

Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica¹

Gabriela Ávila², Francisco Jiménez³, John Beer³, Manuel Gómez³, Muhammad Ibrahim³

Palabras clave: *Acacia mangium*, *Brachiaria brizantha*, *Coffea arabica*, *Eucalyptus deglupta*, *Ischaemum indicum*.

RESUMEN

Se evaluó el almacenamiento y fijación de carbono (C) en: 1) los sistemas agroforestales café (*Coffea arabica*) + eucalipto (*Eucalyptus deglupta*) de cuatro, seis u ocho años de edad, café + poró (*Erythrina poeppigiana*), pasto brachiaria (*Brachiaria brizantha*) + mangium (*Acacia mangium*) y pasto brachiaria + eucalipto; y en 2) los monocultivos de café, brachiaria o pasto ratana (*Ischaemum indicum*) a pleno sol. Más del 89% del C almacenado en los sistemas correspondió al C del suelo. La fijación de C del componente arbóreo estuvo entre 0.4 y 2.2 t ha⁻¹ año⁻¹. El aporte del componente arbóreo al total de C almacenado por el sistema varió entre 1%, para eucalipto de seis años en café, y 7% para mangium en potreros de brachiaria. El monto pagado en la actualidad en Costa Rica por el servicio ambiental de almacenamiento de C (US\$ 10-13 ha⁻¹) no es suficiente para tener una influencia significativa en el uso de la tierra.

Carbon storage and fixation, and valuation of environmental services in agroforestry systems in Costa Rica

ABSTRACT

Carbon storage and fixation were studied in: 1) agroforestry systems of *Coffea arabica* (coffee) associated with *Eucalyptus deglupta* (eucalyptus) aged four, six or eight years, *C. arabica* associated with *Erythrina poeppigiana* (mountain immortelle) and *Brachiaria brizantha* (brachiaria) pasture associated with *Acacia mangium* (mangium) or with *E. deglupta*; and in 2) monocultures of coffee, *B. brizantha* or *Ischaemum indicum* (ratana) pasture in full sun. More than 89% of the C stored in the systems was soil C. Carbon fixation in the trees was between 0.4 and 2.2 t ha⁻¹ year⁻¹. The contribution of the tree component to the total C stored by the system varied from 1%, for six year old eucalyptus in coffee, to 7% for mangium in brachiaria pastures. In Costa Rica, the amount presently paid for the environmental service of C storage (US\$ 10-13 ha⁻¹) is inadequate to have a significant impact on land use.

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global. Una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa (mediante la fotosíntesis) y en el suelo (a través de la acumulación de materia orgánica). Los sistemas agroforestales (SAF) representan sumideros importantes de carbono (C); sin

embargo, no han sido considerados en el pago de servicios ambientales, debido entre otras razones, a la ausencia de información cuantificada sobre su potencial de almacenamiento y fijación de C. En la mayoría del área cafetalera de América Central, el café (*Coffea* spp.) se maneja bajo sombra arbórea (Galloway y Beer 1997).

¹ Basado en: Ávila Vargas G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistema de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba, Costa Rica. 99 p. ² M.Sc. Agroforestería Tropical, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 2000. ³ Profesores investigadores, CATIE, Turrialba: Tel: (506) 556-1576. fjimenez@catie.ac.cr (autor para correspondencia), jbeer@catie.ac.cr, mgomez@catie.ac.cr, mibrahim@catie.ac.cr respectivamente.

Por otro lado, existe gran potencial para manejar y recuperar áreas degradadas por sobrepastoreo, mediante sistemas silvopastoriles. En ambos casos, el pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de C representa una alternativa para dar valor agregado a la producción, que podría tener un gran potencial e importancia para los productores. La finalidad de este estudio fue cuantificar el C fijado y almacenado en sistemas agroforestales con café y pastos en Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los estudios con café se realizaron en Grecia (1000 msnm, 2115 mm de lluvia, 22°C, suelos Andisoles) y Naranjo (1100 msnm, 2411 mm de lluvia, 21.5 °C, suelos Andisoles), provincia de Alajuela, Costa Rica; se utilizaron plantaciones de café (*Coffea arabica*) variedad Catuai (plantadas a 2x1.2 m) asociado con eucalipto (*Eucalyptus deglupta*) de cuatro (6x6 m), seis (8x8 m) y ocho años (8x8 m); o con poró (*Erythrina poeppigiana*) de más de 10 años (8x8 m) además de café a pleno sol. En cada plantación, se seleccionaron al azar nueve unidades de muestreo para cada sistema evaluado, para un total de 45 parcelas de muestreo. Las determinaciones de C se basaron en un muestreo destructivo de un árbol de sombra, cuatro plantas de café, cuatro submuestras de hojarasca y cuatro submuestras del suelo (0-25 cm, incluyendo la biomasa radicular < 0,25 mm de diámetro) en cada unidad de muestreo.

Para la estimación de C almacenado (CA_s ; t C ha⁻¹) en la biomasa (B), se utilizó la fórmula $CA = B \times fc$, donde fc = a la fracción de C en la biomasa de los diferentes componentes, lo cual fue determinado en los laboratorios de la Universidad de Costa Rica. La tasa de fijación de C (CF; t C ha⁻¹ año⁻¹) en los árboles es C almacenado (CA) por árbol dividido entre la edad (años) del mismo. El C almacenado en el suelo (CA_s , t C ha⁻¹) se estimó a partir del porcentaje de C en el suelo (%C_s), la densidad aparente (DA) y la profundidad de muestreo (P) del mismo: $CA_s = \%C_s \times DA \times P$. Se estimó C_s utilizando el método de Walkley y Black.

Los estudios con sistemas silvopastoriles y pasturas sin árboles fueron realizados en Guácimo y Pococí (200 msnm, 4380 mm de lluvia, 24.6 °C, suelos Andosoles), en la provincia de Limón, Costa Rica. Se seleccionaron cuatro sistemas (sitios): 1) pastizales de brachiaria (*Brachiaria brizantha*) asociado con el maderable mangium (*Acacia mangium*) de tres años (9x3 m); 2) bra-



La mayor valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono, correspondió al sistema agroforestal café-eucalipto de cuatro años con un valor de US\$84 ha⁻¹ (Foto L. Meléndez).

chiaria asociado con *E. deglupta* de tres años (9x3 m); 3) pasturas de ratana (*Ischaemum indicum*); y 4) brachiaria a pleno sol. Se seleccionaron al azar nueve unidades de muestreo para cada sistema, para un total de 36 parcelas de muestreo. Se cuantificó el C almacenado en todos los sistemas y sus componentes utilizando la metodología descrita arriba, mientras que la tasa de fijación se calculó solamente para los sistemas brachiaria-mangium y brachiaria-eucalipto.

Para la valoración del servicio ambiental por almacenamiento de C, se utilizaron los criterios del IPCC (2000) y lo estipulado en la Ley Forestal 7575 (Costa Rica 1998). Se tomaron como referencia tres tipos de valoraciones: 1) el valor utilizado en los proyectos internacionales (10 US\$ t⁻¹); 2) el valor en los proyectos negociados por Implementación Conjunta en Costa Rica (5 US\$ t⁻¹); y 3) valor real actual pagado a los productores nacionales, según el pago de servicios ambientales vigente, estimado en 1.53 US\$ t⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento de carbono

El sistema de café que almacenó más C fue café-poró con un total de 195 t ha⁻¹; el de menor almacenamiento fue café-eucalipto de 8 años con 121 t ha⁻¹ (Cuadro 1). Obviamente estos resultados dependen de las condiciones de cada sitio (clima, suelo, manejo; no hubo replicación de sistemas) pero fueron semejantes a los reporta-



En los sistemas de producción con pastos, el carbono almacenado fue mayor en los sistemas silvopastoriles, con respecto a las pasturas en monocultivo (Foto L.Meléndez).

