

Avances de Investigación

Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica

Rolando Cerda Bustillos¹, Tania Espin Chion², Miguel Cifuentes³

RESUMEN

Se determinó el carbono almacenado en sistemas agroforestales orgánicos de cacao (*Theobroma cacao*) manejados por familias indígenas de la etnia bribri en Talamanca, Costa Rica. Se midió el carbono en todos los compartimentos: suelo, hojarasca, raíces, necromasas y biomasa aérea, mediante metodologías aceptadas por el IPCC. También se calcularon las tasas de acumulación de carbono y su valor monetario. Se analizaron las correlaciones de variables de sitio (topografía y suelos) y composición del dosel (riqueza, abundancia, áreas basales y biomasas) con los contenidos de carbono y se hicieron análisis de conglomerados con las mismas variables para indagar qué grupos de SAF y con qué características almacenan más carbono. Los SAF-cacao de Talamanca registraron un promedio de carbono total de 122 ± 24 t C ha⁻¹, considerado como un nivel de intermedio a alto. El 43% del carbono se almacenó en la biomasa aérea y el 41% en suelo. La tasa de acumulación de carbono en biomasa aérea fue $3,0 \pm 1,9$ t C ha⁻¹ año⁻¹, con un valor monetario de 54 US\$ ha⁻¹ año⁻¹. La capacidad de almacenar carbono está especialmente correlacionada con el área basal de los árboles maderables y frutales, esto se evidenció con los análisis de correlación y los conglomerados formados, pues los grupos de SAF-cacao con mayores áreas basales fueron los que más carbono total y en biomasa aérea registraron. Estos datos pueden ser de utilidad para gobiernos locales o nacionales y organizaciones de productores en su afán de proponer estrategias de adaptación/mitigación del cambio climático, acceder a pagos por servicios ambientales y mejorar los precios de sus productos agroforestales.

Palabras clave: biomasa, suelo, tasas de carbono, diversidad, agroforestería.

ABSTRACT

Carbon in cocoa agroforestry systems of the Bribri Indigenous Reserve of Talamanca, Costa Rica

We determined the carbon stored in cocoa (*Theobroma cacao*) organic agroforestry systems managed by indigenous families of the Bribri ethnic group in Talamanca, Costa Rica. We measured carbon in all compartments: soil, leaf litter, roots, necromass and aboveground biomass, using methodologies accepted by the IPCC. We also calculated carbon accumulation rates and their monetary value. We analyzed the correlations of site variables (topography and soils) and canopy composition (richness, abundance, basal areas and biomass) with carbon contents and we made cluster analyses with the same variables to investigate which AFS groups with what characteristics store more carbon. The cocoa-AFS of Talamanca recorded a total carbon average of 122 ± 24 t C ha⁻¹, considered an intermediate to high level. Forty-three percent of the carbon was stored in the aboveground biomass and 41% in the soil. The rate of carbon accumulation in the aboveground biomass was 3.0 ± 1.9 t C ha⁻¹ yr⁻¹, with a monetary value of US\$54 ha⁻¹ yr⁻¹. Carbon storage capacity is especially correlated with the basal area of timber and fruit trees, as evidenced by the correlation and cluster analyses performed, since the cocoa-AFS groups with larger basal areas were the ones that recorded the most total carbon and aboveground biomass. These data may be useful for local or national governments and producer organizations in their efforts to propose strategies for climate change adaptation/mitigation, access to payments for environmental services, and gain better prices for their agroforestry products.

Keywords: biomass, soil, carbon rates, diversity, agroforestry.

INTRODUCCIÓN

El clima global está siendo alterado significativamente debido a un progresivo aumento de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorocarbonos y vapor de agua, que contribuyen a

un incremento global de la temperatura. Las emisiones anuales de GEI crecieron alrededor de 80% entre 1970 y 2004, pues pasaron de 21 a 38 Gt (IPCC 2007). Sin embargo, el mayor incremento percibido se dio durante el período 1995-2004 (0,92 Gt de CO₂ por año), en tanto que en el periodo 1970-1994 el incremento fue de 0,43

¹ M.Sc. CATIE-Proyecto Cacao Centroamérica. Mail: rcerda@catie.ac.cr. (Autor para correspondencia)

² Ing. Agroforestal. Universidad de Nariño, Colombia. Mail: tani.chi.ong@hotmail.com.

³ Ph.D. CATIE-Departamento de Bosques y Cambio Climático. Mail: miguel@catie.ac.cr.

Gt de CO₂ por año. El cambio de uso de la tierra, la deforestación, el uso masivo de combustibles fósiles con fines industriales y de transporte son considerados como los principales factores que inducen dichas emisiones (Brown 1992, Dixon 1995) que afectan la salud humana, la seguridad alimentaria y los ecosistemas naturales (Euguren 2004, IPCC 2007, CEPAL 2009).

Debido a esta problemática mundial y sus posibles efectos sobre las generaciones actuales y futuras y sobre los recursos naturales, es que la mitigación del cambio climático se ha convertido en un reto primordial para la economía y la ciencia dedicada a la conservación del medio ambiente. Una forma de mitigar el cambio climático es la reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera mediante el establecimiento de sistemas agroforestales (SAF) capaces de capturar el CO₂ de la atmósfera y almacenarlo en la biomasa aérea y subterránea y en el suelo, donde se almacena por largos periodos de tiempo (Gayoso y Guerra 2005). Aunque la importancia de los SAF para mitigar el cambio climático es reconocida, las investigaciones realizadas con respecto a captura de carbono en agroforestería siguen siendo pocas, en comparación con otros usos de la tierra como bosques y plantaciones forestales (Andrade e Ibrahim 2003).

