

## **CAPTURA DE CARBONO EN BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES EN ARMERO-GUAYABAL, TOLIMA, COLOMBIA**

### **CAPTURE OF CARBON IN BIOMASS IN FORESTRY PLANTATIONS AND AGROFORESTRY SYSTEMS IN ARMERO-GUAYABAL, TOLIMA, COLOMBIA**

**Stefanny Patiño<sup>1</sup>**

**Lanni N. Suárez<sup>2</sup>**

**Hernán J. Andrade<sup>3</sup>**

**Milena A. Segura<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Ingeniera Forestal, Grupo de Investigación PROECUT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia*

<sup>2</sup> *Ingeniera Forestal, Grupo de Investigación PROECUT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia*

<sup>3</sup> *Ph.D. Agroforestería Tropical, Grupo de Investigación PROECUT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia*

<sup>4</sup> *M.Sc. Socio economía Ambiental, Grupo de Investigación PROECUT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia*

<sup>1</sup> [spatinof@ut.edu.co](mailto:spatinof@ut.edu.co)

<sup>2</sup> [lnsuarezs@ut.edu.co](mailto:lnsuarezs@ut.edu.co)

<sup>3</sup> [hjandrade@ut.edu.co](mailto:hjandrade@ut.edu.co)

<sup>4</sup> [masegura@ut.edu.co](mailto:masegura@ut.edu.co)

#### **Resumen**

El cambio climático ha alterado las áreas destinadas para las plantaciones forestales (PF) como para sistemas agroforestales (SAF), los cuales proveen bienes y servicios ecosistémicos, tal como la mitigación del cambio climático al capturar carbono en biomasa. El estudio tuvo como objetivo la estimación de la biomasa total y el almacenamiento y fijación de carbono en PF y SAF. La investigación se realizó en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, ubicado en Armero-Guayabal, Tolima. Se estimó el

almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa aérea (BA) y abajo del suelo (BAS) en siete PF y en SAF. Se midió la altura total y el diámetro a la altura del pecho (dap) de los árboles con dap > 10 cm y el D30 en las plantas de cacao en parcelas temporales de muestreo de diferente tamaño. La BA se estimó empleando modelos alométricos o alternativamente con factores de expansión de biomasa. La BAS se estimó con un modelo general recomendado por el IPCC. Las PF de entre 5 y 25 años almacenaron entre 18,6 y 64,4

Mg C ha<sup>-1</sup>; mientras que los SAF capturaron 85 Mg C ha<sup>-1</sup> (10-15 años). La tasa de fijación de carbono promedio fue de 1,4 y 4,9 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para las PF y los SAF, respectivamente. Los resultados demuestran la importancia de estos sistemas como mitigadores del cambio climático y enfatiza las ventajas de involucrar SAF con leñosas perennes como sumidero de gran cantidad de carbono permitiendo a su vez, la producción agropecuaria.

**Palabras clave:** Almacenamiento; biomasa forestal; modelos alométricos; tasa de fijación.

### Abstract

Climate change has altered the areas for forestry plantations (FP) and agroforestry systems (AFS), which provide goods and ecosystem services, such as mitigation of climate change at capturing carbon in biomass. The objective of this study was the estimation of total biomass and carbon storage and fixation in FP and AFS. This research was carried out in the Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) of the

Universidad del Tolima, located in Armero-Guayabal, Tolima. It was estimated the carbon storage and fixation in aboveground (AB) and belowground biomass (BB) in seven FP and AFS. It was measured the total height and diameter at breast height (dbh) of trees with dbh>10 cm and diameter at 30 cm height (D30) in cacao plants in temporal sampling plots with different size. AB was estimated using allometric models or alternatively with biomass factor expansion. BB was estimated with a general model recommended by IPCC. FP between 5 and 25 years stored between 18.6 and 64.4 Mg C ha<sup>-1</sup>; whereas the AFS captured 85.0 Mg C ha<sup>-1</sup> (10-15 years). The mean carbon fixation rate was 1.4 and 4.9 Mg C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> for FP and AFS, respectively. The results showed the importance of these systems as mitigators of climate change and emphasises the advantages of involving AFS as carbon sinks allowing also the agricultural production.

**Keywords:** Storage; forestry biomass; allometric models; fixation rate.

### Introducción

El cambio climático, ocasionado por el incremento en la concentración de los gases de efecto de invernadero (GEI), comprende relaciones complejas entre procesos climáticos, ambientales, económicos, políticos, institucionales, sociales y tecnológicos (Panel intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2007). Del total de las emisiones de GEI, el CO<sub>2</sub> constituye aproximadamente el 70%, mientras que cerca del 20% corresponde a CH<sub>4</sub> y un 9% son N<sub>2</sub>O (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2014).

Los sistemas de uso de la tierra que incluyen leñosas perennes, tal como bosques, plantaciones forestales y sistemas agroforestales

mitigan el cambio climático al fijar carbono en biomasa, necromasa y suelos (Alvarado, Andrade & Segura, 2013), convirtiéndolos en una de las principales alternativas como sumideros de CO<sub>2</sub> atmosférico. Este servicio ecosistémico depende de la composición de las especies que conformen el sistema de uso del suelo, de la precipitación y temperatura como principales factores climáticos, las características del suelo que determinan el crecimiento del árbol y la edad (López *et al.*, 2016). Brown, Lugo y Chapman (1986) indica que las plantaciones forestales de 6 a 30 años almacenan entre 0,03 y 0,11 Pg C año<sup>-1</sup>, lo cual puede estabilizar las emisiones de CO<sub>2</sub> producto de la deforestación y otros cambios en el uso del suelo.