dos en la literatura respecto a sistemas agroforestales con café en varios lugares de América Central (Fassbender *et al.* 1985, Fournier 1996, Márquez 1997, Alvarado *et al.* 1999).La mayor parte del C estuvo almacenado en el suelo, aún sin incluir las raíces de más de 2 mm de diámetro. El almacenamiento en este componente fue mayor en el sistema café-poró (184 t ha⁻¹) y menor en café-eucalipto de ocho años (109 t ha⁻¹). Alpizar *et al.* (1985), en Turrialba, Costa Rica, encontraron 164 t ha⁻¹ de C almacenado en el suelo (0-45 cm) en SAF con café.

En los sistemas con pastos, el C almacenado fue mayor en los sistemas silvopastoriles (95 t ha⁻¹), con respecto a las pasturas en monocultivo (68 para brachiaria y 84 t ha⁻¹ para ratana). Trouve *et al.* (1994) obtuvieron un almacenamiento de C de 63 a 76 t ha⁻¹ en sistemas silvopastoriles con *E. deglupta* en el Congo. El aporte de las pasturas en el almacenamiento de C fue inferior a 2.5 t C ha⁻¹. Andrade (1999) obtuvo un almacenamiento de C en las pasturas de 0.35 y 1.5 t ha⁻¹ para *B. brizantha* asociada a *E.deglupta* o *A.mangium*, respectivamente.

Cuadro 1: Cantidad de carbono almacenado (t C ha⁻¹) en diferentes sistemas agroforestales o monocultivos de café o pasturas en Costa Rica.

Sistema agroforestal	Arriba del suelo	Orgánico del (0-25 cm) suelo	Total
Café-eucalipto* (4 años)	12.5 (4.2)**	139.1 (23.3)	151.6
Café-eucalipto (6 años)	7.7 (2.5)	161.0 (54.4)	168.7
Café-eucalipto (8 años)	12.3 (5.9)	108.6 (15.4)	120.9
Café-poró (más de 10 años)	10.6 (4.0)	184.4 (13.8)	195.0
Brachiaria-mangium (3 años)	8.9 (0.1)	86.6 (17.5)	95.5
Brachiaria-eucalipto (3 años)	7.5 (0.2)	87.3 (0.4)	94.8
Monocultivo			
Café a pleno sol	10.4 (3.5)	153.9 (37.0)	164.3
Pasto brachiaria a pleno sol	2.0 (0.1)	66.2 (16.4)	68.2
Pasto ratana a pleno sol	0.12 (0.0)	84.2 (11.1)	84.3

*Café (*Coffea arabica*);eucalipto (*Eucalyptus deglupta*);brachiaria (*Brachiaria brizantha*), mangium (*Acacia mangium*), ratana (*Ischaemun indicum*). **El valor en paréntesis corresponde a la desviación estándar entre unidades de muestreo en el mismo sitio.

Fijación de carbono

Las tasas de fijación de C del componente arbóreo de los SAF con café y pastos variaron entre 0.3, para poró en asocio con café y 2.2 t ha⁻¹ año⁻¹ para mangium asociado con brachiaria (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fijación de carbono del componente arbóreo en sistemas agroforestales con café y pastos en Costa Rica.

Sistema agroforestal	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Tasa de fijación (t C ha ⁻¹ año ⁻¹)
Café-eucalipto* (4 años)	277	1.1
Café-eucalipto (6 años)	156	0.4
Café-eucalipto (8 años)	156	0.4
Café-poró (más de 10 años)	156	0.3
Brachiaria-eucalipto (3 años)	370	1.8
Brachiaria-mangium (3 años)	370	2.2

*Café (*Coffea arabica*);eucalipto (*Eucalyptus deglupta*);brachiaria (*Brachiaria brizantha*),mangium (*Acacia mangium*).

Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono

Cuando se consideró el componente arbóreo y el cultivo asociado en SAF con café y pastos se observó que la mayor valoración correspondió a café-eucalipto de cuatro años, con US\$84 ha⁻¹, y el de menor valor fue el

Cuadro 3: Valoración del servicio ambiental del almacenamiento de carbono en los árboles y el cultivo asociado en sistemas agroforestales en Costa Rica.

Sistema agroforestal	Almacenamiento de carbono arbóreo y del cultivo (t C ha ⁻¹)	Valor (US\$ t C ha ⁻¹)		
		10**	5	1.53
Café-eucalipto* de cuatro años	8.40	84	42	13
Café-eucalipto de seis años	7.10	71	35	10
Café-eucalipto de ocho años	7.43	74	37	11
Café-poró de más de 10 años	6.60	66	33	10
Brachiaria-mangium de tres años	8.90	89	44	13
Brachiaria-eucalipto de tres años	7.70	77	38	11

* Café (*Coffea arabica*);eucalipto (*Eucalyptus deglupta*);brachiaria (*Brachiaria brizantha*),mangium (*Acacia mangium*),ratana (*Ischaemum indicum*). **Valor por t C almacenado estimado en \$10 en proyectos internacionales, \$5 en proyectos de implementación conjunta,pero en la actualidad,solo se paga \$1.53.

café-poró, con US\$66 ha⁻¹ (Cuadro 3). Sin embargo, los productores solo reciben 15% del valor máximo posible para el almacenamiento de C o 30% si utilizamos como referencia proyectos de implementación conjunta; es decir, \$1.53 vs \$10 y \$5, respectivamente. Eso evidencia la situación desfavorable en que se encuentra el productor, debido a la ausencia de un sistema por pago de servicios ambientales más justo y diferenciado, debido a que no solamente afecta a los propietarios de los sistemas agroforestales, en caso de ofrecer en el futuro una valoración para este servicio dentro de estos sistemas, sino que afecta a los dueños de plantaciones forestales puras. Es improbable que los montos pagados (10-13 \$ ha⁻¹) sean suficientes para influir en las decisiones de manejo de los productores.

LITERATURA CITADA

- Alpizar, L; Fassbender, HW; Heuvelop, J. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba 35:233-242.
- Alvarado, J; López de León, E; Medina, M. 1999. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. Boletín PROMECAFE. (IICA) No. 81:7-14.
- Andrade, HJ. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. CATIE Turrialba, Costa Rica, CATIE. 83.
- Fassbender, HW; Alpizar, L; Heuvelop, J; Enriquez, G; Folsters, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) o poró (*Erythrina poeppigiana*), en Turrialba, Costa Rica. I Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba. 35:233-242.

CONCLUSIONES

Más del 89% del C almacenado en los sistemas agroforestales o monocultivos de café o pastos corresponde al C del suelo; éste varió entre el 90% (121 t C ha⁻¹) en un sistema agroforestal de café-eucalipto de ocho años a 99.9% (84 t C ha⁻¹) en una pastura natural de ratana. Las tasas de fijación de C del componente arbóreo tuvieron valores entre 0.4 y 2.2 t ha⁻¹ año⁻¹ y el aporte del componente arbóreo al total de C almacenado por el sistema, varió entre 1.2 %, para café-eucalipto de 6 años y 6.8 % para brachiaria-mangium. Los montos pagados en Costa Rica por almacenamiento de C (10-13 \$ ha⁻¹) no son suficientes para influir fuertemente en el uso de la tierra.

- Fournier, L. 1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. Boletín PROMECAFE. (IICA). No 71:7-13.
- Galloway, G; Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. CATIE, Turrialba, Costa Rica (Serie Técnica. Informe Técnico N° 285). 166p.
- IPCC. 2000. Uso de la tierra, cambio del uso de la tierra. Informe especial. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Montreal, Canadá. 24 p.
- Márquez, L. 1997. Validación de campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 45 p.
- Trouve, C; Mariotti, A; Schwartz, D; Guillet, B. 1994. Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pinus planted on savannas in Congo. Soil. Biol. Biochem. 26:287-295.