

Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima

Carbon Footprint in Key Agricultural Production Systems in the Municipality of Falan, Tolima

JOHN ALEXANDER UMAÑA

Zootecnista, MSc. en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana. Docente, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia
jarboleda@unisalle.edu.co

ABELARDO CONDE PULGARÍN

Zootecnista. Magíster en Diseño y Gestión de Procesos. Actualmente es profesor asistente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia
aconde@unisalle.edu.co

RESUMEN

En Falan, Tolima, se realizó un muestreo para estimar el almacenamiento y la emisión de carbono de los principales sistemas de producción agrícola, a fin de determinar cuáles eran más amigables con el medio ambiente. Se establecieron seis tratamientos: cacao monocultivo, aguacate plátano, cacao aguacate, cacao plátano, maíz en monocultivo y caña de azúcar en monocultivo. Para esto, se construyeron parcelas temporales de muestreo; se recolectaron datos de diámetro, altura total y diámetro a la altura del pecho y se implementaron modelos alométricos para determinar tC/ha de cada tratamiento. Adicionalmente, se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la implementación de fertilizantes nitrogenados utilizando factores de emisión del IPCC. El tratamiento que más fijó carbono fue el cacao en monocultivo (21,6 tC/ha/año), que fue 19% superior en comparación con otros tratamientos. La mayoría de los tratamientos evaluados tienen cantidades importantes de emisiones de carbono, pero en el balance los que tuvieron impacto positivo fueron los tratamientos cacao, aguacate-plátano y cacao-aguacate, que lograron una reducción de la contaminación por CO₂. El maíz y la caña de azúcar, por el contrario, tuvieron un balance negativo, pues en estos no se logró fijar nada de nitrógeno y sí emitieron CO₂ a la atmósfera. La implementación de sistemas agroforestales en la zona genera mayor importancia por la remoción de la contaminación atmosférica, lo que representa un valor agregado para los agricultores de la zona y para las futuras generaciones.

Palabras clave: sistemas agroforestales (SAF), huella de carbono, sistemas de producción, componentes de biomasa.

RECIBIDO: 08/04/2013 APROBADO: 05/09/2013

— Cómo citar este artículo: Umaña, J. A. y Conde Pulgarín, A. (2013). Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima. *Revista Ciencia Animal*, (6), 11-27.

ABSTRACT

A sampling was carried out in Falan, Tolima, to estimate storage and carbon emissions of the main agricultural production systems, seeking to determine which were friendlier to the environment. Six treatments were established: cocoa monoculture, avocado plantain, cocoa avocado, cocoa plantain, corn monoculture and sugarcane monoculture. For this purpose, temporary sampling plots were built; data on diameter, total height and diameter at breast height was collected, and allometric models were implemented in order to determine the tC/ha of each treatment. Furthermore, greenhouse gas emissions generated by the implementation of nitrogen fertilizers were estimated, using IPCC emission factors. The treatment that sequestered carbon the most was cocoa monoculture (21.6 tC/ha/year), which was 19% higher when compared with other treatments. Most of the evaluated treatments have significant amounts of carbon emissions, but in the balance, the ones that had a positive impact were the cocoa, avocado-plantain and cacao-avocado treatments, which achieved a reduction of CO₂ pollution. Corn and sugarcane, by contrast, had a negative balance, as they did not manage to sequester any nitrogen and they did release CO₂ into the atmosphere. The implementation of agroforestry systems in the area generates a greater importance for ending air pollution, which represents an added value for farmers in the area and for future generations.

Keywords: Agroforestry Systems, Carbon Footprint, Production Systems, Biomass Components.

Introducción

Las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), a causa del desarrollo industrial y las actividades humanas, han causado graves consecuencias en el ambiente, lo que ha generado un aumento en la temperatura global (IPCC, 2001). Los gases de efecto invernadero más importantes son el dióxido de carbono (CO₂), el ozono (O₃), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), los cuales son producidos por las actividades antropogénicas. Como es sabido, las actividades agrícolas son productoras de estos gases; sin embargo, los ecosis-

temas forestales y agroforestales pueden absorber cantidades significativas de carbono en biomasa y suelos (Andrade *et al.*, 2008). Por esto, el estudio de fijación de carbono, dependiendo del uso del suelo, desempeña un papel muy importante para la obtención de valores reales no solo de la fijación de carbono, sino del uso y emisión de contaminantes ambientales como los abonos nitrogenados.

El manejo tradicional de los sistemas productivos aumenta la contaminación atmosférica por la cantidad de emisiones de GEI que estas actividades producen. Sin embargo, y de acuerdo con Gobbi e

Ibrahim (2004), los sistemas agroforestales (SAF) bien diseñados y manejados son tecnologías alternativas que aportan un gran beneficio, ya que incrementan la producción y generan servicios ambientales. Estos sistemas fijan carbono en la biomasa de las plantas, reducen así su balance de gases de efecto invernadero o huella de carbono. En otras palabras, como lo afirman Beer *et al.* (2003), Dixon (1995), Schroeder (1994), Winjun *et al.* (1992), los SAF cumplen un papel relevante en la mitigación del calentamiento del planeta, ya que pueden almacenar entre 12 y 228 TM de carbono por hectárea, principalmente en la madera del componente leñoso.

Por esta razón también diferentes entidades, como la Fundación Solar en Guatemala, aseguran que los ecosistemas terrestres cumplen un papel importante en el ciclo global del carbono, ya que contribuyen a la conservación, la rehabilitación, la reforestación o la promoción de la agroforestería, debido a que el suelo almacena cantidades considerables de carbono y pueden tener un efecto positivo en la fijación del carbono (Stuar y Moura, 1998).