Como alternativa de mitigación del cambio climático está la implementación de proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) que incluyan plantaciones forestales, las cuales pueden ser una opción de bajo costo (Pardos, 2010). A partir del Protocolo de Kyoto se establecieron compromisos donde el principal objetivo es la reducción de las emisiones de GEI por parte de los países del Anexo I (industrializados) (Alvarado *et al.*, 2013). En estos proyectos se pueden incluir actividades como los sistemas agroforestales, plantaciones protectoras o plantaciones comerciales y los proyectos REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación) que se están desarrollando como alternativas de mitigación, principalmente en áreas de bosques (Chavarro *et al.*, 2007).

La información existente sobre los depósitos y reservas de carbono forestal en Colombia es escasa (Monsalve, 2016). Sin embargo, se ha estimado que el promedio nacional de carbono almacenado en la biomasa aérea de los bosques en Colombia varió entre 79,1 y 168,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, indicando que las reservas de carbono oscilan entre 4,7 y 10,0 Pg<sup>1</sup> C, representando entre 17,1 y 36,6 Pg CO<sub>2</sub>e que no han sido emitidos a la atmósfera (Phillips *et al.*, 2014). Estos valores ofrecen una idea del potencial de oferta de bonos de carbono y productos con sellos diferenciados como el carbono neutro (Segura & Andrade, 2012). Vega (2016) afirma que, con la apertura del mercado doméstico de carbono, como consecuencia de la Ley de Carbono 1819 del 2016, la reforestación traerá consigo impactos favorables al generar ingresos económicos a través de la venta de bonos de carbono, siendo importante el incentivar la reforestación de especies forestales.

El objetivo de este estudio de caso fue estimar la biomasa total, almacenamiento y fijación de carbono atmosférico en biomasa arriba y abajo del suelo en plantaciones forestales y sistemas agroforestales de cacao con árboles maderables en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, el cual se encuentra ubicado en la zona de vida bosque seco tropical (Bs-T) (Holdrige, 1996), en la vertiente norte del río Magdalena a unos 85 km de la vía que comunica Ibagué a Armero-Guayabal. El centro cuenta con un área aproximadamente 700 ha, divididas así: 10 ha del área administrativa, 80 ha destinadas a la agricultura, 119 ha de uso pecuario, 60 ha de uso forestal y aproximadamente 431 ha de áreas de proyectos de reforestación (Universidad del Tolima, 2015). La zona cuenta con una temperatura media anual de 27°C, una precipitación promedio de 1738 mm anuales y una altitud entre 250-275 m (Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2011) y se caracteriza por presentar suelos de textura franco-arenosa, con pH moderadamente ácidos, con una materia orgánica de entre 0,5 y 1,1% y facilidad para el óptimo desarrollo de la vegetación (Torres, Esquivel y Tinoco, 2017).

### Almacenamiento y fijación de carbono en biomasa total

Se estimó la fijación de carbono en biomasa total (arriba y abajo del suelo) en dos de los principales usos del suelo del CURDN: plantaciones de teca (*Tectona grandis*), nogal cafetero

<sup>1</sup> 1 Pg (Petagramo) = 10<sup>15</sup> g = 1 Gt (Gigatonelada).

(*Cordia alliodora*), melina (*Gmelina arborea*), caucho (*Hevea brasiliensis*), guadua (*Guadua angustifolia*), mango (*Mangifera indica*) e iguá (*Pseudosamanea guachapele*) y sistemas agroforestales (SAF) de cacao con árboles maderables de sombrío, tal como *Cupania cinerea* Poepp, *Guarea guidonia* y *Guazuma ulmifolia* (Tabla 1). A cada sistema se le estimó el almacenamiento de carbono en biomasa total y se indagó por su edad, para estimar la tasa de fijación de carbono promedio como el cociente de estas dos variables.

### Fase de campo

Se establecieron 11 parcelas temporales de muestreo (PTM) distribuidas en los dos sistemas de uso del suelo evaluados. El tamaño de las PTM se definió siguiendo la metodología propuesta de MacDicken (1997), dependiendo

de la densidad arbórea (Tabla 1). En el caso de los SAF, se realizó un esquema de PTM anidadas: dos parcelas principales de 600 y 800 m<sup>2</sup> para medir los árboles, y se estableció una sub-parcela de 100 y 225 m<sup>2</sup>, respectivamente, ubicada en la esquina nor-occidental de cada parcela principal para medir el cultivo leñoso perenne. El número de PTM establecidas por sistema dependió del área total y del tamaño de la PTM respectivo, de modo que la intensidad de muestreo fuese similar en los dos sistemas. En este caso, en todos los sistemas se estableció solo una PTM a excepción de las PF de *G. arborea* y SAF en donde se establecieron tres y dos PTM, respectivamente (Tabla 1). Se midió el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap) de todos los árboles con dap > 10 cm y el diámetro a 30 cm de altura (D<sub>30</sub>) en el caso de cacao y la altura total (ht).

**Tabla 1.** Datos generales de las parcelas establecidas en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero, Guayabal-Tolima.

