].
27. SANDKER, M.; CRETE, P.; LEE, D.; SANZ, M. 2015. Consideraciones técnicas para la elaboración de niveles de referencia de emisiones forestales/Niveles de referencia forestales en el marco de la CMNUCC. Ed. ONU-REDD+ (Suiza). 44p.
28. SEGURA, M.A.; ANDRADE, H.J. 2012. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica*) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Costa Rica. Luna Azul*. 35:60-77.
29. SEGURA, M.; ANDRADE, H.J. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agrofor. Américas*. 46:89-96.
30. SEGURA, M.A. 2005. Estimación del carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Informe final de consultoría para Proyecto Captura de Carbono y Desarrollo de Mercados Ambientales en Sistemas Agroforestales Indígenas con Cacao en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p.1-147.

31. UMAÑA, J.; CONDE, A. 2013. Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima. Rev. Ciencia Animal. 6:11-27.

Recibido: Agosto 4 de 2016

Aceptado: Octubre 28 de 2016

Cómo citar:

Marín Q., M. del P.; Andrade, H.J.; Sandoval, A.P. 2016. Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 19(2): 351-360.