En la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica, existen diferentes usos de la tierra dedicados a la producción de plátano, banano, cacao y granos básicos. Entre ellos se destacan los SAF-cacao, dado que además de producir cacao generan otros bienes como madera, frutas, medicinas, fibra y proveen servicios ambientales como la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad (Somarriba y Harvey 2003). La presente investigación pretende contribuir con datos y análisis más específicos a la información ya existente sobre captura de carbono. Para ello, se determinó el carbono en todos los compartimentos de los SAF-cacao y se analizaron las correlaciones con diferentes condiciones de sitio y composición de los doseles de sombra, además se valoró este servicio ambiental para los intereses de gobiernos nacionales, locales y para organizaciones de pequeños productores.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló entre octubre del 2009 y marzo del 2010 en la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. La reserva se ubica a 9°00' - 9°50' norte y 82°35' - 83°05' oeste. La precipitación anual promedio es de 3500 mm, con una temperatura media anual entre 24-27°C. La evaluación del carbono se hizo en 36

SAF-cacao (fincas) que forman parte de una red de parcelas de investigación permanente del Proyecto Cacao Centroamérica del CATIE. Estos SAF-cacao fueron seleccionados a partir de condiciones contrastantes de sitio (altitud, pendiente, orientación) y composición del dosel (riqueza y densidad de especies, estructura horizontal y vertical), de forma que estuviera representada la gran variabilidad de SAF-cacao presentes en la zona y no solo los más comunes. Estos SAF tienen 25 años de edad, en promedio, con árboles de cacao de semilla (híbridos) de alta variabilidad genética, principalmente del tipo trinitario. La riqueza promedio de especies en el dosel alcanza a doce especies (rango de 5-26); los árboles maderables más comunes son el laurel (*Cordia alliodora*) y cedro (*Cedrela odorata*); además, hay frutales como guabas (*Inga* spp.) y cítricos y palmas como el pejibaye (*Bactris gasipaes*); también las musáceas son abundantes, especialmente bananos. Las densidades de cada tipo de planta son variables y demuestran que son SAF bastante poblados (Cuadro 1).

El carbono fue medido en siete compartimentos de los SAF-cacao: suelo, hojarasca (hojas y ramas secas/descomposición de diámetro <2 cm), raíces finas (<2mm diámetro), raíces gruesas (de los árboles y otras plantas del dosel), necromasa delgada (ramas y restos de frutos secos/descomposición con diámetro 2-10 cm), necromasa gruesa (ramas o troncos secos/descomposición con diámetro >10 cm), biomasa aérea (árboles de cacao, maderables, frutales, palmas y otras leñosas del dosel). De esta forma se obtuvo un estimado completo del carbono total. En cada SAF-cacao se estableció una parcela de 1000 m² (50 x 20 m), subdividida en 10 subparcelas de 10 x 10 m donde se hicieron los muestreos y mediciones para cada compartimento, con metodologías recomendadas y/o aceptadas por el IPCC (2003) en diferentes puntos de la parcela (Figura 1).

Para el muestreo de hojarasca y necromasa delgada se usó un marco de 50 x 50 cm, se pesó en fresco (húmedo) y se obtuvieron muestras compuestas de 400 g y 250 g, respectivamente. Para la necromasa gruesa se midieron las piezas (ramas o troncos) atravesadas en los transectos de muestreo, se les midió el diámetro y se clasificó su densidad: sólido, intermedio, descompuesto (0,60; 0,42; 0,23 g/cm³ respectivamente) (IPCC 2003); finalmente, se obtuvo una muestra compuesta de 250 g. Para el muestreo de raíces finas se utilizaron cilindros de 5 cm de diámetro a 0-20 cm de profundidad; se usaron tamices de 2 mm y de 250 um para escoger las raíces finas y conformar una sola muestra. Todas las mues-

Cuadro 1. Tipos de plantas presentes en los sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica

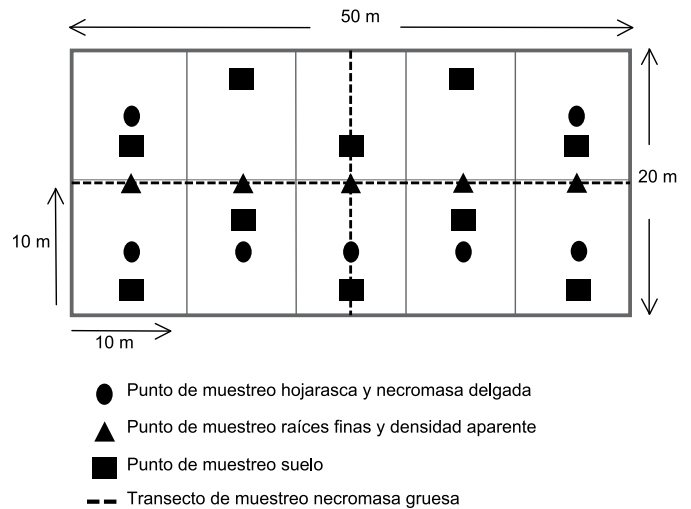
Variable	Árboles maderables	Árboles frutales	Otros árboles	Palmas	Musáceas	Árboles de cacao	Total
Densidad (ind. ha ⁻¹)	119±84	84±63	42±58	43±48	193±261	591±218	1071±242
Área basal (m ² ha ⁻¹)	8,2±5,6	1,9±1,7	0,9±2,2	0,9±1,2	3,4±4,6	10,2±4,3	25,5±7,4

tras fueron enviadas al laboratorio de suelos y tejidos del CATIE, donde se determinó el peso seco a 65°C por 72 horas (MacDicken 1997). Mediante el método de combustión de Walkley y Black (1938) en equipo auto-analizador se obtuvo el porcentaje (fracción) de carbono. El contenido de carbono de cada material se obtuvo multiplicando el peso seco por la fracción de carbono y extrapolando a hectárea.