Según López *et al.* (2001), los sistemas forestales, agroforestales y silvopastoriles con el uso de especies nativas se han convertido en una herramienta eficaz para contrarrestar el aumento de

los GEI. Las especies arbóreas son de gran ayuda debido a que su crecimiento es continuo durante todo el año y por medio de la fotosíntesis acumulan una mayor cantidad de carbono en su biomasa. Adicionalmente, Acosta *et al.* aseguran que:

[...] los bosques, los SAF y las áreas de cultivo en ladera, juegan un papel importante en los procesos biogeoquímicos y, por lo tanto, en el ciclo global del carbono; desafortunadamente, a nivel mundial muchos de los ecosistemas de este tipo han sido alterados o destruidos a través del tiempo por la mano del hombre. (2001)

Se espera que estas actividades antropogénicas cambien mediante el aprovechamiento máximo de los SAF como sumideros de carbono atmosférico. En el sector de uso de la tierra se han identificado varias estrategias que pueden denominarse fijación de carbono y no emisión de carbono. En cuanto a la primera, se pueden incluir tratamientos silviculturales, agroforestería, reforestación y restauración de áreas degradadas, y en lo referente a la no emisión se incluyen las actividades de conservación de biomasa y suelo en áreas protegidas, manejo forestal sostenible, la protección contra fuegos, evitar al máximo quemas controladas y el uso eficiente de abonos.

14

Por lo anterior, se hace necesario estimar el carbono capturado, según el uso del suelo, y para esto se debe recurrir a técnicas de muestreo eficientes que arrojen resultados positivos en cuanto al secuestro de carbono. Adicionalmente, es necesario contabilizar las emisiones de GEI en estas actividades productivas y así estimar la huella de carbono de los sistemas en estudio.

Para este estudio es pertinente estimar el impacto de los sistemas según el uso del suelo en la huella de carbono atmosférico en el municipio de Falan, en el departamento de Tolima, y el impacto ambiental en la población de esa región en la implementación de dichos sistemas de producción. Con base en esto, se identifican cuáles usos del suelo pueden ser una buena alternativa para la población en cuanto a la reducción de la contaminación y el mejoramiento ambiental de la zona.

Resultados y discusión

Fijación de carbono en biomasa arriba del suelo

Para cada tratamiento se promediaron los datos de fijación contra la emisión de $tCO_2/ha/año$ para conocer su comportamiento, como se puede observar en la tabla 1, la tendencia de fijación para los tratamientos con cacao, aguacate-plátano y cacao-aguacate era mayor en compa-

ración con los datos de emisión, se pudo establecer que estos tratamientos tenían mejor comportamiento en cuanto a la disminución de la contaminación por CO_2 a la atmósfera en su etapa de producción; se instauró así un balance positivo para los primeros tres tratamientos.

Al considerar solo el carbono en biomasa de los sistemas según uso del suelo, se puede evidenciar que el tratamiento con cacao en monocultivo fijó más carbono que el resto de los tratamientos, con una tasa de fijación de $21,6 tC/ha/año$, lo cual fue un 19% superior en comparación con los SAF cacao-aguacate y SAF aguacate-plátano y cacao-plátano, respectivamente (figura 1).

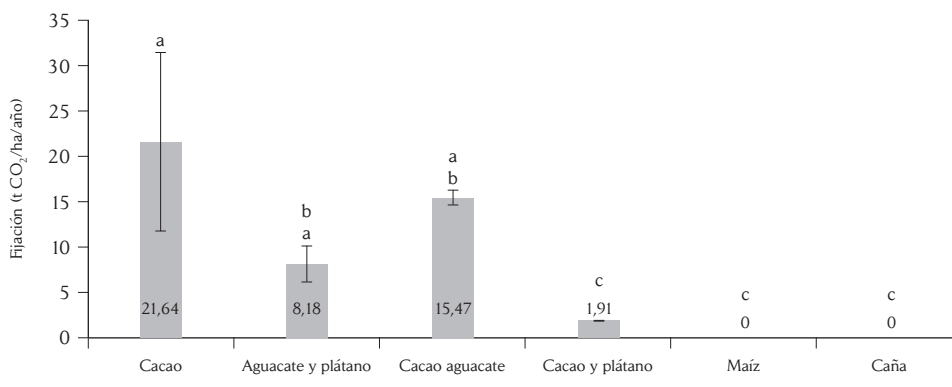
También se puede observar que aunque no se presentaron diferencias estadísticamente significativas, fueron los tratamientos cacao y cacao-aguacate los que registraron una buena fijación de carbono, lo que se corrobora con estudios realizados por Andrade *et al.* (2008) en Costa Rica, quienes determinaron que los cultivos en asocio con cacaotales almacenan mayor cantidad de carbono. Estudios realizados por el grupo de investigación Agroxue (2012), de la Universidad Nacional sede Medellín, reportan que aunque se considera que los cultivos forestales son los principales captadores de carbono, los cultivos agrícolas también hacen grandes fijaciones de este. Ese es el caso del cacao, que, además de

Tabla 1. Correlación de datos promedios de fijación, emisión y balance en tCO₂/ha/año en cada tratamiento

Tratamiento	Fijación (tCO ₂ /ha/año)	Emisión (tCO ₂ /ha/año)	Balance (tCO ₂ /ha/año)
Cacao	21,6	2,6	57,1
Aguacate-plátano	8,2	2,7	16,5
Cacao-aguacate	15,5	1,3	42,4
Cacao-plátano	1,9	2,7	-2,3
Maíz	0,0	0,7	-2,1
Caña	0,0	1,3	-4,0