Uso de suelo	Especies	Número de lotes	Número de PTM	Tamaño de PTM (m <sup>2</sup> )	Área Sistema (m <sup>2</sup> )	IM (%)	Densidad (Individuos ha <sup>-1</sup> )
PF	<i>G. angustifolia</i>	1	1	300	20000	1,5	1000
	<i>M. indica</i>	1	1	2500	2500	100	132
	<i>G. arborea</i> *	3	3	3000/144/1029	43000	9,7	1111/205
	<i>T. grandis</i> *	2	1	1029	21000	4,9	1111/205
	<i>P. guachapele</i>	1	1	600	40000	1,5	267
	<i>C. alliodora</i>	1	1	400	20000	2,0	500
	<i>H. brasiliensis</i>	1	1	144	1250	11,5	1597
SAF	Árboles maderables			600			117
	<i>T. cacao</i>	1		100	1250	48,0	1200
	Árboles maderables			800			175
	<i>T. cacao</i>	1		225	1250	64,0	622

PF: plantaciones forestales; SAF: sistemas agroforestales; PTM: parcela temporal de muestreo; IM: intensidad de muestreo; \*Presenta manejo silvícola.

Una vez colectada la información de las variables dasométricas, se estimó la biomasa

arriba del suelo de las plantas individuales empleando modelos alométricos reportados

en la literatura (Tabla 2). Estos modelos se seleccionaron por especie, género, familia y en casos aislados por zona de vida. En caso de no reportarse modelos para alguna especie, se estimó el volumen del fuste y la biomasa empleando el factor de expansión de biomasa (FEB) (Segura & Kanninen, 2002) y la gravedad específica, la cual fue tomada de lo reportado por Arévalo y Londoño (2006) para especies comercializadas en el Tolima y la base de datos de *Global Wood Density* por Zanne *et al.*, (2009). En el caso de no reportarse la densidad de madera para una especie en particular, se empleó un promedio de las densidades

existentes en el área de estudio.

Posteriormente, se estimó la biomasa abajo del suelo usando la ecuación de Cairns *et al.*, (1997) y recomendada por el IPCC (2003), la cual se puede aplicar a bosques tropicales (Ecuación 1).

$$Br = e^{(-1.0587+0.8836 \cdot \ln)} \text{ (Ecuación 1)}$$

Dónde:

- Br: Biomasa de raíces (Mg ha<sup>-1</sup>)
- Ba: Biomasa aérea total (Mg ha<sup>-1</sup>).

**Tabla 2.** Modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa arriba del suelo de árboles individuales en el CURDN, Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Especies	Rango de dap (cm)	Modelo	R <sup>2</sup> Aj.	Fuente
<b>Sistemas agroforestales</b>				
<i>Theobroma cacao</i>	10,7-32,0	$B = 10^{(-1,625+2,63 \cdot \text{Log}(D_{30}))}$	0,98	Andrade, Segura, Somarriba y Villalobos (2008)
Especies varias	10,6-44,0	$\ln(B) = -2,217 + 2,081 \cdot \ln(\text{dap}) + 0,587 \cdot \ln(H) + 1,092 \cdot \ln(q)$	0,95*	Álvarez <i>et al.</i> , (2012)
<b>Plantaciones forestales</b>				
<i>Gmelina arborea</i>	8,9-35,4	$\text{Log}B = -1,988 + 2,993 \cdot \text{Log}(\text{dap})$	0,97	Rodríguez (2013)
<i>Tectona grandis</i>	10,5-23,4	$\text{Log}B = -0,82 + 2,38 \cdot \text{Log}(\text{dap})$	0,98	Pérez y Kanninen (2003)
<i>Hevea Brasiliensis</i>	9,8-21,3	$\text{Log}B = 56,74 - 13,14(\text{dap}) + 0,96(\text{dap})^2$	0,97	Hernández (2014)
<i>Cordia alliodora</i>	10,6-33,1	$\text{Log}B = -0,755 + 2,072 \cdot \text{Log}(\text{dap})$	0,95	Segura, Kanninen y Suárez (2006)
<i>Mangifera indica</i>	30,2-37,2	$\ln(B) = -2,217 + 2,081 \cdot \ln(\text{dap}) + 0,587 \cdot \ln(H) + 1,092 \cdot \ln(q)$	0,95	Álvarez <i>et al.</i> , (2012)
<i>Guadua angustifolia</i>	10-115,9	$B = 2,2311 \cdot \text{dap}^{1,059}$	0,95	Rojas, Li, Lora y Andersen (2013)
<i>Pseudosamenea guachapele</i>	12,1-37,4	$\ln(B) = -2,217 + 2,081 \cdot \ln(\text{dap}) + 0,587 \cdot \ln(H) + 1,092 \cdot \ln(q)$	0,95	Álvarez <i>et al.</i> , (2012)

B: biomasa aérea total (kg árbol<sup>-1</sup>); dap: diámetro a la altura del pecho (cm); Ht: altura total (m); \*: coeficiente de determinación; D<sub>30</sub>: diámetro del tronco a 30 cm de altura; q: densidad de la madera (g cm<sup>-3</sup>); R<sup>2</sup> Aj.: coeficiente de determinación ajustado.