El muestreo de suelos se hizo con un barreno a 0-20 cm de profundidad y se obtuvo una muestra compuesta de 500 g. Para la densidad aparente se muestrearon suelos con cilindros de 5 cm de diámetro a una profundidad de 0-20 cm. En el laboratorio del CATIE se determinó la fracción de carbono del suelo de las muestras compuestas también en equipo autoanalizador. Para determinar la densidad aparente, cada submuestra se secó a 100°C por 72 horas, se dividió el peso seco entre el volumen del cilindro y luego se obtuvo un promedio. El contenido de carbono del suelo se obtuvo multiplicando el volumen de suelo por hectárea a una profundidad de 20 cm por la densidad aparente promedio y por la fracción de carbono (MacDicken 1997).

Para el cálculo de biomasa aérea se midieron la altura total y el diámetro de tronco a la altura del pecho para todas las especies leñosas con altura superior a 2,5 m. Para el caso de cacao, se midió el diámetro del tronco a 30 cm sobre suelo. Con los datos obtenidos, dependiendo del tipo de árbol, se aplicaron ecuaciones alométricas para obtener el valor de biomasa. La biomasa de raíces gruesas se estimó con base en las biomásas aéreas. Finalmente, la estimación de carbono se realizó multiplicando las biomásas por una fracción de carbono igual a 0,5 (IPCC 2003). Para el caso de necromasa gruesa, los volúmenes obtenidos se multiplicaron por su densidad y luego por la fracción de carbono (Cuadro 2).

Las tasas promedio de acumulación anual de carbono se calcularon dividiendo los inventarios de carbono entre la edad del SAF-cacao. Con esos valores también se hizo una valoración monetaria: primero se multiplicaron las cantidades de carbono por un factor de 3,67 para transformarlas a cantidades de CO₂ y luego, con base en un


Figura 1. Diseño metodológico para el muestreo de material vegetal y suelos en sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica

precio de 5 US\$ por t de CO₂, se calculó el valor monetario del almacenamiento y tasas de carbono.

Para el análisis estadístico de los datos se calcularon medidas resumen (media, desvío estándar, mediana, máximos y mínimos, coeficiente de variación, asimetría, kurtosis) para describir el contenido de carbono total y por compartimento. Se analizaron correlaciones (Spearman) de los contenidos de carbono por compartimento con variables de sitio (altitud y pendiente, textura, pH, C, N, P, y Ca de suelos) y del dosel de sombra (riqueza, abundancia, áreas basales y biomásas de cacao, frutales, maderables, palmas y otras plantas). También se hizo un análisis multivariado de conglomerados (Método Ward, distancia Gower) con los 36 SAF-cacao como criterio de clasificación y con las variables de sitio y del dosel de sombra. A las variables de carbono se les aplicó análisis de varianza univariado y prueba de medias LSD Fisher (95% de confianza) entre conglomerados. Esto permitió identificar qué conglomerados tenían más carbono y cuáles son sus características.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los SAF-cacao de Talamanca, Costa Rica registraron 122 ± 24 t C ha⁻¹ de carbono total. Los compartimentos

Cuadro 2. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y de raíces gruesas y de necromasa gruesa en sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica

Especie o tipo de planta	Ecuación o fórmula	Fuente
<i>Theobroma cacao</i>	$\text{Log } B = (-1,684 + 2,158 * \text{Log}(d_{30}) + 0,892 * \text{Log}(\text{alt}))$	CATIE, sin publicar
<i>Cordia alliodora</i>	$\text{Log } B = (-0,94 + 1,32 * \text{Log}(\text{dap}) + 1,14 * \text{Log}(\text{alt}))$	CATIE, sin publicar
<i>Bactris gasipaes</i>	$B = 0,74 * \text{alt}^2$	Szott et al. 1993
Árboles maderables	$B = (21,3 - 6,95 * (\text{dap}) + 0,74 * (\text{dap}^2))$	Brown e Iverson 1992
Árboles frutales	$\text{Log } B = (-1,11 + 2,64 * \text{Log}(\text{dap}))$	CATIE, sin publicar
Palmas	$B = 4,5 + 7,7 * \text{alt}$	Frangi y Lugo 1985
Raíces gruesas	$B = \exp[-1,0587 + 0,8836 * \ln(BA)]$	Cairns et al. 1997
Musáceas	1,5 kg de biomasa por cada metro de altura	Tanaka y Yamaguchi 1972
Necromasa gruesa	$V = n^2 + \frac{(D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)}{8 * L}$	IPCC 2003
C en biomásas	$C = B * Fc ; Fc = 0,5$	IPCC 2003

