

HUELLA DE CARBONO EN CADENAS PRODUCTIVAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) CON DIFERENTES ESTÁNDARES DE CERTIFICACIÓN EN COSTA RICA

MILENA A. SEGURA¹
HERNÁN J. ANDRADE²

Recibido el 15 de agosto de 2012 y aprobado el 29 de
noviembre de 2012

RESUMEN

Se estudió el impacto en la producción de café con diferentes estándares de certificación (producción convencional, producción orgánica –NOP y Unión Europea-, UTZ Kapeh, Comercio Justo, Rainforest Alliance y CAFE Practices) sobre la huella de carbono en Costa Rica. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se estimaron en nueve fincas y ocho empresas procesadoras del grano. Se estimó la fijación de carbono en biomasa total, en árboles de sombra y cafetos, midiendo las plantas, empleando modelos de biomasa y factores de expansión de biomasa, una fracción de carbono de 0,5 e indagando a productores sobre la edad de los componentes del sistema. Se emplearon factores de emisión recomendados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Los sistemas de producción fijaron entre 5,0 y 17,6 t CO₂e/ha/año, sin un efecto de los estándares de certificación. La actividad que más emite GEI fue la fertilización nitrogenada (63-82% del total de emisiones). Las dos procesadoras con menor emisión de GEI (156 y 187 kg CO₂e/t café verde) son aquellas que emplean la energía solar para secar parcialmente el café. La cadena de producción de café en Costa Rica mostró ser amigable con el medio ambiente, al fijar netamente entre 2,4 y 13,0 kg CO₂e/kg de grano de café verde (en promedio 7,6 kg CO₂e/kg de café verde y 8,1 t CO₂e/ha/año). No se encontró impacto de los estándares de certificación pero si de los componentes del sistema en la huella de carbono en la cadena de producción de café.

PALABRAS CLAVE:

Biomasa, combustibles fósiles, fertilización nitrogenada, mitigación, procesamiento.

CARBON FOOTPRINTS IN THE COFFEE (*Coffea arabica*L.) PRODUCTIVE CHAINS WITH DIFFERENT CERTIFICATION STANDARDS IN COSTA RICA

ABSTRACT

The impact in coffee production with different certification standards (conventional production, organic production – NOP and European Union-, UTZ Kapeh, Fairtrade, Rainforest Alliance and CAFE Practices) on Carbon Footprint in Costa Rica was studied. The greenhouse gas emissions (GHG) were estimated in nine farms and eight grain processing industries. Carbon fixation was estimated in total biomass in both shade trees and coffee bushes by measuring the plants, using biomass models and biomass expansion factors, a 0.5 fraction of carbon and asking producers about the age of the components in the system. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) recommended emission factors were used. The production systems fixed between 5,0 and 17,6 t CO₂e/ha/year, without an effect of the certification standards. The activity emitting more GHG was nitrogenated fertilization (63-82% of total emissions). The two grain processing industries with less GEE emissions (156 and 187 CO₂e/t green coffee) are those using solar energy for partial coffee drying. The coffee production chain in Costa Rica showed to be friendly with the environment while fixing a net between 2.4 and 13.0 kg CO₂e/kg of green coffee grain (7.6 kg CO₂e/kg of green coffee average and 8.1 t CO₂e/ha/year). Impact on the certification standards was not found but it was found in the system components of the carbon footprint in the coffee production chain.

KEY WORDS:

Biomass, fossil fuel, nitrogenated fertilization, mitigation, processing

INTRODUCCIÓN

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), desde la era industrial, ha acrecentado el cambio climático global (IPCC, 2003). Los GEI más importantes son el vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), siendo los últimos cuatro los más afectados por las actividades antropogénicas. Las actividades agrícolas contribuyen con el 13,5% de las emisiones mundiales de GEI (IPCC, 2007), producto del CH₄ y N₂O (Johnson;

Fransluebbbers; Weyers & Reicosky, 2007), provenientes de la fermentación entérica, producción bajo inundación y fertilización nitrogenada. Sin embargo, los sistemas forestales y agroforestales pueden absorber cantidades significativas de carbono en la biomasa y el suelo (Albrecht & Kandji, 2003; Amézquita; Ibrahim; Llanderal; Buurman & Amézquita, 2005; Andrade; Brook & Ibrahim, 2008; Beer, *et al.* 2003; Montagnini & Nair, 2004; Oelbermann; Voroney & Gordon, 2004; Soto-Pinto, Anzueto; Mendoza, Jiménez-Ferrer & De Jong, 2010) y mitigar el problema del cambio climático. Dicho servicio ambiental generado por estos ecosistemas puede ser sujeto de pago por servicios ambientales.

Los pagos por servicios ambientales incluyen el esquema basado en productos, en los cuales los consumidores pagan una prima "verde" sobre el producto que está certificado como amigable con el medio ambiente. Es decir, los consumidores finales del producto están pagando por un beneficio ambiental de tales sistemas de producción. En este esquema, se puede incluir la producción de café orgánico con sombrero (Wunder, 2007). En el Mundo, existen alrededor de 25 millones de productores de café (Giovannucci & Koekoek, 2003); no obstante, la producción de café certificado, tal como el Comercio Justo, orgánico y ecológico, es aún pequeña (menos del 2%) en los mercados más desarrollados (Japón y mayoría de mercados europeos), pero incluyen beneficios adicionales a los 750 mil hogares y las industrias en toda la cadena de producción (Giovannucci & Koekoek, 2003). Los actuales programas de certificación de café se dividen en tres tipos, los cuales no son mutuamente excluyentes: orgánicos, Comercio Justo y de sombrero. Tales esquemas de certificación promueven la protección de la biodiversidad y podrían mejorar los medios de vida de los agricultores (Philpott; Bichier; Rice & Greenberg, 2007).