El carbono se estimó al multiplicar la biomasa total por la fracción de carbono de 0,5 valor estándar recomendado por el IPCC (2003). La tasa de fijación de carbono promedio se calculó dividiendo el almacenamiento de carbono en biomasa total entre la edad del componente leñoso. A su vez, el carbono se transformó en CO<sub>2</sub>e al multiplicarse por el factor estequiométrico de 3,67 (IPCC, 2003).

## Resultados y discusión

### Biomasa arriba y abajo del suelo

La plantación de *H. brasiliensis* de 12 años almacenó 107,6 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa arriba del suelo (BA); mientras que las de *G. arborea* tuvieron en promedio 69 (±18,3) Mg ha<sup>-1</sup> a sus 5 años de edad. Los SAF que incluyen especies maderables con 143,2 (±39,7) Mg ha<sup>-1</sup> (Tabla 3) (Figura 1). En ambos casos, la biomasa abajo del suelo (BAS) correspondió al 17% del total.

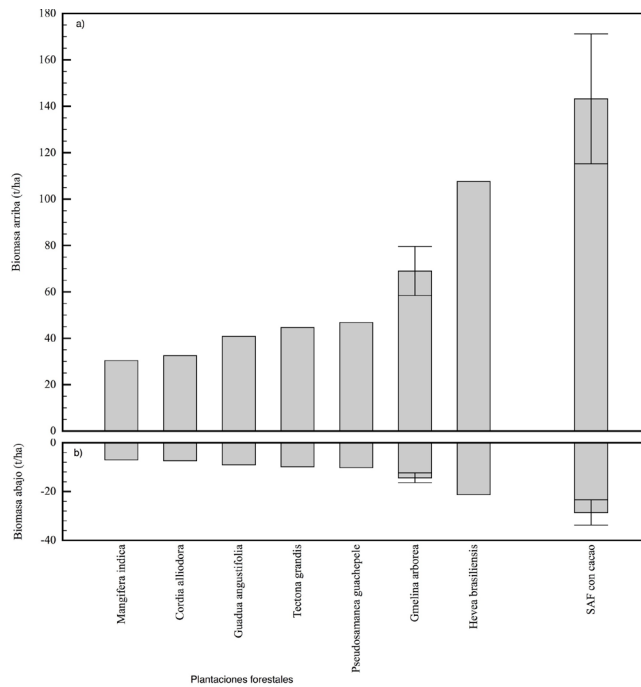
**Tabla 3.** Biomasa total en plantaciones forestales y sistemas agroforestales, del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia.

Uso de suelo	Edad (años)	Individuos medidos	DAP (cm)	HT (m)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	BT (Mg ha <sup>-1</sup> )	
PF	<i>M. indica</i>	25	30	10-115,9	7 - 25,1	78,3	37,4
	<i>G. angustifolia</i>	25	33	11,7-135,9	13,2 - 39	19,5	49,9
	<i>G. arborea</i>	5	332	8,9-35,4	9,2 - 24,3	75,2	83,3
	<i>T. grandis</i>	5	42	9,9-23,2	6,8 - 10,7	7,8	54,4
	<i>P. guachapele</i>	20	16	12,1-37,4	2,9-14,8	11,6	57
	<i>C. alliodora</i>	17	20	10,6-33,1	13,2 - 26	11,2	40
	<i>H. brasiliensis</i>	12	23	9,8-21,2	14,3-18,1	22,5	128,8
SAF	<i>T. cacao</i>	10	7	11,2-32	3,1 - 11,5	46,6	138,7
	Árboles maderables	35	12	10,8-15,5	10,68 - 34,5	1,75	
	<i>T. cacao</i>	15	14	10,7-24,5	1,4 - 7	14	205,1
	Árboles maderables	35	14	10-126,05	3,3 - 22,4	27,6	

Dap: diámetro a la altura del pecho; HT: altura total; G: área basal; BT: biomasa total; PF: plantaciones forestales; SAF: sistemas agroforestales.

López *et al.*, 2016 reportan entre 53,8 y 527,8 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa aérea total para plantaciones de *H. brasiliensis* a diferentes edades, observando diferencias en el almacenamiento de carbono, dependiendo su ciclo de crecimiento y desarrollo en diámetro y altura. Marín, Andrade y Sandoval (2016) encontraron una biomasa total de 122 y 72,5 Mg ha<sup>-1</sup> para SAF que incluyen especies maderables con frutales y SAF con solo frutales, respectivamente, en el departamento del Tolima.

Esto demuestra la capacidad de almacenamiento de carbono que tiene este sistema que relaciona cultivos con leñosas siendo una opción ecológica para mitigar el cambio climático (Segura y Andrade 2008). En los dos sistemas se observa que el principal componente de almacenamiento de carbono es la biomasa aérea tal como lo afirman algunos autores (Andrade *et al.* 2014a).