B: biomasa (kg); Log: Logaritmo base 10; dap: diámetro (cm) del tronco a la altura del pecho (1,3m); d30: diámetro (cm) del tronco a 30 cm; alt: altura total (m); V: volumen; D: diámetro de pieza; L: longitud de transecto (m) C: carbono en biomasa; Fc: fracción de C (0,5)

con más carbono fueron la biomasa aérea y el suelo con un 43 y 41% del carbono total, respectivamente. Todas las asimetrías de carbono por compartimento fueron positivas y la mayoría moderadamente leptokúrticas, lo que quiere decir que las medias son buenos indicadores de las tendencias centrales de estos datos. Entre los compartimentos que presentaron mayor variación en los datos están biomasa aérea, raíces gruesas y necromasa gruesa; o sea que puede haber cacaotales que almacenan cerca de 200 t C ha⁻¹, en tanto que otros no llegan a las 75 t C ha⁻¹ (Cuadro 3). De acuerdo con una escala propuesta por Somarriba et al. (2008), un nivel medio de carbono total, que sería el más adecuado para no perjudicar la producción de cacao, está entre 80-120

t C ha⁻¹; por encima de ese valor ya son niveles altos. Según esa escala, aproximadamente la mitad de los cacaotales de Talamanca tienen nivel de carbono medio y la otra mitad nivel alto; similar comportamiento se presentó en el carbono de biomasa aérea, en ese caso un contenido medio de carbono en biomasa aérea sería 50 t C ha⁻¹ (Figura 2).

En comparación con otras regiones del mundo, en la región mesoamericana se cuenta con bastante información sobre carbono en biomasa aérea; los contenidos de carbono en SAF-cacao varían con la estructura y edad. El contenido de carbono en los SAF-cacao de Talamanca está dentro los rangos que se reportan a

Cuadro 3. Carbono total y por compartimentos (t C ha⁻¹) almacenado en sistemas agroforestales de cacao en Talamanca, Costa Rica

Carbono en	Media	D.E.	Mediana	Min	Max	C.V.	Asimetría	Kurtosis	% del total
Suelo	49,3	8,5	49,2	30,8	75,0	17,3	0,6	1,4	40,5
Biomasa aérea	52,7	21,7	51,2	23,5	134,2	41,1	1,6	4,4	43,3
Raíces gruesas	9,3	3,6	9,1	2,9	23,0	39,0	1,4	5,0	7,6
Necromasa gruesa	6,3	5,1	5,1	0,4	21,2	81,3	1,4	1,7	5,1
Raíces finas	1,9	0,9	1,7	0,4	4,8	46,6	1,2	2,4	1,5
Hojarasca	1,2	0,4	1,2	0,6	2,0	28,5	0,5	-0,4	1,0
Necromasa delgada	1,2	0,5	1,2	0,6	2,9	40,1	1,6	3,6	1,0
Total	121,9	23,9	116,1	76,1	202,9	19,6	1,2	2,8	100,0

C.V.: coeficiente de variación; D.E.: desviación estándar; Min: valor mínimo; Max: valor máximo

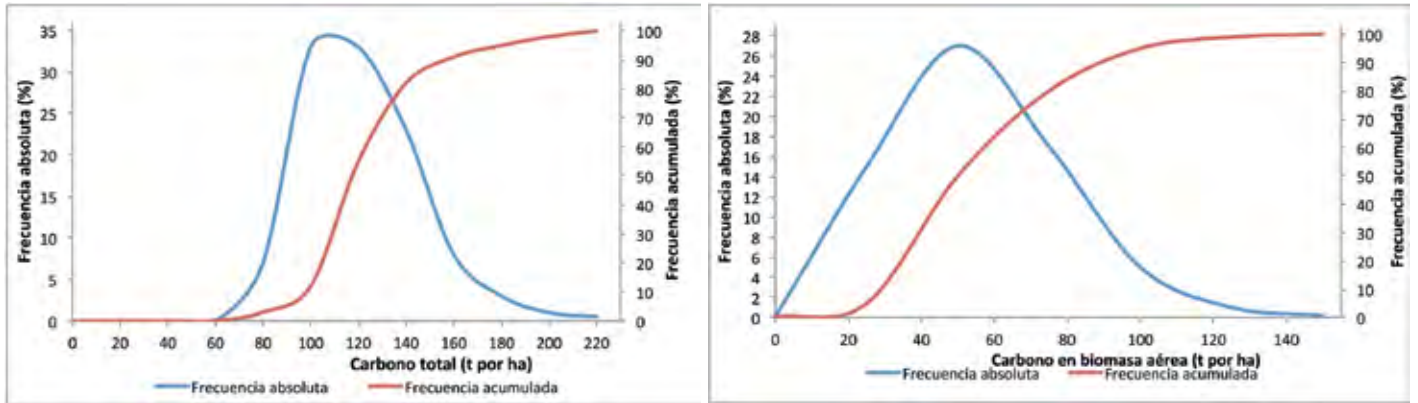


Figura 2. Frecuencias de sistemas agroforestales de cacao: A) carbono total ($t C ha^{-1}$); B) carbono en biomasa aérea ($t C ha^{-1}$) en Talamanca, Costa Rica Diagramación: Poner en el gráfico que se genere los datos de Asemetría y Kurtosis en cada gráfico.

nivel mundial, aunque muestra similitudes o diferencias, en comparación con sus pares de Centroamérica y de otras regiones. Ortiz et al. (2008) en SAF-cacao de Panamá reportaron valores de 43-62 $t C ha^{-1}$ en biomasa aérea. En los SAF-cacao de Nicaragua (Poveda 2012, en este mismo número de la RAFA) se encontró menos carbono debido a que se manejan menores densidades de árboles jóvenes. El caso opuesto está en Guatemala Costa Sur (Alvarado 2012, en este mismo número de la RAFA), pues son SAF-cacao con mayor cantidad de árboles frutales y maderables y más grandes (en altura y grosor), aunque con menor densidad de árboles de cacao. Se podría decir que las 52 $t C ha^{-1}$ de carbono en biomasa aérea de Talamanca están en un término medio. Por ejemplo, en SAF-cacao de 30 años en Brasil el carbono en biomasa aérea fue de 32 $t C ha^{-1}$ (Gama-Rodrigues et al. 2011) mientras que en Ghana, SAF-cacao de 50 años registraron hasta 131 $t C ha^{-1}$ también en biomasa aérea (Wade et al. 2010).