Los estándares de certificación no incluyen indicadores específicos sobre la huella de carbono a nivel de finca; aunque, todos los estándares evaluados (UTZ Kapeh, Comercio Justo, Producción Orgánica –NOP y Unión Europea-, Rainforest Alliance y CAFE Practices) promueven la conservación ambiental, tal como la fertilización orgánica, la prevención de la erosión y el uso eficiente de maquinaria (Cuadro 1). Los estándares de Comercio Justo, UTZ Kapeh, Producción Orgánica y CAFE Practices incluyen el mantenimiento o mejoramiento de la cobertura arbórea a nivel de finca y plantación de café. La certificación de Rainforest requiere de más de un 40% de sombra de al menos 70 individuos por hectárea, de un mínimo de 12 especies nativas, con dos o más estratos. La huella de carbono en la etapa de procesamiento podría ser

afectada por los requerimientos de los estándares de Comercio Justo, UTZ Kapeh y CAFE Practices, las cuales promueven el uso de energía renovable incluyendo la radiación solar y la quema de leña proveniente de la poda de árboles de sombra.

Este estudio desarrolló una metodología para estimar el impacto de los sistemas y estándares de certificación de la producción de café en Costa Rica en la huella de carbono. La huella de carbono en este estudio incluye el secuestro de carbono en biomasa total y las emisiones de GEI a nivel de finca y procedentes del procesamiento para obtener café oro. Este estudio es de gran relevancia porque además se enmarca en la política nacional de Costa Rica de alcanzar la neutralidad de carbono para el 2021.

MATERIALES Y MÉTODOS

La huella de carbono de la cadena productiva de café en Costa Rica fue calculada con base en mediciones de árboles de sombra y arbustos de café en pie y en estimados de emisiones GEI en las actividades de manejo en los cafetales y del procesamiento del grano. La huella de carbono se basó en sistemas de producción de café ya establecidos, por lo cual sólo se consideraron las emisiones de GEI generadas en el manejo del sistema de producción.

Cuadro 1. Resumen de los estándares de certificación evaluados con base en actividades que impacten la huella de carbono en la producción de café.

Esquema de certificación	Uso de energía	Uso de fertilizantes nitrogenados	Manejo de vegetación en cafetales
UTZ Kapeh	Prácticas para minimizar erosión. Uso eficiente de energía, energía solar si es posible y leña de podas.	Uso de especies fijadoras de nitrógeno	Uso de árboles de sombra y cultivos de cobertura, preferiblemente nativos. Deforestación es prohibida
Comercio Justo	Minimizar. Usar principalmente no renovable	Uso regulado	Promoción de reforestación y uso de cobertura arbórea. Deforestación es prohibida
NOP orgánico	Prácticas que minimicen erosión	Uso de materiales orgánicos (compostados y sin compostar)	Rotaciones, cultivos de cobertura
Unión Europea	Uso responsable de energía	Uso de abonos verdes, fertilización orgánica, preferiblemente compostado	Uso de leguminosas o plantas de raíz profunda, rotación de cultivos
Rainforest	Prácticas de prevención de erosión	Se recomienda el uso de coberturas y rotación de cultivos	Arboles de sombra (>70 árboles/ha de >12 especies nativas/ha y >40% de sombra permanente con al menos dos estratos)
CAFE Practices	Minimizar. Uso de energía renovable, como solar y otras más eficientes	No especifica	Sombra imitando las condiciones naturales cuando sea posible. Mantener capa de hojarasca

Fuente: <http://www.utzcertified-trainingcenter.com>,
http://www.fairtrade.net/fileadmin/user_upload/content/2009/standards/documents/2012-04-01_SP_Coffee_SPO.pdf,
http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?c=ecfr&sid=3f34f4c22f9aa8e6d9864cc2683cea02&tpl=/ecfrbrowse/Title07/7cfr205_main_02.tpl,
http://ec.europa.eu/agriculture/organic/organic-farming/what-organic/the-farm_es,
<http://sanstandards.org/userfiles/SAN-S-1-1%20SAN%20Sustainable%20Agriculture%20Standard%20July%202010%20v2.pdf>,
http://www.scscertified.com/retail/docs/CAFEPracticesEvaluationGuidelines010307_esp.pdf.