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Fijación de carbono en biomasa arriba del suelo en los sistemas de producción agrícolas más dominantes de Falan, Tolima



Nota: Las barras de error corresponden a error estándar. Los tratamientos con diferente letra son diferentes estadísticamente (p<0,05)

Fuente: elaboración propia.

la obtención de chocolate, puede servir para producir biomasa. Adicionalmente, estudios realizados por Concha *et al.* (2007), en Perú, señalan que los sistemas agroforestales de cacao asociados con especies forestales maderables y frutales son los sistemas que presentan mayor eficiencia en la fijación de carbono en comparación con los sistemas tradicionales de uso de la tierra (figura 1).

Es importante anotar que los cultivos tradicionales como el maíz y la caña fueron cultivos que no presentaron fijación de carbono y que no tienen ninguna importancia en términos de reducción de CO₂ en comparación con los cuatro primeros tratamientos que muestran un índice de fijación positiva (+C; figura 1), dado que para este estudio se tuvo en cuenta la biomasa de especies leñosas

16

arriba del suelo para fijación; es por esto que los datos aparecen como fijación 0.

Emisión de carbono en biomasa arriba del suelo

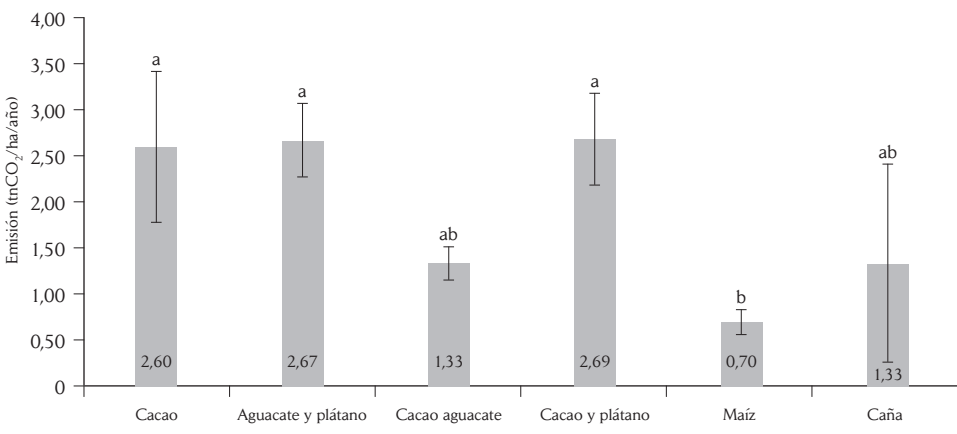
Teniendo en cuenta la emisión de carbono arriba del suelo en los sistemas de producción, se puede observar en la figura 2 que los tratamientos cacao monocultivo, aguacate y plátano y cacao y plátano no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), pues presentan un rango similar de emisiones. El cacao-aguacate y el cultivo de caña presentan entre ellos similitud en las emisiones, teniendo en cuenta que estas emisiones, en su gran mayoría, son generadas por las prácticas tradicionales agrícolas, de acuerdo con la cantidad de fertilizantes nitrogenados utilizados en su

etapa de producción, y por la utilización de combustibles fósiles en su proceso productivo.

En la figura 3 se puede determinar la composición porcentual de los aportes de las emisiones en el uso de combustibles por labores agrícolas, evidenciando que el tratamiento que más aporta emisiones por el uso de combustibles es el del aguacate-plátano con un 90,8%, lo cual es representativo en la cantidad de emisiones de GEI a la atmósfera, seguido del tratamiento cacao-aguacate, con un 27,8%, y el del maíz, que demuestra una cantidad alta de emisiones si se tiene en cuenta el balance negativo.

Según un estudio de caso realizado en Brasil por Esmap (2010) sobre desarrollo con bajas emisiones de carbono, se de-

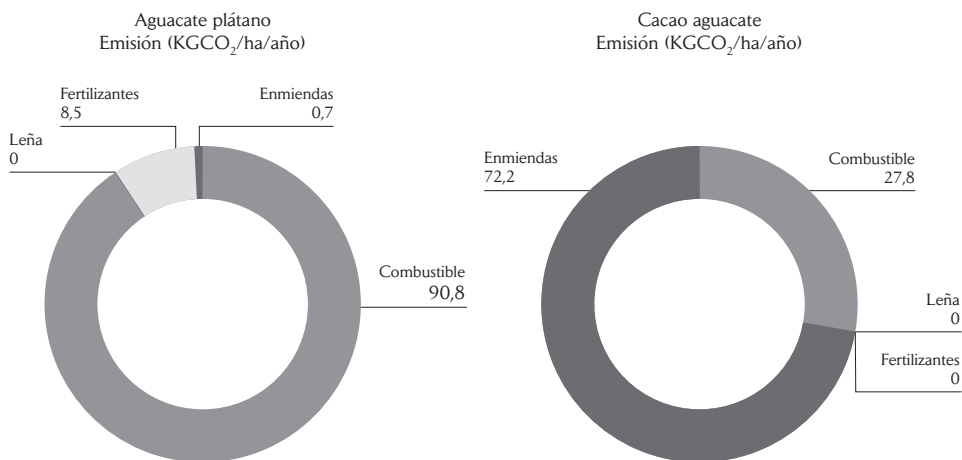
Figura 2. **Emisión de carbono en biomasa arriba del suelo en los sistemas de producción agrícolas más dominantes de Falan, Tolima**



Nota: Las barras de error corresponden a error estándar. Tratamientos con diferente letra son diferentes estadísticamente ($p < 0,05$)

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Composición porcentual de los aportes de las emisiones por la utilización de combustible, leña fertilizante y enmiendas



Fuente: elaboración propia.

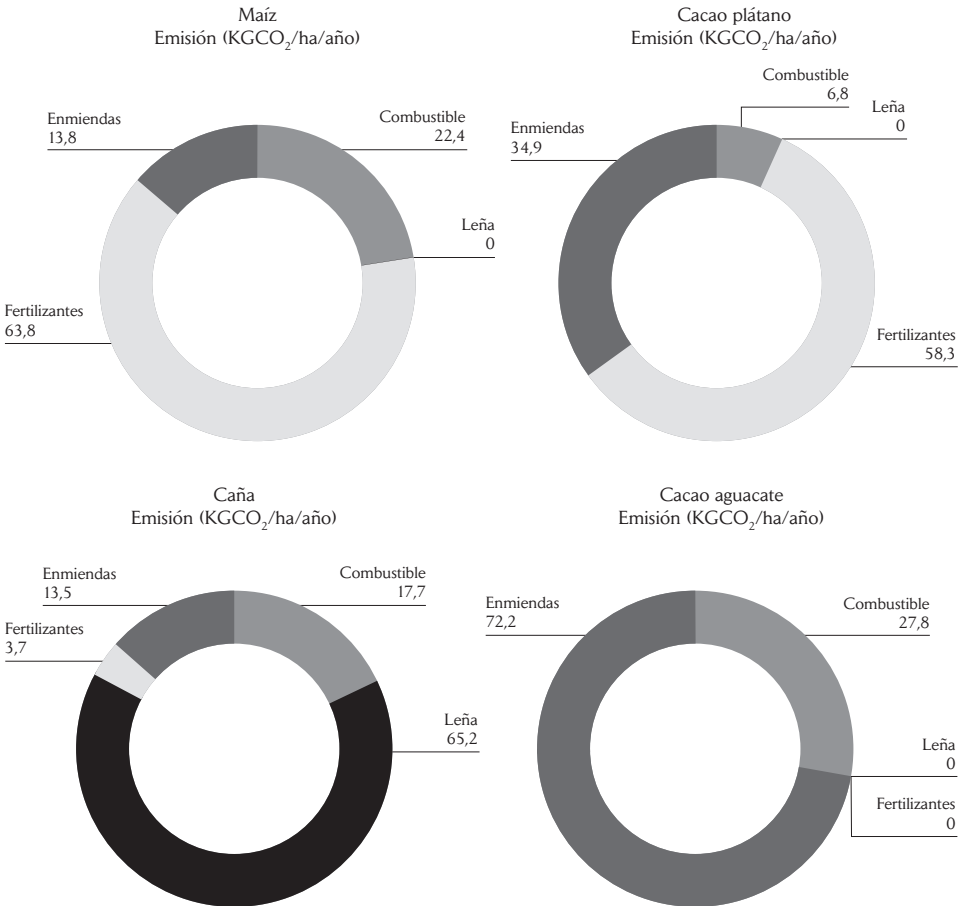
terminó que disminuyendo las prácticas tradicionales se podrían reducir las emisiones netas generadas por variaciones en el stock de carbono y el uso de equipos que utilizan combustibles fósiles, lo que garantiza la retención de nutrientes en el suelo y la capacidad de retención del agua, de esta manera se logra reducir la pérdida de suelos.

Zambrano *et al.* (2004) aseguran que en cultivos convencionales hay perturbación de la tierra y del ambiente, lo que disminuye la fertilidad y aumenta la contaminación del ambiente; pero para que el secuestro de carbono sea más efectivo se requieren prácticas de manejo adecuadas como la no aplicación de fertilizantes químicos ni la utilización de plaguicidas.

En la figura 4 se evidencian los aportes de las emisiones por la utilización de los fertilizantes nitrogenados, y se demuestra que los tratamientos de maíz, cacao y cacao-plátano son los que más aportan emisiones por la utilización de fertilizantes nitrogenados. Cabe aclarar que en estos resultados se evidencian unos aportes altos de emisiones por las actividades tradicionales agrícolas, lo cual podría afectar la fertilidad en suelos y contribuir a la contaminación del ambiente.

En la figura 5 se puede observar la composición porcentual de los aportes de las enmiendas en cada tratamiento por labores agrícolas y se evidencia que los tratamientos que más aportes tienen de emisiones fueron cacao-aguacate, con un 72%; seguido de cacao-plátano, con

Figura 4. **Composición porcentual de los aportes de las emisiones por la utilización de combustibles, leña fertilizante, nitrogenados y enmiendas**



Fuente: elaboración propia.