La biomasa aérea aporta similar proporción de carbono que el suelo, pero fue el único compartimento que mostró una fuerte correlación positiva ($p < 0,0001$; $r^2 = 0,87$) con el carbono total. Esto indica que en este tipo de SAF, la capacidad de almacenar carbono dependería más de los árboles presentes en el sistema que de los demás compartimentos. El carbono en el suelo, aunque no presentó correlación positiva con el carbono total, también se considera uno de los principales reservorios de carbono, por las cantidades que se encuentran y por ser perdurable en el tiempo (Nair et al. 2009). El carbono en el suelo generalmente se mide a diferentes profundidades pero, en realidad, no hay un estándar de medición común, lo que dificulta hacer comparaciones.

Se encontró un estudio en Camerún donde se midió el carbono a la misma profundidad que en este estudio y se registró una menor cantidad, 43 $t C ha^{-1}$ contra las 49 $t C ha^{-1}$ de este estudio (Gockowski y Sonwa 2011).

El carbono total y el carbono en biomasa aérea presentaron correlaciones significativas ($p < 0,05$) y positivas solo con las densidades y áreas basales totales de plantas leñosas del dosel, en especial con las de árboles maderables. De esas variables fueron más importantes las áreas basales pues sus coeficientes de correlación estuvieron entre 0,6 y 0,75, mientras que los coeficientes de las densidades fueron menores a 0,35. La riqueza de especies en el dosel no presentó correlación significativa con ninguno de los contenidos de carbono. Las correlaciones del carbono total y en biomasa aérea con la topografía (altura, pendiente) no fueron significativas, aunque en otros estudios se reportó que hay más carbono en los SAF-cacao ubicados en lomas que en valles. Segura (2005) reportaron que los cacaotales en lomas almacenaron en promedio un total de 132,8 $t C ha^{-1}$ y en valle 112,5 $t C ha^{-1}$. Según Arce et al. (2008) en la biomasa aérea de los SAF-cacao de loma se encontraron 41 $t C ha^{-1}$ y en valle 32 $t C ha^{-1}$. Sin embargo, es importante dejar en claro que para determinar las cantidades de carbono almacenado hay que trabajar con la biomasa aérea, la cual depende más del tipo de especies que de la topografía.

El carbono del suelo presentó correlaciones significativas positivas con la materia orgánica y contenidos de K y N con coeficientes mayores a 0,6, y con la altitud y pendiente pero con coeficientes menores a 0,50. Con la densidad aparente, porcentaje de limo y pH, el carbono del suelo presentó correlaciones significativas negativas,

con coeficientes superiores a -0,7. Según Romanyà et al. (2007), la textura del suelo tiene un efecto significativo sobre los cambios del carbono; las arcillas y partículas finas del suelo son las que protegen mejor a la materia orgánica. Por otro lado, Cerda (2007) registró mayor contenido de carbono en suelos con menor densidad aparente y con mayor porcentaje de agregados grandes (2-8 mm). Esto indica que la capacidad de almacenamiento de carbono del suelo está influenciada tanto por la textura como por la estructura del suelo.

La tasa de acumulación de carbono total fue de $6,9 \pm 4,3$ t C ha⁻¹ año⁻¹ y de $3,0 \pm 1,9$ t C ha⁻¹ año⁻¹ en la biomasa aérea. Dichas tasas deben considerarse como valores de referencia y no valores exactos, ya que en el caso del carbono total, no se sabe cuánto carbono había en el suelo al momento de establecer los cacaotales; en el caso del carbono en biomasa aérea pueden haber quedado algunos árboles remanentes del uso del suelo anterior al cacaotal (aunque esta tasa de biomasa aérea es más confiable que la total). La valoración monetaria se hizo a partir de esos valores de referencia: en cuanto a carbono total, los SAF-cacao de Talamanca tendrían un valor actual de 2236 US\$ ha⁻¹, y si se accediera a pagos por servicios ambientales, podrían recibir al menos 127 US\$ ha⁻¹ año⁻¹ por carbono total y 54 US\$ ha⁻¹ año⁻¹ por carbono en biomasa aérea (Cuadro 4). Este último dato es el de mayor interés porque la mayoría de mercados voluntarios solo pagan por el carbono arriba (biomasa de los árboles) y debajo del suelo (raíces de los árboles) y no en otros compartimentos. La acumulación del carbono en el suelo podría ser interesante y cuantificable para estrategias de mitigación o reconocimiento por secuestro de carbono principalmente en suelos degradados donde hay poca materia orgánica y se podrían establecer SAF, ya que se estima que en los primeros diez años de un SAF es cuando se acumula significativamente más carbono en el suelo (Beer et al. 1990).