La cadena de producción de café se dividió en dos actividades principales: a nivel de finca y el procesamiento. Este estudio se desarrolló mediante las siguientes etapas metodológicas:

SELECCIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y FINCAS

Se seleccionaron nueve fincas cafeteras en Costa Rica, dos de cada uno de los siguientes esquemas de certificación: producción convencional (sin certificación), producción orgánica (NOP y Unión Europea) y UTZ Kapeh y; una con certificación de Comercio Justo, Rainforest Alliance y CAFE Practices. Estas fincas fueron seleccionadas por el Proyecto COSA (por sus siglas en inglés *Committee on Sustainability Assessment*) y estaban distribuidas en las principales zonas cafeteras del país: Plan de Birrí, San Rafael de Heredia, La Suiza, Aquieres y Colorado de Turrialba, San Marcos de Tarrazú, Llano Bonito (zona de Los Santos), Grecia y Naranjo. Las fincas seleccionadas tenían café en sistemas agroforestales (SAF) con una o varias de las siguientes especies arbóreas: *Inga* spp, *Cordia alliodora*, árboles frutales, *Eucalyptus* spp, *Pinus* spp y *Cupressus lusitanica* (Cuadro 2).

Cuadro 2. Detalle de las fincas evaluadas para la construcción de la huella de carbono en la producción de café en Costa Rica.

Sitio	Altitud (m)	Especies arbóreas de sombra	Esquema de certificación
Plan de Birrí	1600	<i>Cupressus lusitanica</i>	UTZ Kapeh
San Rafael de Heredia	1300	<i>Cupressus lusitanica</i>	UTZ Kapeh
Llano Bonito	1400	Frutales y <i>Pinus</i> spp	Comercio Justo
Colorado de Turrialba	930	<i>Cordia alliodora</i> , <i>Inga</i> spp, <i>Eucalyptus</i> spp y frutales	Orgánico (NOP y Unión Europea)
Grecia	800-900	<i>Eucalyptus</i> spp y <i>Cordia alliodora</i>	Orgánico (NOP y Unión Europea)
Naranjo	1350-1400	<i>Eucalyptus</i> spp y <i>Cordia alliodora</i>	Rainforest
Aquiaries de Turrialba	820-1400	<i>Eucalyptus</i> spp y <i>Cordia alliodora</i>	CAFE Practices
La Suiza de Turrialba	600	<i>Cordia alliodora</i>	Producción convencional
San Marcos de Tarrazú	1500	<i>Eucalyptus</i> spp y <i>Cupressus lusitanica</i>	Producción convencional

Estimación del almacenamiento de carbono y las tasas de fijación en los sistemas de producción

La biomasa arriba del suelo se estimó calculando la densidad de plantación y la biomasa promedio por individuo por componente (cafetos y árboles de sombra). La densidad de plantación fue estimada en parcelas temporales de muestreo rectangulares de 500 m² para árboles y 30 m² para cafetos.

La biomasa promedio por individuo se estimó mediante la medición de la altura total (ht) y el diámetro a la altura del pecho (dap) de 10 árboles con dap ≥10 cm y la ht y el diámetro del tronco a 15 cm de altura (D₁₅) de 10 cafetos seleccionados aleatoriamente en todo el sistema estudiado. Las dimensiones de las leñosas perennes fueron transformadas a biomasa arriba del suelo empleando modelos de biomasa reportados en la literatura (Cuadro 3). La mayoría de estas ecuaciones se han desarrollado en sistemas agroforestales con café y cacao en Nicaragua y Costa Rica, respectivamente. La biomasa aérea de *Eucalyptus* spp y *Cupressus lusitanica* se calculó con una ecuación de volumen de madera (Cuadro 3), el peso específico de la madera de 0,4 y 0,5 g/cm³ y el factor de expansión de la biomasa para el volumen total de 1,2 y 1,4, respectivamente. La biomasa de los árboles podados, como *Erythrina* spp, se calculó midiendo la altura total y el diámetro en el centro del tronco principal y una gravedad específica de 0,25 g/cm³ (Ávila, 2000). El almacenamiento de carbono en la biomasa total se calculó utilizando el valor *default* de fracción de carbono (0,5; IPCC, 2003).

La biomasa bajo el suelo se estimó a través de una ecuación general desarrollada por Cairns; Brown; Helmer & Baumgardner (1997) y recomendada por el IPCC (2003):

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

Donde;

Br: Biomasa bajo el suelo (t/ha)

Ba: Biomasa arriba del suelo (t/ha)

Cuadro 3. Modelos alométricos para estimar la biomasa arriba del suelo de los árboles y los arbustos de café que crecen en los sistemas agroforestales.

Especies	Modelo	R ²	Fuente
<i>Inga</i> spp	$B = 10^{(-0,889+2,317*\log(dap))}$	0,96	Segura, Kanninen & Suárez, 2006
<i>Cordia alliodora</i>	$B = 10^{(-0,755+2,072*\log(dap))}$	0,95	
<i>Coffea arabica</i>	$B = 10^{(-1,113+1,578*\log(D_{15})+0,581*\log(ht))}$	0,94	
Arboles frutales (modelo multiespecies)	$B = 10^{(-1,12+2,62*\log(dap)+0,03*\log(ht))}$	0,95	Andrade, Segura & Somarriba, en preparación
<i>Eucalyptus</i> spp	$V = e^{(-10,54+1,99*\ln(dap)+1,08*\ln(ht))}$	0,99	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 1994
<i>Pinus</i> spp	$B = 0,89 + \left(\frac{10486 * dap^{2,84}}{dap^{2,84} + 376907} \right)$	0,98	IPCC, 2005
<i>Cupressus lusitanica</i>	$V = -0,013 + 2,6 \times 10^{-5} * dap^2 * ht$	--	Chaves & Fonseca, 1991

B: biomasa arriba del suelo (kg/planta); dap: diámetro del tallo del árbol a la altura del pecho (cm); D₁₅: diámetro del tronco a 15 cm de altura (cm); ht: altura total (m). V: volumen total del tronco (m³).