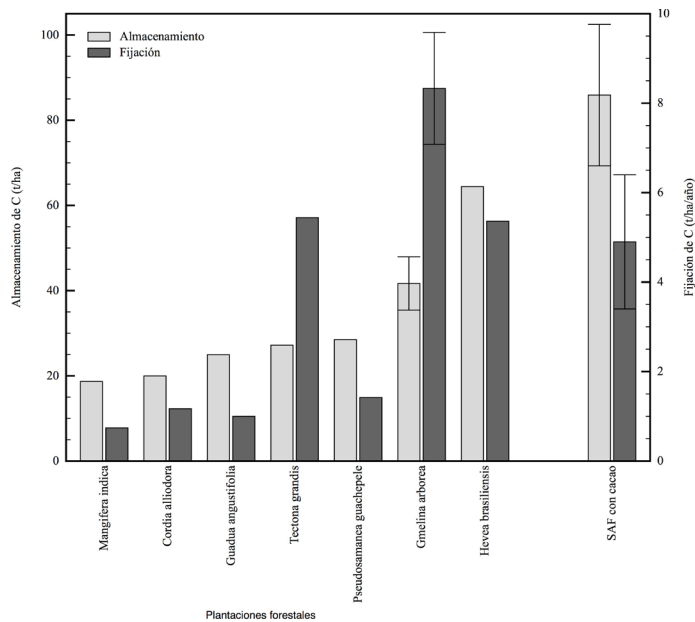


**Figura 1.** Biomasa arriba y abajo del suelo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales, del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero – Guayabal, Tolima, Colombia. Los valores negativos representan la biomasa abajo del suelo. Las barras de error corresponden al error estándar de la media.

**Almacenamiento y fijación de carbono en biomasa total**

Se encontraron diferencias en el almacenamiento de carbono en la biomasa total entre

las plantaciones forestales y el SAF. El promedio de C almacenado para las plantaciones forestales fue de 26,3 Mg C ha<sup>-1</sup> (Figura 2).



**Figura 2.** Almacenamiento plantaciones forestales y sistemas agroforestales del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero – Guayabal, Tolima, Colombia. Las barras de error corresponden al error estándar de la media.

Maggiotto *et al.* (2014) reportan valores entre 66,8 y 79,3 Mg C ha<sup>-1</sup> para plantaciones de *H. brasiliensis* a sus 4 y 15 años respectivamente, en el estado de Paraná en Brasil; Orjuela, Andrade y Vargas *et al.* (2014) estimaron 57,16 Mg C ha<sup>-1</sup> en monocultivos de esta especie a una edad entre los 8-20 años, en la Amazonía colombiana, demostrando el impacto de la edad y zona de vida en este servicio ecosistémico.

La plantación de *T. grandis*, en este estudio, almacenó 27,2 Mg C ha<sup>-1</sup> a los cinco años de edad, datos comparables a lo reportado por Jiménez y Landeta (2009) para procedencias de ocho años en el Campus Prosperina - ESPOL con 33,1 Mg C ha<sup>-1</sup>. Bohre *et al.*, (2013) reportan valores inferiores a los 2 años en Nigahi y superiores a los 8 años en Dudhichua (6,5 y 44,4 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Loaiza *et al.* (2010) encontraron valores superiores (85,7 Mg C ha<sup>-1</sup>) en el almacenamiento de carbono en bosques tropicales; mientras que Sreejesh *et al.*, (2013) reportan en Nilambur, Kerala valores superiores de 52,2 Mg C ha<sup>-1</sup> a los 5 años de edad e inferiores de 21,3 Mg C ha<sup>-1</sup> a los 10 años de edad. En este caso, se observan diferencias en almacenamiento de carbono debido al manejo silvicultural de la especie y edad de corta.

La plantación de *G. arborea* almacenó 41,6 (±10,8) Mg C ha<sup>-1</sup>, Vega (2016), estimó almacenamiento de carbono en plantaciones de *G. arborea* a un año y tres meses de edad (12,9 Mg C ha<sup>-1</sup>) en Costa Rica; mientras que Bohre, Chaubey & Singhal *et al.* (2013) estimaron en 22,9 Mg C ha<sup>-1</sup> el carbono a los seis años y 145,4 Mg C ha<sup>-1</sup> a los nueve años para esta misma especie en Singrouli, Madhya Pradesh.

La plantación de *G. angustifolia* almacenó, a sus 25 años, 22,5 Mg C ha<sup>-1</sup>, lo cual resulta muy inferior a los hallazgos de Fonseca y Rojas (2016) en plantaciones de 21 años de edad en

Costa Rica; y a los de Cruz (2015) en México (117,7 y 149,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Estos resultados y los encontrados en la literatura científica demuestran el potencial de mitigación del cambio climático de esta especie, confirmando que su capacidad de secuestro se puede comparar con el de especies leñosas usadas en reforestación (Fonseca y Rojas, 2016).

La plantación de *C. alliodora* almacenó 19,9 Mg C ha<sup>-1</sup> a los 17 años de edad, lo cual es mayor a lo reportado por Hummer (2000) quien reportó 3,9 Mg C ha<sup>-1</sup> en monocultivos de plantaciones jóvenes en el norte de Costa Rica, esto evidencia que para esta especie la mayor tasa de fijación de carbono se da en su etapa de madurez. Por su parte, Marín *et al.* (2016) estimaron almacenamiento de 19,0 Mg C ha<sup>-1</sup> en SAF con cacao y *C. alliodora* en el departamento del Tolima.

Los SAF almacenaron en promedio 85,9 (±23,5) Mg C ha<sup>-1</sup>, estos resultados son superiores comparado a lo encontrado por Andrade *et al.* (2013) quienes estimaron el *stock* de carbono de 28,8 y 33,6 Mg C ha<sup>-1</sup> a edades de 18 y 35 años, respectivamente para la misma zona de estudio. En contraste, Marín *et al.* (2016) estimaron valores menores para SAF con maderables (19 Mg C ha<sup>-1</sup>), pero superiores en SAF con maderables y frutales y SAF con frutales (61,0 y 36,3 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Estos autores afirman que el alto almacenamiento de carbono en los SAF con maderables y frutales se debe a la abundancia de especies forestales asociadas con las plantas de cacao. Mientras que Takimoto, Nair & Nair *et al.* 2008, reportan existencias totales de C de 28,7 a 87,7 Mg C ha<sup>-1</sup>, África Occidental, recalando que el C del suelo es un componente sustancial del *stock* total y sugieren la importancia de considerar este componente.