Se formaron cuatro conglomerados (grupos) de SAF-cacao estadísticamente diferentes (Hotelling <0,05; Figura 3). El conglomerado 2 estuvo constituido por la mayor cantidad de SAF (n=16), seguido del conglomerado 1

(n=8), 3 (n=7) y 4 (n=5). La mayoría de las variables de sitio y composición del dosel fueron contrastantes entre los conglomerados. En general, se los puede describir así: el conglomerado 1 agrupó los SAF-cacao ubicado en terrenos planos de valle, con el mayor porcentaje de limo en el suelo, menor abundancia de árboles de cacao y mayor abundancia de musáceas; con alta densidad de árboles maderables muy jóvenes (área basal baja). El conglomerado 2 agrupó los SAF-cacao localizados a mayor altitud (280 m), en las lomas de las montañas, terrenos con relieve ondulado, pendientes del 20% y con altos porcentajes de arcilla en el suelo; cacaotales con la menor abundancia total de plantas y árboles de sombra. El conglomerado 3 agrupó a los SAF-cacao que están a altitudes, con pendientes y textura similares al conglomerado 2, pero se trata de cacaotales con la mayor densidad y área basal de árboles y otras leñosas del dosel y con menor abundancia de musáceas. El conglomerado 4 agrupó a parcelas en terrenos planos o con poca pendiente en fondos de valle, topografía similar al conglomerado 1, pero con la mayor abundancia de cacao y proporción equilibrada entre árboles frutales y maderables.

Los contenidos de carbono de la mayoría de compartimentos y el carbono total presentaron diferencias significativas entre conglomerados. El carbono total, en biomasa aérea y en raíces gruesas fue mayor en los conglomerados 4 y 3 gracias a la mayor abundancia y mayores áreas basales de especies leñosas, en especial maderables y frutales. Los contenidos de carbono en raíces finas, necromasa y hojarasca fueron estadísticamente iguales entre todos los conglomerados. El carbono en el suelo fue mayor en los conglomerados 2 y 3, lo cual puede atribuirse al mayor contenido de materia orgánica de esas parcelas, ubicadas a mayor altitud y cuyos suelos tienen un primer horizonte más grueso que los suelos jóvenes en partes bajas (Cuadro 5). Es importante destacar que dentro de estos conglomerados también se encontraron otros árboles (ornamentales u otras especies muy frondosas) que registraron grandes cantidades de carbono, sin embargo, no serían de tanta utilidad para los productores(as) ya que solo brindan sombra y no otros productos como los árboles maderables y frutales.

Cuadro 4. Valoración monetaria del inventario y de tasas de carbono total y en biomasa aérea de sistemas agroforestales de cacao de Talamanca, Costa Rica

	Carbono (t ha ⁻¹)	CO ₂ (t ha ⁻¹)	Valor CO ₂ (US\$ ha ⁻¹)	Tasa carbono (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Tasa CO ₂ (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Valor tasas (US\$ t ⁻¹ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Carbono total	122	447	2236	6,92	25	127
Carbono en biomasa aérea	53	194	972	2,96	11	54

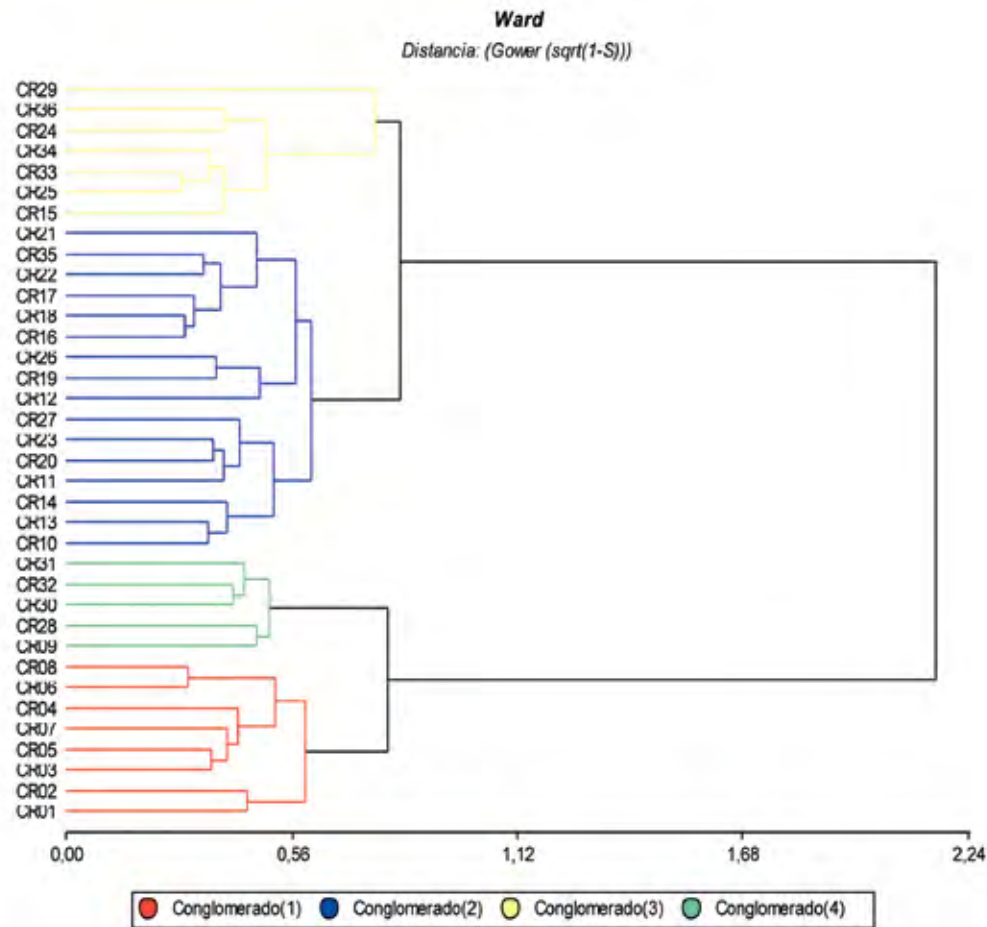


Figura 3. Dendrograma de 36 sistemas agroforestales de cacao construido a partir de variables de sitio y composición del dosel en Talamanca, Costa Rica