La tasa de fijación de carbono en cada componente (árboles y arbustos de café) fue estimada dividiendo el almacenamiento de carbono en la biomasa total entre la edad promedio de cada componente. La edad de cada componente fue estimada mediante la realización de una entrevista al productor o administrador de la finca. La relación entre el almacenamiento y la fijación de carbono se utilizó para estimar la tasa de fijación de carbono a escala del sistema. En el caso de edad desconocida, la tasa de fijación de carbono se calculó considerando las curvas de crecimiento de cada especie, además de una relación entre el almacenamiento de carbono y la tasa de fijación.

Estimación de las emisiones de GEI en el manejo de fincas cafeteras y en procesamiento de café

Nueve fincas cafeteras y ocho industrias procesadoras de café en Costa Rica fueron seleccionadas y entrevistadas en el 2008. Los procesadores de grano que reciben las cerezas de café de las fincas estudiadas fueron entrevistados: Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba (APOT), Beneficio La Eva, Beneficio Santa Rosa (Cafetalera Orlich), la Asociación Cafetalera Aquiares SA, Coopedota RL (Cooperativa de Caficultores de Dota RL), Coopelibertad RL (Cooperativa de Caficultores de Heredia Libertad RL), Coopellanobonito RL (Cooperativa de Caficultores de Llano Bonito RL) y Coopronaranjo RL (Cooperativa de Productores de Café y Servicios Múltiples de Naranjo RL).

Se realizaron entrevistas semiestructuradas para hacer una reconstrucción de las actividades de manejo de cada sistema de producción de café. Se formularon las preguntas para estimar el uso de cal, energía, combustibles fósiles y fertilizantes nitrogenados. En el caso de encontrarse vacíos de información o contradicciones en las respuestas de los productores, se procedió a consultar a expertos en el manejo de plantaciones de café en las zonas de estudio.

Los resultados de los flujos de GEI se calcularon en términos de un año de producción (proceso) y por hectárea en el caso de las fincas. Al final, todos los valores se expresan como los flujos de GEI por cada unidad de grano de café verde producido. Las emisiones producto del procesamiento de café fueron estimadas mediante encuestas y/o consultando los registros de la industria, por ejemplo, las facturas del servicio de electricidad. Las siguientes son las actividades que emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera en los procesos de manejo de las plantaciones y procesamiento del grano de café:

a. Aplicación de fertilizantes nitrogenados y carbonatos. La cantidad de nitrógeno y carbonatos aplicada anualmente a las plantaciones de café fue estimada mediante una encuesta, en la cual se incluía el tipo y dosis de fertilizante y cal. Se consideró un factor de emisión de la aplicación de nitrógeno de 0,01 kg N₂O/kg N (IPCC, 2006). La aplicación de los carbonatos genera una emisión de 0,12 y 0,122 kg C/kg de carbonato de calcio y magnesio, respectivamente (IPCC, 2006).

b. Uso de combustibles fósiles. Los combustibles fósiles utilizados en el manejo de las plantaciones de café (renovación de las plantaciones y aplicaciones de agroquímicos), el transporte de granos de café, personal, leña y otros insumos, fueron estimados por medio de entrevistas. Se preguntó por la cantidad de combustibles

fósiles utilizados en todas las etapas de la cadena de producción del café. Si tal información no estaba disponible, el volumen de éstos se estimó mediante el tiempo de trabajo o la distancia recorrida y la eficiencia del uso de combustibles fósiles. Las estimaciones de uso de combustibles fósiles se hicieron sólo para la aplicación de los insumos. Los factores de emisión utilizados fueron de 2,83 y 2,33 kg CO₂e/l de diesel y gasolina, respectivamente (IPCC, 2006).

c. Uso de leña u otros combustibles. El consumo de leña fue estimado en las entrevistas y/o revisando los registros de los beneficiaderos. La leña usada en el secado del grano de café emite GEI, a razón de 957,25 g CO₂e/kg leña (950 g de CO₂; 0,05 g CH₄ y 0,02 g de N₂O/kg leña; EC, 2007). El uso de leña se registró en m³ estéreos, unidad de medida tradicional para este país, los cuales se convirtieron a volumen sólido utilizando un factor de 78% (González, 2001) y en peso seco suponiendo una densidad de la madera de 0,4 g/cm³. También se consideró un factor de oxidación del 87% (IPCC, 2006).

d. Uso de electricidad. La emisión de GEI debido a la electricidad se estimó con base en la cantidad de ésta en el procesamiento del grano y el factor de emisión. El primer parámetro fue estimado a través de la entrevista y el consumo de electricidad reportado en el último recibo eléctrico del año. Se empleó un factor de emisión de 6,6 kg CO₂/MWh, el cual se estimó con base en: 1) el método de generación de electricidad de Costa Rica, de acuerdo a las estadísticas nacionales (MIDEPLAN, 2008), y 2) el factor de emisión de acuerdo al tipo de insumo empleado para la generación (0,60 t CO₂/MWh para diesel y 0 t CO₂/MWh para hidroeléctricas, geotérmicas y eólicas; World Resource Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2007).