Las PF alcanzaron una tasa de fijación de carbono promedio de 1,3 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>,



influenciado principalmente por las plantaciones jóvenes ( $8,3 \pm 2,2$  y  $5,4$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en *G. arborea* y *T. grandis*, respectivamente) (Tabla 3). Estas plantaciones tienen la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> en pleno crecimiento para

así reducir su concentración en la atmósfera; al otro extremo, con menor fijación, están las plantaciones de *P. guachapele*, *C. alliodora*, *G. angustifolia* y *M. indica* (1,4; 1,2; 1,0 y 0,7 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente) (Tabla 3).

**Tabla 3.** Fijación de carbono de plantaciones forestales y sistemas agroforestales, del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), Armero – Guayabal, Tolima, Colombia.

Uso de suelo	Tasa fijación	
	Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Mg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
<b>Plantaciones forestales</b>		
<i>G. angustifolia</i>	1,0	3,6
<i>M. indica</i>	0,7	2,7
<i>G. arborea</i>	8,3	30,6
<i>T. grandis</i>	5,4	20,0
<i>P. guachapele</i>	1,4	5,2
<i>C. alliodora</i>	1,2	4,3
<i>H. brasiliensis</i>	5,4	19,7
<b>Sistemas agroforestales</b>		
Cacao con árboles maderables (10 años)		
Árboles maderables	0,2	0,6
<i>T. cacao</i>	6,4	23,3
Total	6,5	23,9
Cacao con árboles maderables (15 años)		
Árboles maderables	2,5	9,1
<i>T. cacao</i>	1,1	3,9
<b>total</b>	<b>3,5</b>	<b>13,0</b>

Las plantaciones de *T. grandis* fijaron  $5,4$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a una edad de cinco años, hallazgos que difieren levemente de lo reportado por Cubero y Rojas (1999), quienes encontraron valores entre  $1,6$  y  $3,6$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a una edad de cinco años en Hojanca, zona seca de Costa Rica; en contraste, Kaul, Mohren y Dadhwal *et al.* (2010), reportan valores inferiores de tasa anual de carbono ( $2,0$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en bosques de teca en India. Las plantaciones de *G. arborea* fijaron en promedio  $8,3$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a una edad de

cinco años (Figura 2), tasa superior a los hallazgos de Cubero y Rojas 1999 a los cuatro años en Hojanca, zona del Pacífico seco de Costa Rica (entre  $1,0$  y  $3,3$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Bohre *et al.*, 2013 reportan una menor fijación a los seis años y una mayor a los nueve años Madhya Pradesh, India ( $3,8$  y  $16,2$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente). Estos contrastes pueden ser causados por las diferencias de calidad de sitio, edad y manejos silvícolas, pero afirmando que las plantaciones con especies de rápido crecimiento son una fuerte

opción para almacenar carbono y compensar las emisiones de GEI (Vega, 2016).

La plantación de *G. angustifolia* alcanzó una tasa de fijación de 1,0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a los 25 años de edad; sin embargo, este valor es muy inferior a reportes de Camargo, Rodríguez y Arango *et al.* (2010) (20,9 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a los siete años. Diferencias que podrían ser explicadas principalmente por el espaciamiento de la plantación. Estos mismos autores afirman que la capacidad de fijación para esta especie depende de la edad de la plantación, crecimiento y madurez de sus culmos (Camargo *et al.*, 2010). Por otro lado, Ceballos y Ocaña (2014) reportan una fijación máxima de 18,6 Mg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para árboles de sombra (maderables y frutales) en las fincas cafeteras de la Unión, Nariño (Colombia), lo que supera a las estimaciones en este estudio para la plantación frutal (*M. indica*) (2,7 Mg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

Los SAF alcanzaron tasas promedio de fijación de carbono de 5,0 (±2,1) Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 2), valor importante considerando que también es posible obtener otros productos y servicios de estos sistemas de producción (Andrade *et al.* 2014b). Estos hallazgos son similares a los estimados por Andrade *et al.*, (2014b) de 4,4 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Los hallazgos también resultan congruentes con los resultados de Poveda *et al.*, (2013) para SAF con cacao de Waslala, Nicaragua (5,4 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>); mientras que Somarriba *et al.*, 2013 reportan tasas de acumulación de carbono en biomasa aérea para estos sistemas de entre 1,3 y 2,6 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en América Central.

Marín *et al.* (2016) encontraron 9,4 Mg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para SAF – maderables en el Tolima, valores superiores se encontraron en el CURDN (24,0 y 13,0 Mg CO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Estos

resultados afirman que los SAF pueden ser manejados siendo una importante estrategia para la mitigación del cambio climático mediante la conservación, secuestro, almacenamiento y sustitución de carbono (Andrade *et al.*, 2014a; Agudelo, 2016).