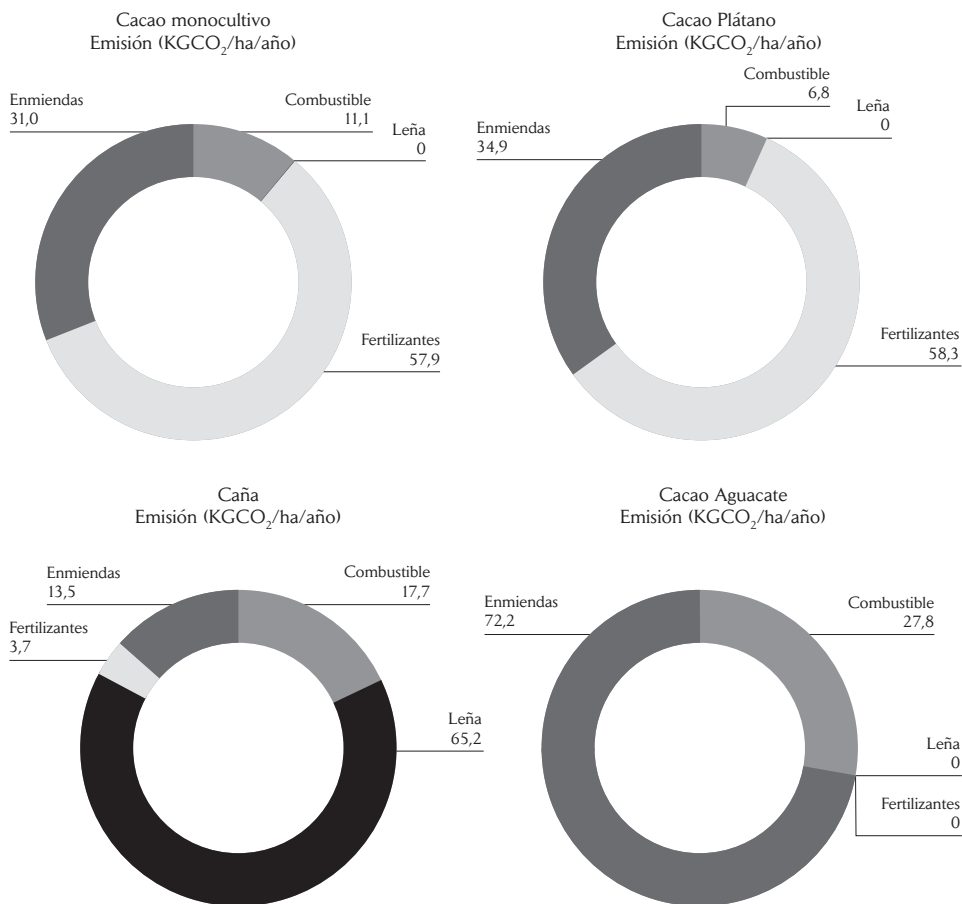
un 34,9%, y el cacao, con un 31 %, lo que demuestra que los aportes de las emisiones por las diferentes actividades agrícolas son altos, teniendo en cuenta que en su gran mayoría para los productores son necesarias en su etapa de producción, aunque resulta ser favorable para los primeros tres tratamientos que demuestran un balance positivo en cuan-

to a fijación contrala emisión de CO₂ a la atmósfera (figura 5).

Balance de carbono en biomasa arriba del suelo

La figura 6 presenta el balance de carbono en biomasa arriba del suelo y se observa que los tratamientos que pre-

Figura 5. Composición porcentual de los aportes de las emisiones por la utilización de enmiendas en cada tratamiento

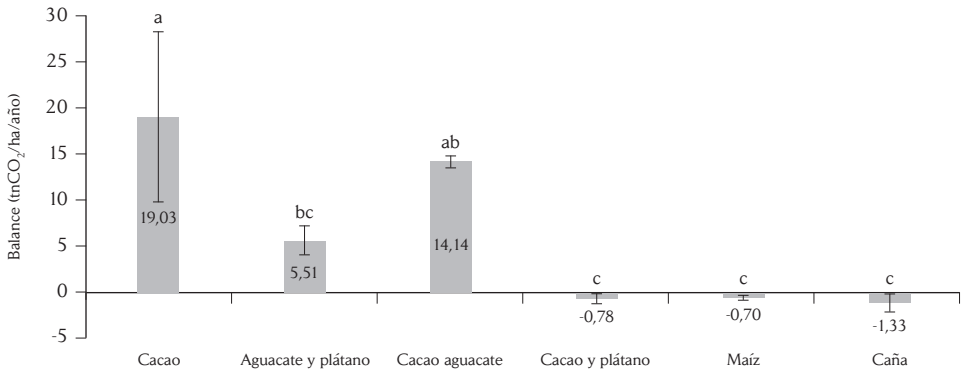


Fuente: elaboración propia.

sentaron un comportamiento positivo de carbono fueron el cacao, el aguacate-plátano y el cacao-aguacate, los cuales lograron una reducción de la contaminación atmosférica por CO₂ al ser más eficiente por el aprovechamiento que hacen los sistemas arbóreos en la fijación para su desarrollo. También es importante resaltar que los cultivos de cacao y

plátano-maíz y caña de azúcar tuvieron un balance negativo, pues en ellos no se fija el carbono y sí logran emitir una cantidad considerable de CO₂, debido a la utilización de abonos nitrogenados para su producción (figuras 4, 5 y 6). Con base en esto, se puede determinar que los sistemas tradicionales pueden ser rentables para los agricultores, pero

Figura 6. Balance de carbono en biomasa arriba del suelo en los sistemas de producción agrícolas más dominantes de Falan, Tolima



Nota: Las barras de error corresponden a error estándar. Tratamientos con diferente letra son diferentes estadísticamente ($p < 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

cuando se tiene en cuenta el daño o el aporte de emisiones al medio ambiente, la situación es negativa.

Ortiz y Riascos (2006) afirman que los sistemas agroforestales con cacao tienen una alta capacidad de almacenar y fijar carbono, lo cual podría aprovecharse para garantizar un adecuado manejo de suelo y ambiente y, adicionalmente, lograr obtener un pago por servicios ambientales. Por otro lado, Robert (2002) corrobora que los sistemas agroforestales bien manejados pueden ser viables desde un punto de vista económico, lo que es de suma importancia para lograr cambiar la objetividad de los productores, debido a que el sistema es competitivo siempre y cuando presente un beneficio económico, que sea rentable y viable en el mercado.