Construcción de la huella de carbono de la cadena de suministro de café

La huella de carbono siguió el esquema en el proceso de producción y transformación del café (Figura 1). Con base en las tasas de fijación de carbono en biomasa total y las emisiones a nivel de finca y beneficiadero, se procedió a estimar la huella de carbono por unidad de café oro procesado. A cada productor de café seleccionado se le indagó acerca de la producción promedio de café en cereza en el sistema de producción evaluado. La capacidad de calentamiento del CH₄ y N₂O fue usada para estimar las emisiones en términos de CO₂e: 21 g CO₂e/g CH₄ y 310 g CO₂e/g N₂O (IPCC, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa total

La tasa de fijación de carbono en la biomasa total varió entre 5,0 y 17,6 t CO₂e/ha/año en los sistemas de producción de café evaluados (Cuadro 4). Alrededor del 87% de la fijación de carbono fue acumulada por los árboles de sombra (incluyendo maderables, de servicio y frutales), y el restante en los arbustos de café (8,7 vs 1,2 CO₂e/ha/año, respectivamente; Cuadro 4).

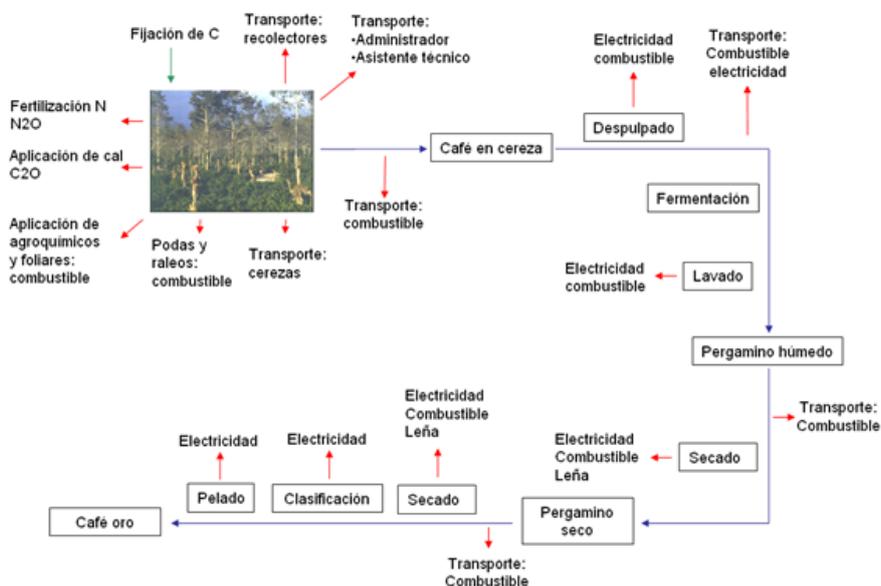


Figura 1. Esquema-modelo conceptual de las actividades de manejo y transformación del café que afectan la huella de carbono.

Las flechas rojas indican actividades que emiten gases de efecto invernadero. La flecha verde señala la actividad que fija carbono atmosférico en biomasa.

Cuadro 4. Tasas de fijación de carbono en la biomasa total de las plantaciones de café bajo diferentes estándares de certificación en Costa Rica.

Estándar de certificación	Producción *(kg/ha/año)	Tasa de fijación			
		(t CO ₂ e/ha/año)			(kg CO ₂ e/kg*)
		Arboles	Cafetos	Total	Total
Rainforest	1583	4,2	1,6	5,9	3,7
Comercio Justo	1840	11,6	0,2	11,8	6,4
UTZ Kapeh	1204	6,8	1,1	8,0	6,7
Producción convencional	1116	11,8	2,1	13,9	14,0
Producción Orgánica	463	9,1	0,8	9,8	35,0
Promedio	1241	8,7	1,2	9,9	13,2

*Café verde.

Los sistemas convencionales de producción de café fijaron más carbono que las plantaciones bajo esquemas de

Comercio Justo, Orgánico, UTZ Kapeh y Rainforest Alliance (13,9; 11,8; 9,8; 8,0 y 5,9 t CO₂e/ha/año, respectivamente; **Cuadro 4**). Se encontraron diferencias superiores en el secuestro de carbono por unidad de café de grano verde producido: la producción orgánica fijó una considerablemente mayor cantidad de carbono atmosférico (35,0 kg CO₂e/kg grano de café verde) que los otros sistemas (3,7 a 14,0 kg CO₂e/kg café verde; **Cuadro 4**).

Las características de los árboles de sombra, tal como la densidad y composición botánica, el tamaño de los individuos, la tasa crecimiento y la edad de la madera, tienen una mayor influencia sobre las tasas de fijación de carbono que los sistemas certificados. Estudios de fijación de carbono en biomasa en SAF con café han arrojado tasas de entre 7,7 y 16,9 t CO₂e/ha/año (Ávila; Jiménez; Beer; Gómez & Ibrahim, 2001; Aristizábal y Guerra 2002; Hergoualc'h; Blanchart; Skiba; Henault & Harmand, 2012; Andrade; Marín; Pachón & Segura, en edición), dentro de las cuales se encuentran las estimaciones de este estudio. Se ha demostrado que los SAF con café fijan más carbono atmosférico en la biomasa que aquellos en monocultivo (Oelbermann, *et al.* 2004; Avilés, 2009).