### Conclusiones

Las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales capturan grandes cantidades de C atmosférico: 18,6 a 64,4 y 85,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos valores muestran su importancia en la mitigación del cambio climático. La plantación de *H. brasiliensis* es la de mayor almacenamiento seguida de la *G. arborea* y *T. grandis*. La biomasa abajo del suelo captura el 17% del carbono almacenado en la biomasa total. La importancia de estos sistemas de uso del suelo radica en que además de mitigar el cambio climático generan productos u otros servicios que apoyan el bienestar de los productores y sus familias.

La tasa de fijación de carbono promedio fue de 1,4 y 4,9 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, para las nueve plantaciones y los SAF, respectivamente, los resultados demuestran la importancia de estos sistemas como mitigadores del cambio climático.

### Agradecimientos

A la Universidad del Tolima y al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto de investigación, a través de la convocatoria (390220516).

Al Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), por permitir realizar el trabajo de campo en las instalaciones, a Luis Ferney Peñuela coordinador Pecuario e Iber González coordinador agrícola, por toda la colaboración. Por último, al señor Ervey Basto Morales por ser nuestro guía y acompañante en los recorridos en la granja.

## Literatura citada

- Agudelo, M.D. (2016). *Crecimiento y productividad de Sistemas Agroforestales (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T) del departamento de Antioquia*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/55458/1/43725027.2016.pdf>
- Alvarado, J., Andrade, H., Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16 (1), 21-31.
- Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297-308. doi: 10.1016/j.foreco.2011.12.013.
- Andrade, H.J.; Segura, M.A.; Canal, D.S.; Feria, M.; Alvarado, J.J.; Marín, L.; Pachón, D.; Gómez, M. (2014a). 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. 53-66.
- Andrade, H.J.; Marín, L.M. y Pachón, D.P. (2014b). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26(2), 127-132.
- Andrade, H., Figueroa, J.M. & Silva, D. (2013). Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria*, 1, 6-10.
- Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E., Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras en fincas indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*, (46), 45-50. Recuperado de [http://www.worldcocoa-foundation.org/wp-content/uploads/files\\_mf/andrade2008.pdf](http://www.worldcocoa-foundation.org/wp-content/uploads/files_mf/andrade2008.pdf).
- Arévalo, R.L & Londoño, A. (2006). *Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima*. Recuperado de [http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac\\_Forestal/Documentos/LIBROS/Libro\\_maderas.pdf](http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/Libro_maderas.pdf).
- Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D.C. (2014). *Fundamentos del cambio climático*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/248552756/Fundamentos-del-Cambio-Climatico-pdf#scribd>.
- Bohre, P., Chaubey, O.P & Singhal P.K. (2013). Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 5(3), 153-174.
- Brown, S., Lugo, A., Chapman, J. (1986). Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(2): 390-394.
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E., Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111 (1), 1-11.
- Camargo, J.C., Rodríguez, J.A., Arango, A.M. (2010). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 61, 86-94. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5987/13.Camargo.pdf>
- Ceballos, E., Ocaña, S. (2014). *Estrategias de mitigación frente al cambio climático en fincas cafeteras de la Unión, Nariño*. (Tesis de pregrado). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño.
- Chavarro, M., Corradi C., García, A., Lara, W., Perugini, L. y Ulloa, A. (2007). Sembrando bosques opciones frente al cambio climático. Recuperado de [https://www.unodc.org/documents/colombia/2013/Agosto/DA2013/2.\\_MDL-FORESTAL.2008.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2013/Agosto/DA2013/2._MDL-FORESTAL.2008.pdf).
- Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2011. *Agenda Ambiental del municipio de Armero, Guayabal*. Recuperado de [https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro\\_documentos/estudios/agendas/2010\\_Agenda\\_Ambiental\\_del\\_Municipio\\_de\\_Armero\\_Guayabal.pdf](https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/agendas/2010_Agenda_Ambiental_del_Municipio_de_Armero_Guayabal.pdf).
- Cruz, H. (2015). (Septiembre, 2015). *Biomass generation and Carbon fixation in Guadua Bamboo: Guadua angustifolia* Kunth. Trabajo presentado en 10th World Bamboo Congress, Korea 2015.