El balance de la fijación y las emisiones de CO₂ equivalente en la zona de estudio aporta al desarrollo sustentable regional debido a que los resultados obtenidos destacan la importancia y la necesidad de implementación de los sistemas agroforestales SAF para la remoción del carbono atmosférico, sin dejar a un lado las ganancias económicas de los productores.

Análisis costo marginal

La tabla 2 señala el análisis financiero donde se puede observar que el sistema de producción de aguacate y plátano obtuvo una alta rentabilidad, dado que los ingresos por ventas corresponden a un margen de veinte millones de pesos/ha/año. Los sistemas más comunes, como lo son cacao en monocultivo y cacao aguacate, tienen un margen bruto nega-

Tabla 2. **Análisis costo marginal de los principales sistemas de producción agrícola de Falan, Tolima**

Sistema de producción	Ingresos por ventas	Costos de operación	Ingresos netos
	\$ millones/ha/año		
Aguacate y plátano	26,53 ± 0,13 a	5,84 ± 0,41 b	20,69 ± 0,33 a
Caña	7,23 ± 0,73 b	0,88 ± 0,27 c	6,35 ± 0,92 b
Maíz	6,63 ± 0,59 b	2,23 ± 0,11 c	4,40 ± 0,69 b
Cacao y plátano	6,43 ± 0,67 b	5,69 ± 0,24 b	0,74 ± 0,50 c
Cacao	3,17 ± 0,44 c	6,21 ± 0,70 b	-3,04 ± 0,61 d
Cacao y aguacate	4,11 ± 0,37 c	9,29 ± 2,12 a	-5,18 ± 2,41 d

Nota. Los valores corresponden a promedios ± error estándar. Valores con letras diferentes indican diferencias estadísticas (p < 0,05).

Fuente: elaboración propia.

tivo (tres y cinco millones de pesos/ha/año, respectivamente), pero sirven para la generación de empleo, pues la mayoría de productores no tienen en cuenta los costos de producción, sino el precio de venta del producto, aunque este también fluctúa (\$4800 o 5000/kg).

Es importante recalcar que la fijación más alta de carbono se obtuvo en sistemas de cacao monocultivo y cacao-aguacate; siendo estos los sistemas con ingresos netos negativos, lo cual no quiere decir que no sean sistemas rentables, sino que deben ser reorganizados en cuanto al uso de insumos y aprovechados ambientalmente por la ventaja que tienen al ser sistemas fijadores (+C). Los sistemas tradicionales como el cultivo de maíz y caña son una buena opción productiva ya que obtienen un buen margen de producción y los costos de operación son

menores en comparación con el cultivo del aguacate y el cacao.

Cambiar el uso de la tierra requiere de un análisis muy importante, sin dejar a un lado la rentabilidad y las costumbres de los campesinos, pues ellos no logran entender la factibilidad que tienen diferentes sistemas de producción que secuestran altas cantidades de carbono, y que, adicional a esto, muchos podrían obtener servicios ambientales por implementar cultivos más amigables con el medio ambiente.

Análisis de costo de oportunidad

El costo de oportunidad de cambiar el uso del suelo para fijar carbono requeriría de inversión, pues para pasar a cultivar aguacate-plátano es necesario au-

22

mentar los costos, lo cual sería un cambio ideal y amigable con el medio ambiente porque se aumentaría el secuestro de carbono y se estaría garantizando el incremento en los ingresos netos de una producción (tabla 3).

Para cambiar el uso de la tierra a cualquiera de los sistemas que sean viables en la fijación de carbono, se necesitarían pagos altos por estos servicios, pues aún no existe la tendencia de que los agricultores de la zona estén dispuestos a invertir en un cultivo que mitigue cantidades altas de CO₂ existentes por la contaminación en el ambiente; los sistemas que emplean menos costos y obtienen más carbono tendrían que invertir más al cambiar a un cultivo que sea factible con el secuestro de carbono. El costo de oportunidad de cambiar cacao y plátano a aguacate y plátano para secuestrar más carbono es de 3,2 millones de pesos,

aunque resulta ser una inversión elevada para un agricultor, este se beneficiaría, pues el cultivo, en términos de fijación y emisión, presentaría un balance positivo de (+C) y garantiza que aporta a la reducción de GEI.

Si los productores de caña de azúcar de la zona cambiaran a cultivar cacao y cacao-aguacate (sistemas con mayor fijación de carbono) se debería pagar entre \$0,5 y \$0,7 millones/tC, por lo que los productores de maíz y caña de azúcar recibirían montos menores si cambian a cultivo de cacao-aguacate porque tienen bajos beneficios financieros en la producción.

El costo de oportunidad de cambiar de plátano a cualquier otro uso del suelo para secuestrar carbono es muy superior al encontrado en sistemas silvopastoriles, con costos entre 3,3 y 26,4US\$ tC/ha,

Tabla 3. Costo de oportunidad (\$millones/tC) del cambio de uso del suelo para la fijación de carbono en fincas del municipio de Falan, Tolima

Uso actual	Uso futuro					
	Cacao	Aguacate/plátano	Cacao/aguacate	Cacao/plátano	Maíz	Caña
Cacao	-	-1,8	0,4	-0,2	-0,4	-0,5
Aguacate/plátano	-1,8	-	-3,0	3,2	2,6	2,1
Cacao/aguacate	0,4	-3,0	-	-0,4	-0,6	-0,7
Cacao/plátano	-0,2	3,2	-0,4	-	46,6	-10,2
Maíz	-0,4	2,6	-0,6	46,6	-	-3,1
Caña	-0,5	2,1	-0,7	-10,2	-3,1	-

Nota. Las casillas sombreadas indican necesidad de pago por el incremento de secuestro de carbono.

Fuente: elaboración propia.

de acuerdo con Ruiz (citado en Andrade, 2008). Sin embargo, el cambio de uso del suelo para aprovechar la cantidad de carbono capturado por los árboles no llama la atención a los agricultores de la zona porque adicionalmente de los beneficios que se obtienen, deben incurrir en gastos de administración, monitoreo, certificación y comercialización, y no tendrían rentabilidad en su sistema de producción.

Conclusiones

Los cultivos de cacao, aguacate-plátano y cacao-aguacate, evaluados en este trabajo, demostraron un balance positivo en cuanto a la fijación y emisión de carbono; los cultivos herbáceos como el maíz y la caña no fueron amigables con el medio ambiente, porque no fijaron carbono, pero sí emitieron altas cantidades de GEI, dado que utilizan altas cantidades de fertilizantes nitrogenados en su proceso productivo. Los sistemas que presentaron mayor fijación de carbono fueron cacao y cacao-aguacate, y el que presentó mayor cantidad de emisiones, teniendo en cuenta la fijación, fue el sistema de cacao y plátano, que representa un balance negativo de carbono.

El cultivo de aguacate y plátano fue el sistema más rentable, pues representa ingresos netos de veinte millones de pesos, aproximadamente, lo cual significa no so-

lo una buena alternativa económica para el campesino, sino que resulta ser una opción amigable con el medio ambiente, este último dato es el más importante si se quiere recibir beneficios o pagos por el servicio ambiental que ofrece este tipo de sistemas y, más aún, para una zona agrícola tan importante como la del norte del Tolima.

Los sistemas que no resultaron ser favorables económicamente en este estudio fueron el cacao monocultivo y el cacao-aguacate, porque presentaron ingresos netos negativos, ya que los costos de operación resultaron ser muy elevados por las altas cantidades de abonos nitrogenados que utilizan, aunque es relevante indicar que estos sistemas fueron ambientalmente amigables, pues almacenaron altas cantidades de carbono en su producción.

Los resultados demuestran claramente la necesidad de incluir medidas o estrategias para aprovechar diferentes usos del suelo en la captación y secuestro de carbono presente en la atmósfera. En este análisis no fue posible determinar el pago por servicios ambientales, dado que habría que pagar a los productores con el fin de asumir el cambio a los cultivos más amigables con el medio ambiente, lo cual es poco factible con los precios del carbono y los costos tan altos de producción.

Referencias

- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J. y Monreal, C. (2001). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera de México. *Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*.
- Agroxue Grupo de Investigación. (2012). *Cultivo de cacao, ideales para reducir CO₂ en el ambiente*. Medellín: En: Agencia de noticias UN. Consultado en febrero 18 de 2012. Disponible en: www.agencia-denoticias.unal.edu.co
- Albrecht, A. y Kandji, S. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 15-27.
- Alcaldía de Falan, Tolima. (2011). *Plan de Ordenamiento Territorial Falan, Tolima 2011*. Recuperado el 9 de febrero de 2010 de <http://www.falan-tolima.gov.co/sitio.shtml?apc=mTxx-1-&m=f#geografia>
- Alegre, J. y Ricse, A. (2000). *Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía peruana*. Recuperado el 7 de febrero de 2010 de <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/vbconfe7.htm>
- Amézquita, M. *et al.* (2005). Carbon sequestration in pastures, silvo-pastoral systems and forests in four regions of the Latin American tropics. *Journal of Sustainable Forestry*, 25, 31-49.
- Amézquita, M. *et al.* (2006). *Almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres para mitigar el cambio climático global*. Recuperado el 11 de agosto de 2011 de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A5409e/A5409e.pdf>
- Andrade, H. e Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Revista Agroforestería en las Américas*, 10(39-40), 109-116.
- Andrade, H. y Segura, M. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Revista Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.
- Andrade, H., Brook, R. e Ibrahim, M. (2008). Growth production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Journal Plant and Soil*, 308(1-2), 11-22.
- Andrade, H., Segura M., Somarriba E. y Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbón por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Revista Agroforestería de las Américas*, 46, 45-50.
- Apps, M. (2003). *Bosques, el ciclo mundial del carbono y el cambio climático*. Recuperado el 11 de abril de 2011 de <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS14-S.HTM>
- Arias, A. (2009). *Cambio climático y seguridad alimentaria: desafíos para la gestión ambiental en Risaralda y ecorregión del eje cafetero*. Recuperado el 11 de abril de 2011 de <http://www.ecoportal.net/content/view/full/89422>

- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E. y Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10, 80-87.
- Botero, J. (1999). *Los sistemas silvopastoriles como sumideros de CO₂. Avances en agroforestería pecuaria en el departamento de Antioquia*. Recuperado el 11 de abril de 2011 de <http://www.agronet.gov.co>
- Cifuentes, J. (2010). *ABC del cambio climático en Mesoamérica*. Costa Rica: Catie.
- Concha, J., Alegre, J. y Pocomucha, V. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de theobroma cacao l en el departamento de San Martín, Perú*. Lima: Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- De Jong, B. *et al.* (1995). Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas. *Inter-ciencia*, 20, 409-416.
- Dixon, K. (1995). Sistemas agroforestales y gases de invernadero. *Agroforestería en las Américas*, 2(7), 22-26.
- Energy Sector Management Assistance Program (Esmap). (2010). *Estudio de caso sobre desarrollo con bajas emisiones de carbono*. Recuperado el 12 de septiembre de 2012 de http://www.esmap.org/esmap/sites/esmap.org/files/2011000172SPAspa001_LowRes.pdf
- Falkowski, P. *et al.* (2000). The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Journal Science*, 290, 291-296.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). *Análisis de la huella de carbono en la producción y la exportación del banano*. Segunda Conferencia del Foro Mundial Bananero, Guayaquil, Ecuador. Recuperado el 17 de febrero de 2012 de <http://www.fao.org>
- Gobbi, J. e Ibrahim, M. (2004). Creating win-win situations: the strategy of paying for environmental services to promote adoption of silvopastoral systems. In L'T Mannelje, L. Ramírez, M. Ibrahim, C. Sandoval, N. Ojeda y J. Ku (eds.), *The importance of silvopastoral system in rural livelihoods to provide ecosystem services. Proceedings of the second international symposium on silvopastoral systems* (pp. 98-101). Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- González, F., Concha, I., Vallejo, J. y Rodríguez, H. (1997). Inventario preliminar de gases efecto invernadero en Colombia fuentes y sumideros. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 21(79), 107-117.
- Gutiérrez, B. y Fierro, L. (2006). *Diagnóstico y diseño participativo en sistemas agroforestales*. Recuperado el 9 de febrero de 2011 de <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Archivos/Foros/Conceptosb-sicos.pdf>
- Houghton, R. (2003). ¿Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, 9(4), 500-509.
- Instituto Cristiano de Promoción Campesina (Icproc). (1998). *Sistemas agroforestales*. Recuperado el 1 de abril de 2010 de <http://www.agronet.gov.co/www/>

- docs_si2/20061024161735_Los%20 sistemas%20agroforestales.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), (2010). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia*. Bogotá, Colombia: Ideam.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2000). *Informe especial del IPCC uso de la tierra, cambios de uso de la tierra y silvicultura*. Recuperado el 15 de octubre de 2008 de <http://www.ipcc.gov.ch>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001). *Climate Change Synthesis Report: A Summary for Policymakers*. Panel on Climate Change Wembley, UK, Intergovernmental. Recuperado el 27 de octubre de 2008 de <http://www.ipcc.gov.ch>
- Intergovernmental Panel on Climate Change Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Recuperado el 27 de octubre de 2008 de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- López, J. et al. (2001). *Características fotosintéticas de cinco especies forestales*. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Musálem, S. (2001). *Sistemas agrosilvopastoriles*. México: Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales.
- Nair, P. (1993). *Agroforestry systems in the tropics* (2nd ed.). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Navarro, M. y Mendoza, I. (2006). *Guía técnica del cultivo de cacao en sistemas agroforestales*. Nicaragua: Programa para el Desarrollo Rural en Nicaragua.
- Ortiz, A. y Riascos, L. (2006). *Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao Theobroma cacao l y Laurel cordia alliodora (ruiz & pavón) oken en la reserva indígena de Talamanca*. Costa Rica: Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Ingeniería Agroforestal, San Juan de Pasto.
- Pabón, J. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, XII(1-2), 111-119.
- Pabón, J. (2005). *El cambio climático en Colombia*. Recuperado el 20 de marzo de 2013 de www.idea.unal.edu.co
- Pezo, D. e Ibrahim, M. (1996). *Sistemas silvopastoriles, una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos*. Pastoreo Intensivo en Zonas Tropicales, Primer Foro Internacional. FIRA, Banco de México, Veracruz, México.
- Quiñónez, L. (2010). *Gestión forestal urbana como mecanismo de captura de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana* (tesis de maestría inédita). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Ramírez, W. (s. f.). *Manejo de sistemas agroforestales*. Recuperado el 2 de marzo de 2011 de <http://www.ibcperu.org/doc/isis/6533.pdf>

- Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Schoroeder, P. (1994). Carbon storage benefits of agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 27, 89-97.
- Somarriba, E. et al. (2008). El proyecto captura de carbono y desarrollo de mercados ambientales en cacaoales y otros sistemas agroforestales indígenas en Talamanca, Costa Rica. *Revista Agroforesteria en las Américas*, 10(46), 8-13.
- Stuar, M. y Moura, P. (1998). *Climate change mitigation by forestry: A review of international initiatives. Policy that works for forests and People Series No. 8. Discussion paper*. London: International Institute for Environment and Development.
- Valdés, Y. (2011). *Valoración de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en la finca forestal integral "El aguacate"*. 5to Congreso Forestal de Cuba.
- Vallejo, A. (2008). *Cuantificación de carbono en proyectos REDD, seminario-taller metodologías experiencias y perspectivas latinoamericanas*. Costa Rica: CATIE Turrialba.
- Vallejo, O., Mendoza, M. y Sanquetta, C. (2011). *Impacto del cambio climático en modelos de captura de carbono*. Recuperado el 15 de noviembre de 2011 de <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0155-B2.HTM>
- Winjun, J. K., Dixon, R. K. y Schroeder, P. E. (1992). *Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. Proceedings of the "Natural sinks of carbon dioxide"*. Workshop held in Palmas del Mar, Puerto Rico.
- Zambrano, A., Franquis, F. e Infante, A. (2004). Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. *Revistas Forestal*, 35,11-20.