Emisiones de GEI en las fincas cafeteras

No hay diferencias aparentes en las emisiones de GEI entre los estándares de certificación. Casi todas las fincas de café emitieron entre 0,5 y 1,1 kg CO₂/kg de café verde de grano producido (**Cuadro 5**). Sin embargo, se encontró una finca orgánica atípica, cuyo factor de emisión es increíblemente mayor que el resto de las fincas evaluadas (44,3 kg CO₂^e/kg del grano de café verde; **Cuadro 5**). Este valor puede explicarse por las altas dosis de fertilizantes orgánicos aplicados (102 t/ha/año) y el gran uso de combustibles fósiles para su transporte a la plantación de café.

La fuente de GEI más importante en las plantaciones de café fue la aplicación de nitrógeno (63-82% de las emisiones de GEI), variando entre 0,21 y 0,73 kg CO₂e/kg de grano de café verde (excluyendo la finca orgánica, la cual presentó valores extremos), seguido por el uso de combustibles fósiles (aplicaciones de insumos y transporte), y la aplicación de los carbonatos (15-36%; **Cuadro 5**). Estos resultados coinciden parcialmente con los reportes de Noponen, *et al.* (2012), quienes encontraron que el nitrógeno orgánico e inorgánico contribuyó con 7-42% de la huella de carbono en cafetales de Costa Rica y Nicaragua. Aunque algunos esquemas de certificación implican la reducción o eliminación de productos sintéticos, los fertilizantes nitrogenados son un factor clave en el

crecimiento pues debe ser suplementado a las plantas. Las fincas orgánicas también aplican nitrógeno pero usando una gran cantidad de productos con un menor contenido de este nutriente.

Cuadro 5. Emisiones de gases de efecto en el invernadero debido al manejo de plantaciones de café bajo diferentes esquemas de certificación en Costa Rica.

Estándar de certificación	Fertilizantes nitrogenados	Carbonatos (kg CO ₂ e/kg café verde)	Diesel	Gasolina	Total	Total (tCO ₂ e/ha/año)
UTZ Kapeh	0,52	0,12	0,03	0,04	0,70	0,85
Rainforest	0,57	0,16	0,08	0,03	0,84	1,33
Comercio Justo	0,52	0,24	0,06	0,00	0,82	1,51
Producción orgánica	18,68	0,10	1,78	2,10	22,66	10,49

Emisiones de GEI en el procesamiento del grano de café

La emisión de GEI está fuertemente afectada por el tipo de energía que se emplea en el procesamiento del grano. Se encontraron diferencias notables en las emisiones de GEI entre las plantas de procesamiento. Sin embargo, dichas diferencias no pueden atribuirse al estándar de certificación debido a que la mayoría de ellas procesan el café proveniente de diferentes esquemas (Cuadro 6). Además, el café de fincas certificadas recibe el mismo proceso para obtener granos de café verde. Coopedota y Coopellanobonito presentaron las menores emisiones de GEI (156 y 187 kg CO₂e/t café verde, respectivamente; Cuadro 6), debido a que utilizan energía solar para secar parcialmente el café. En contraste, Cafetalera Aquiares emitió la mayor cantidad de GEI por unidad de café verde producido (654 kg CO₂e/t); aunque, utiliza una gran cantidad de leña de la misma finca (Cuadro 6).

Cuadro 6. Emisiones de GEI de acuerdo con el uso de la energía en el procesamiento de grano de café en Costa Rica.

Procesador	Estándar de certificación	Emisiones de GEI (kg CO ₂ e/t café verde)			
		Combustibles fósiles	Leña	Electricidad	Total
Coopedota	CO, RF	30,4	124,6	0,9	155,9
Coopellanobonito	CO, CJ, UK	38,2	146,9	1,9	187,0
Coopronaranjo	CO, OR, UK, RF	17,3	203,4	1,8	222,4
Beneficio La Eva	CO	48,0	306,0	1,5	355,5
Coopelibertad	CO, UK, RF	22,8	356,7	1,7	381,2
APOT	OR	17,7	499,9	1,1	518,7
Beneficio Santa Rosa	CO	113,5	451,9	2,0	567,4
Cafetalera Aquiares	RF	28,2	622,6	2,8	653,6
Promedio		39,5	339,0	1,7	380,2

CO: Producción convencional; RF: Rainforest; CJ: Comercio Justo; UK: UTZ Kapeh; OR: producción orgánica; APOT: Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba.

La emisión de GEI por el uso de la energía eléctrica en Costa Rica es insignificante, porque el 82% de ésta se

genera en centrales hidroeléctricas (MIDEPLAN, 2008), que se considera como una energía limpia que no emite GEI en el largo plazo (Chacón, Montenegro & Sasa, 2009).