Las características de los SAF del conglomerado 3 evidencian que mientras más árboles maderables (en cantidad y grosor de fuste) mayor es el carbono secuestrado. De acuerdo con la proporción de SAF en dicho conglomerado se estima que en Talamanca hay solo un 20% de SAF-cacao de ese tipo (7/36). Los SAF del conglomerado 4 también son interesantes por almacenar buena cantidad de carbono en leñosas, aunque también se contabilizó una cantidad considerable de musáceas en el dosel (126 tallos ha^{-1}) que dan beneficios a la familia. Sin embargo, el carbono no es lo más importante del sistema ya que los ingresos serían modestos, como se vio en la valoración monetaria. Por ello, es necesario también estudiar la relación de los contenidos de carbono con los rendimientos de cacao y otros productos agroforestales y con otros servicios ambientales. Ya existen investigaciones de estos SAF-cacao que demuestran que todavía se podrían enriquecer con más especies sin perjudicar la productividad de cacao y su potencial para conservar biodiversidad (Deheuvels et al. 2012) -habría que hacer también un balance con el carbono-

El manejo de una mayor proporción de maderables en el SAF parecería ser la mejor opción pues son grandes sumideros de carbono y no dan excesiva sombra como otros árboles frutales.

Los datos documentados en este estudio podrían ser utilizados por familias cacaoteras y sus organizaciones y gobiernos locales para conseguir mejores certificaciones tipo tándem (aquellas que valoran no solo calidad de cacao, sino también los servicios ambientales y la equidad/justicia social), promocionar y conseguir mejores precios para sus productos agroforestales (cacao, madera, frutas, artesanías). Ya existen varios tipos de estándares de certificación en esta vía, los cuales se enfocan en mecanismos de desarrollo limpio o mercados voluntarios de carbono; las organizaciones cacaoteras podrían solicitar el tipo de certificación que más les convenga (Cuadro 6). Los procesos para certificar y vender carbono están descritos en Somarriba et al. (2008). En otras zonas cacaoteras del país también se podría aplicar las metodologías empleadas en este tipo

Cuadro 5. Anova y pruebas LSD Fisher para el carbono (t C ha⁻¹) de cuatro conglomerados de 36 sistemas agroforestales de cacao en Talamanca, Costa Rica

Carbono en	Conglomerado 1 (n=8)		Conglomerado 2 (n=16)		Conglomerado 3 (n=7)		Conglomerado 4 (n=4)		p-valor
Suelo	43,6	±8,8 a	54,2	±7,4 b	47,9	±8,1 ab	45,0	±4,0 a	0,0109
Biomasa aérea	45,3	±13,2 a	43,9	±14,6 a	78,2	±27,6 b	57,4	±16,8 ab	0,0012
Raíces gruesas	7,9	±2,7 a	7,7	±2,2 a	13,6	±4,5 b	10,3	±2,4 ab	0,0005
Necromasa gruesa	7,5	±4,4 a	4,2	±2,6 a	6,9	±7,3 a	9,9	±7,1 a	0,1154
Raíces finas	1,1	±0,4 a	2,1	±1,0 b	2,1	±0,7 b	1,9	±0,7 ab	0,0356
Hojarasca	1,1	±0,2 a	1,2	±0,4 a	1,3	±0,3 a	1,5	±0,5 a	0,3040
Necromasa delgada	1,1	±0,3 a	1,2	±0,5 a	1,4	±0,6 a	1,1	±0,4 a	0,7456
Total	107,6	±14,4 a	114,5	±17,2 a	151,3	±27,9 b	127,2	±13,8 a	0,0003

Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas detectadas con el análisis de varianza. Letras diferentes en filas indican diferencias estadísticamente significativas entre conglomerados.

Cuadro 6. Estándares para certificaciones tipo tándem

Estándar	Mecanismo		Elementos			Fuente online
	MVC	MDL	C	S	B	
The climate, community & biodiversity alliance (CCB)	X	X	X	X	X	http://www.climate-standards.org/index.html
Verified Carbon Standard (VCS)	X		X			http://v-c-s.org/
The gold standard	X	X	X	X	X	http://www.cdmgoldstandard.org/
Social Carbon Standard	X		X	X	X	http://www.socialcarbon.org/
Forest stewardship council (FSC)	X		X	X	X	http://www.fsc.org/77.html
American Carbon Registry Standard (ACRS)	X	X	X	X	X	http://www.americancarbonregistry.org/
Carbco Platinum Carbon Standard	X		X	X	X	http://www.cquestor.com/
Carbon Fix Standard (CFS)	X		X	X	X	http://www.carbonfix.info/
EPA Climate Leaders Offset Guidance	X		X			http://www.epa.gov/
Panda Standard	X		X	X	X	http://www.pandastandard.org/
Plan Vivo	X		X	X	X	http://www.planvivo.org/standard/
VER+ Standard	X	X	X			http://www.tuev-sued.de/
Chicago Climate Exchange (CCX)	X		X			https://www.theice.com/ccx.jhtml
Green-e Climate	X		X			http://www.green-e.org/
WRI/WBCSD GHG Protocol for Project Accounting	X	X	X			http://www.ghgprotocol.org/
Rainforest Alliance	X	X	X	X	X	http://www.rainforest-alliance.org/

MVC: mercados voluntarios de carbono; MDL: mecanismos de desarrollo limpio.

de estudios para cuantificar el carbono de sus plantaciones; como referencia podrían fijarse si sus SAF-cacao son similares a alguno de los grupos formados en este estudio para tener un estimado del carbono que almacenan. Instancias de gobierno nacional también podrían aprovechar estos datos para proyecciones de acumulación de carbono en SAF de cacao existentes en el país, como parte de sus estrategias de mitigación de cambio climático y balance de emisiones de CO₂.

CONCLUSIONES

La cantidad de carbono se correlacionó especialmente con el área basal de los árboles maderables y frutales, es decir, que el grosor y tamaño de los árboles es más importante que la abundancia de individuos y riqueza de especies, y además es independientemente de las condiciones de topografía y suelo. Los ingresos que se podrían obtener por el pago de este servicio son modestos pero podrían servir como incentivo a los productores

para mejorar el manejo agroforestal de sus cacaotales. Los datos de este estudio pueden ser de utilidad para gobiernos locales o nacionales y organizaciones de productores en su afán de proponer estrategias de adaptación/mitigación del cambio climático, acceder a pagos por servicios ambientales y promocionar mejor e incrementar los precios de sus productos agroforestales.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Cacao Centroamérica (PCC) del Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza (CATIE), financiado por el Programa Ambiental Mesoamericano de Noruega, por haber proporcionado los recursos financieros y logística necesarios. A los guías y familias indígenas de Talamanca por haber permitido trabajar en sus fincas y brindar los datos necesarios.

LITERATURA CITADA

- Andrade, H; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear carbono en sistemas silvopastoriles? Agroforestería en las Américas 10: 109-116.
- 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. Agroforestería en las Américas 46:30-33.
- Beer, J; Bonnemann, A; Chavez, W; Fassbender, HW; Imbach, AC; Martel, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. V. Productivity indices, organic material models and sustainability over ten years. Agroforestry Systems 12: 229-249.
- Brown S; Iverson, LR. 1992. Biomass estimates for tropical forests. World Resources Review 4(3): 366-383.
- Brown, L. 1992. Processes and lands for sequestering carbon in the tropical forest landscapes. In Wisniewski, J; Lugo, A. E. (eds). Natural sinks of CO₂. Water, Air and Soil Pollution 64: 139-155.
- Cairns, MA; Brown, S; Helmer, EH; Baungardner, GA. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111: 1-11.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Santiago, Chile, CEPAL. 148 p.
- Cerda, R. 2007. Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 60 p.
- Deheuvels O., Avelino J., Somarrriba E., Malézieux E. 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. Agriculture, ecosystems and environment, 149 : 181-188.
- Dixon, RK; 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? Agroforestry Systems 31: 99-116.
- Euguren, L. 2004. El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. Santiago, Chile, CEPAL. 83 p.
- Frangi, JL; Lugo, AE. 1985. Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. Ecological Monographs 55:351-369.
- Gama-Rodrigues EF, Gama-Rodrigues AC, Nair PKR. 2011. Soil carbon sequestration in cacao agroforestry systems: a case study from Bahia, Brazil. In Kumar, BM; Nair, PKR. (Eds.). Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges. New York, USA, Springer-Science. Advances in Agroforestry no. 8. p. 85-99.
- Gayoso, J; Guerra, J. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Bosque 26(2). 33-38.
- Gockowski, J, Sonwa, D. 2011. Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO₂ emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rain forest of West Africa. Environmental Management 48:307-321.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2003. Orientación sobre las buenas prácticas para el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). Ginebra, Suiza. 628 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Synthesis report: Climate change 2007. Ginebra, Suiza. 52 p.
- MacDicken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Nair, PKR, Kumar, BM, Nair, VD. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172:10-23.
- Ortiz, A; Riascos, L; Somarrriba, E. 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono de cacao en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). Agroforestería en las Américas 46: 26-29.
- Romanya, J; Rovira, P; Vallejo, R. 2007. Análisis del carbono en los suelos agrícolas de España: aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. Revista Ecosistemas 16(1): 50-57.
- Segura, M. 2005. Estimación del carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 139 p. Informe final de consultoría para Proyecto Captura de Carbono y Desarrollo de Mercados Ambientales en Sistemas Agroforestales Indígenas con Cacao en Costa Rica.
- Somarrriba, E; Andrade, H; Segura, M; Villalobos, M. 2008 ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas de Costa Rica? Agroforestería en las Américas 46:81-88.
- Somarrriba, E; Harvey, C. 2003. ¿Cómo integrar producción sostenible y conservación de biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? Agroforestería en las Américas 10(37-38): 12-17.
- Szott, LT; Arévalo-López, LA; Pérez, J. 1993. Allometric relationships in Pijuayo (*Bactris gasipaes* H.B.K.). In Mora-Urpí, J; Szott, LT; Murillo, M; Patiño, VM. (Eds.). Congreso Internacional sobre Biología, Agronomía e Industrialización del Pijuayo (4, Iquitos, PE, 1989). San José, Costa Rica, Editorial UCR. p. 91-114.
- Tanaka, A, Yamaguchi, C. 1972. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano de maíz. Chapingo, México, Colegio de postgraduados. 124 p.
- Wade, ASI; Asase, A; Hadley, P; Mason, J; Ofori-Frimpong, K; Preece, D; Spring, N; Norris, K., 2010. Management strategies for maximizing carbon storage and tree species diversity in cocoa-growing landscapes. Agriculture, Ecosystems and Environment 138: 324-334.