- Cubero, J., y Rojas, S. (1999). *Fijación de carbono en plantaciones de melina (Gmelina arborea Roxb.), teca (Tectona grandis L.f.) y pochote (Bombacopsis quinata Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.* (Tesis de pregrado). Facultad de ciencias de la tierra y el mar, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Flewelling, J.W., & Jong, R. (1994). Considerations in simultaneous curve fitting for repeated height-diameter measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 24 (7), 1408-1414.
- Fonseca, W. y Rojas, M. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, 20 (38), 85-98. doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-38.apbc.
- Hernández, C. (2014). Modelos alométricos para estimar la biomasa arriba y abajo del suelo de caucho (*Hevea brasiliensis*) y Copoazu (*Theobroma grandiflorum*) en el departamento de Caquetá, Colombia. (Disertación de Maestría). Facultad de Ciencias Agropecuarias: Universidad de la Amazonía, Caquetá, Colombia.
- Hummer, S. (2000). Understory development in Young *Cordia alliodora* plantation. *New forest*, 19, 159-170.
- Jiménez, E. y Landeta, A. (2015). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) *Campus Prosperina – ESPOL*.
- Kauhl, M., Mohren, G.M.J. & Dadhwal, V.K. (2010). *Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India.* Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-010-9230-5>
- Loaiza, J.C., Rodríguez, J.A., Ramírez, C.V. & Lema A.J. (2010). Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 260 (10), 1906-1913. doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.040.
- MacDicken, K. (1997). *A guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects.* Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development. 43 p.
- Maggiotto, S.R, Oliveira, D., Marur, C.J., Soares, S.M., Leclerc, M. & Wagner, C. (2014). Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 36 (2), 10.4025/actasciagron.v36i2.17404.
- Marín, M.P., Andrade, H.J. y Sandoval, A.P. (2016). Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 19 (2), 351-360.
- Monsalve, M. (2016). Así se mide el carbono de nuestros bosques. *El Espectador*. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/asi-se-mide-el-carbono-de-nuestros-bosques-articulo-614516>.
- Orjuela, J.A., Andrade, H.J. & Vargas, Y. (2014). Potential of carbón storage of rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. ARG.) plantations in monoculture and agroforestry systems in the Colombian Amazon. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, (17), 231-240.
- Panel Intergubernamental en Cambio Climático [IPCC]. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.* National Greenhouse Gas Inventories Programme. Recuperado de [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf\\_files/GPG\\_LULUCF\\_FULL.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf).
- Panel Intergubernamental en Cambio Climático [IPCC]. (2007). *Climate Change: The Physical Science Basis.* Recuperado de: <http://bit.ly/1d7QaiO>.
- Pérez, L., & Kanninen, M. (2003). Antecedentes de Biomasa Aérea en Plantaciones de *Tectona grandis* en Costa Rica. *Revista de Ciencias Forestales del Trópico*. 15 (1), 199-213. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/23616336>.
- Pardos, J.A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global.* Recuperado de [http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/60587OT\\_LIBRO\\_WEB\\_1277883079734.pdf](http://www.inia.es/GCONTREC/PUB/60587OT_LIBRO_WEB_1277883079734.pdf)
- Phillips, J.F., Duque, A.J., Scott, C., Peña, M.A., Franco, C.A., Galindo, G., Cabrera, E., Álvarez, E. & Cárdenas, D. (2014). Aportes técnicos del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono a la propuesta de preparación de Colombia para REDD+: datos de actividad y factores de emisión. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales, (IDEAM), Bogotá D.C., Colombia. 70 pp.

- Poveda V., Orozco L., Medina, C., Cerda, R. y López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, (49), 42-50. Recuperado de [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5760/Almacenamiento\\_de\\_carbono\\_en\\_sistemas\\_agroforestales.pdf](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5760/Almacenamiento_de_carbono_en_sistemas_agroforestales.pdf)<http://hdl.handle.net/11554/5760?sequence=1>.
- Rodríguez, N. (2013). *Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación*. Recuperado de <https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=42210&download=Y>.
- Rojas, R., Li, T., Lora, G. & Anderesen, L. (2013). A measurement of the carbon sequestration potential of *Guadua angustifolia* in the Carrasco National Park, Bolivia. *Inesad*, 1-15.
- Segura, M.A y 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.
- Segura, M. y Andrade, H.J (2008a). ¿Cómo estimar rápidamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales indígenas de Talamanca, Costa Rica? *Agroforestería en las Américas*, 46, 97-103.
- Segura, M., Kanninen, M. & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, (68), 143-150.
- Segura, M. & Kanninen, M. (2002). Chap: Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. En: Orozco, L; Brumer, C. (Eds.). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Turrialba Costa Rica, CATIE. p. 202-216. (Serie Técnica. Manual Técnico No. 50).
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T. ...Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46-57. doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013.
- Sreejesh, K.K., Thomas, T.P., Ragmini, P., Prasanth, K.M & Kripa, P.K (2013). Carbon Sequestration Potential of Teak (*Tectona grandis*) Plantations in Kerala. *Research Journal of Recent Sciences*, 2, 167-170. Recuperado de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32133200/30.ISCA-ISC-2012-8EVS-32.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1520310105&Signature=IG%2Fhrq%2Bjyq64f97ZudY9cfQkKeM%3D&response-content-disposition=inlin e%3B%20filename%3DCarbon\\_Sequestration\\_Potential\\_of\\_Teak\\_T.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32133200/30.ISCA-ISC-2012-8EVS-32.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1520310105&Signature=IG%2Fhrq%2Bjyq64f97ZudY9cfQkKeM%3D&response-content-disposition=inlin e%3B%20filename%3DCarbon_Sequestration_Potential_of_Teak_T.pdf)
- Takimoto, A., Nair, P.K.M. & Nair. V.D. (2008). Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125 (1-4), 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.010>.
- Torres, A.J., Esquivel, H.E y Tinoco, F. (2017). Composición física y química de los suelos fluviovolcánicos de Armero Tolima, Colombia. *Revista de la Académica colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41 (158), 119-126. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.447>.
- Vega, Y. (2016). *Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una plantación de Gmelina arborea Roxb. Los Chiles, Alajuela, Costa Rica*. (Tesis de pregrado, Instituto tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal). Recuperado de [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7044/Analisis\\_mensual\\_acumulacion\\_biomasa\\_fijacion\\_carbono\\_plantacion\\_gmelina\\_arborea\\_roxb.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7044/Analisis_mensual_acumulacion_biomasa_fijacion_carbono_plantacion_gmelina_arborea_roxb.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Zanne, A.E, Lopez, G, Coomes, D.A...Chave, J. (2009). Global Wood density database. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