Huella de carbono en la cadena de producción de café en Costa Rica

La cadena productiva del café en Costa Rica presentó una huella de carbono con una fijación neta de entre 2,4 y 13,0 kg CO₂e/kg de grano de café verde (**Cuadro 7**). Esto significa que, en promedio, cada kg de grano de café verde producido secuestra 7,6 kg CO₂e (8,1 t CO₂e/ha/año). Se encontró una tendencia que indica que la huella de carbono en la cadena de producción de café no fue afectada por los sistemas de certificación. Sin embargo, se hallaron dos grupos de estándares de certificación, de acuerdo a su capacidad de secuestrar GEI. El primer grupo, con la mayor remoción de GEI, está compuesto por la producción convencional y la orgánica (13,0 y 11,4 kg CO₂e/kg de grano de café verde, respectivamente); mientras que en el segundo grupo, con menor fijación neta de carbono, se encuentran los estándares Rainforest, Comercio Justo y UTZ Kapeh (2,4; 5,4 y 5,6 kg CO₂e/kg de grano de café verde, respectivamente; **Cuadro 5**). Los hallazgos de este estudio resultaron muy superiores a lo encontrado por Noponen, *et al.* (2012) en Costa Rica y Nicaragua, quienes encontraron una huella de carbono de 0,26-0,67 y 0,12-0,52 kg CO₂e/kg de café verde, para sistemas de producción convencionales y orgánicos, respectivamente.

La leña tiene un impacto negativo en la huella de carbono, ya que se considera una emisión neta en la cadena de suministro del café, a pesar que el carbono atmosférico se ha fijado previamente en esta fuente energética. Las distancias entre granjas y plantas de procesamiento y el tipo de vehículo para transportar el grano de café fueron también claves para la huella de carbono. Los beneficiaderos de café recogieron el café en cereza de todas las fincas evaluadas, que en promedio estaban a 3,5 km de distancia.

Estos resultados demuestran que los SAF con café, sin certificación o bajo cualquier estándar, son amigables con el medio ambiente, en términos de mitigación del cambio climático, ya que tienen una huella de carbono positiva, es decir, fijan netamente carbono atmosférico. Estos resultados tienen grandes implicaciones, pues confirman el papel de dichos sistemas de producción en la mitigación del cambio climático y su potencial uso en programas de pagos por servicios ambientales, como una opción para el mejoramiento de los medios de vida de las poblaciones rurales. Igualmente, da pautas a los tomadores de políticas

nacionales de Costa Rica para promover sistemas que ayudan a alcanzar la meta del país de convertirse en carbono neutro para el 2021.

Cuadro 7. Huella de carbono en la cadena de producción de café bajo diferentes estándares de certificación en Costa Rica.

Esquema de certificación	Producción de grano verde (kg/ha/año)	Flujos de GEI (kg CO ₂ e/kg café verde)*			Huella de carbono	
		Fijación de carbono	Manejo de plantaciones	Procesamiento	kg CO ₂ e/kg café	tCO ₂ e/ha/año
Rainforest	1584	3,7	-0,841	-0,438	2,4	4,0
Producción Orgánica	463	34,5	-2,266	-0,437	11,4	5,3
UTZ Kapeh	1204	6,7	-0,730	-0,381	5,6	6,7
Comercio Justo	1840	6,4	-0,816	-0,187	5,4	9,9
Producción convencional	1116	14,0	-0,661	-0,362	13,0	14,4
Promedio	1241	13,1	-1,063	-0,361	7,6	8,1

* Valores positivos se refieren a fijación de carbono y los números negativos indican las emisiones de gases con efecto invernadero.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El componente arbóreo presentó una mayor influencia en la fijación de carbono que el esquema de certificación y los cafetos en la fijación y huella de carbono. Así, la producción convencional de café, la cual tiene árboles de *C. alliodora*, presentó la mayor tasa de fijación de carbono (13,9 t CO₂e/ha/año). La emisión de GEI fue evidentemente superior en las actividades de manejo de las plantaciones de café que en el procesamiento del grano (5,1 vs 0,4 kg CO₂e/kg café verde). En manejo de las plantaciones, la principal actividad de emisión de GEI es la fertilización nitrogenada, por lo cual se deben buscar opciones que reduzcan la aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos que suministren tal nutriente.

La cadena productiva de café en Costa Rica es amigable con el medio ambiente, en términos de mitigación del cambio climático, dado que fija en promedio 7,6 kg CO₂e/kg de café verde (8,1 t CO₂e/ha/año). No se encontró un impacto del estándar de certificación en la huella de carbono, pero si en el componente arbóreo, pues cada esquema de certificación tienen sus propias normas en cuanto a este tipo de vegetación en las plantaciones de café.

Idealmente, la huella de carbono debe ser estimada para todo el ciclo de plantación, por lo cual se recomienda estimar las emisiones de GEI en el proceso de establecimiento. Adicionalmente, se requiere intensificar el muestreo de plantaciones con diferentes esquemas de certificación para tener datos más precisos, con mayor rigor estadístico y eliminar aquellas fincas con manejo atípico.

Se recomienda realizar estudios detallados para encontrar factores de emisión propios para las fuentes de GEI en la zona andina, y principalmente en el área cafetera. Es de vital importancia trabajar en las emisiones de fertilizantes nitrogenados orgánicos.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue preparado con base en productos del Proyecto del Comité de Evaluación de Sostenibilidad (COSA –*Committee on Sustainability Assessment*) como una contribución al desarrollo de la metodología COSA. Ver: <http://www.sustainablecommodities.org/node/18>".

BIBLIOGRAFÍA

- Albrecht, A. & Kandji S. T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 99: 15-27.
- Amézquita, M. C.; Ibrahim, M.; Llanderal, T.; Buurman, P. & Amézquita, E. (2005). Carbon sequestration in pastures, silvo-pastoral systems and forests in four regions of the Latin American tropics. *Journal of Sustainable Forestry*. 25 (1): 31-49.
- Andrade, H. J.; Brook, R. & Ibrahim, M. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvo-pastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*. 308: 11-22.
- Andrade, H. J.; Segura, M. & Somarriba, E. En preparación. Ecuaciones de biomasa para estimar biomasa arriba del suelo de componentes leñosos en sistemas agroforestales indígenas.
- Andrade, H. J.; Marín, L. M.; Pachón, D. P. & Segura, M. A. En edición. Fijación de carbono en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia.
- Aristizábal, J. & Guerra, A. (2002). Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero *Cordia alliodora* -cacao *Theobroma cacao* L-plátano *Musa paradisiaca*. (Tesis de Ingeniería Forestal no publicada). Universidad Distrital, Bogotá, Colombia.
- Ávila, G. (2000). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvo-pastoriles y pasturas a pleno sol*. (Tesis de maestría no publicada). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Ávila, G.; Jiménez, F.; Beer, J.; Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de

- servicios ambientales en sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 8(30): 32–35.
- Avilés, I. I. (2009). *Fijación biológica de nitrógeno y almacenamiento de carbono en agrosistemas de producción de café (Coffea arabica L) en Puerto Rico*. (Tesis de maestría no publicada). Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
 - Beer, J.; Harvey, C.; Ibrahim, M.; Harmand, J. M.; Somarriba, E. & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10: 80-87.
 - Cairns, M. A.; Brown, S.; Helmer, E. H. & Baumgardner, G.A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111: 1-11.
 - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). (1994). *Deglupta (Eucalyptus deglupta), especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Serie Técnica, Informe Técnico No. 240. Turrialba, Costa Rica: Autor.
 - Chacón, A. R.; Montenegro, J. & Sasa, J. (2009). *Inventario nacional de emisión de gases con efecto invernadero y de absorción de carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
 - Chaves, E. & Fonseca, W. (1991). *Ciprés, Cupressus lusitanica Miller, especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Serie Técnica, Informe Técnico No. 168. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
 - Environment Canada (EC). (2007). *National Inventory Report 1990-2005: gas sources and sinks in Canada*. Gatineau, Quebec: Autor.
 - Giovannucci, D. & Koekoek, F. J. (2003). *The state of sustainable coffee: a study of twelve major markets*. California, USA: Feriva.
 - Gonzalez, D. (2001). *Estudio de casos sobre combustibles forestales, Panamá. Proyecto Información y análisis para el manejo forestal sostenible: integrando esfuerzos nacionales e internacionales en 13 países tropicales en América Latina*. Buenos Aires, Argentina: Unión Europea-FAO.
 - Hergoualc'h, K.; Blanchart, E.; Skiba, U.; Henault, C. & Harmand, J. M. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148: 102–110.
 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). National Greenhouse Gas Inventories Programme Intergovernmental. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. En *IPCC Good Practice Guidance for LULUCF, Chapter 4: Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Panel on Climate Change* (pp. 113-116). Hayama, Kanagawa, Japón: Autor.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC) (2005). Métodos complementarios y orientación sobre las buenas prácticas que emanan del Protocolo de Kyoto. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Capítulo 4. Obtenido desde: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Obtenido desde: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Obtenido desde: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/figure-spm-3.html.
- Johnson, J.; Fransluebbbers, A. J.; Weyers, S. L. & Reicosky, D. C. (2007). Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental pollution*, 150: 107-124.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). (2008). *Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES). Generación eléctrica de Costa Rica por tipo de generación (en GigaWatt-hora): 1990–2000*. Obtenido desde: <http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/29-7.htm>.
- Montagnini, F; Nair PKR. (2004). Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 61–62(1–3): 281–295.
- Noponen, R.; Edwards-Jones, G.; Hagggar, J. P.; Soto, G.; Attarzadeh, N. & Healey, J. R. (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 151, 6– 15.
- Oelbermann, M.; Voroney, R. P. & Gordon, A. M. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and Southern Canada. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 104, 359–377.
- Philpott, S.; Bichier, P.; Rice, R. & Greenberg, R. (2007). Field-Testing Ecological and Economic Benefits of Coffee Certification Programs. *Conservation Biology*, 21(4): 975–985.
- Segura, M.; Kanninen, M. & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*. 68(2): 143-150.
- Soto-Pinto, L.; Anzueto, M.; Mendoza, J.; Jiménez-Ferrer, G. & De Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*. 78: 39–51.

- United States Agency for International Development (USAID) (2006). *Central America and Dominican Republic quality coffee program (CADR QCP)*. Final Report. 49 p. Washington, D.C.: Author.
 - World Resource Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2007). *Guidelines for quantifying GHG reductions from grid-connected electricity projects*. Ginebra: Author.
 - Wunder, S. (2007). The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation. *Conservation Biology*. 21(1): 48-58.
-

1. Ing. Forestal; M.Sc. en Socioeconomía Ambiental. Docente-Investigadora, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Email: masegura@ut.edu.co, Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT).
2. Ing. Agrónomo; M.Sc. en Agroforestería Tropical; PhD en Agroforestería Tropical. Docente-Investigador, Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima, Email: hjandrade@ut.edu.co, Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT).