

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN FINCAS  
CAFETERAS DE LA UNIÓN - NARIÑO

ERIKA ALEXANDRA CEBALLOS CEBALLOS  
SARA MILENA OCAÑA ALVARADO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES  
SAN JUAN DE PASTO  
2014

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN FINCAS  
CAFETERAS DE LA UNIÓN - NARIÑO

ERIKA ALEXANDRA CEBALLOS CEBALLOS  
SARA MILENA OCAÑA ALVARADO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de INGENIERO  
AGROFORESTAL

Presidente

MSc AMANDA SILVA PARRA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y SISTEMAS AGROFORESTALES  
SAN JUAN DE PASTO  
2014

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1<sup>o</sup> del Acuerdo no. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente de tesis

---

Firma de jurado

---

Firma de jurado

San Juan de Pasto, Mayo 28 de 2014

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
MATERIALES Y METODOS .....	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
CONCLUSIONES.....	27
AGRADECIMIENTOS.....	28
BIBLIOGRAFIA.....	28

**ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN  
FINCAS CAFETERAS DE LA UNIÓN - NARIÑO<sup>1</sup>**

**MITIGATION STRATEGIES AGAINST CLIMATE CHANGE IN COFFEE  
FARMS OF LA UNION-NARIÑO**

Erika Ceballos C.<sup>2</sup>

Sara Ocaña A.<sup>3</sup>

Amanda Silva P.<sup>4</sup>

Héctor Ordoñez<sup>5</sup>

**RESUMEN**

La presente investigación se realizó en el municipio de La Unión (Nariño); se seleccionaron cuatro sistemas de producción de café, con sombra (S1), con semisombra (S2), asociado con plátano (S3) y café a pleno sol (S4) con edades que oscilaban entre 6 y 15 años de implementados, en cada uno de estos se seleccionaron cuatro fincas en las cuales se realizó una encuesta semiestructurada que permitió la recolección de información primaria; se estimó el carbono almacenado en los suelos y en la biomasa, para ello se utilizó la metodología del IPCC (2006), que permitió la medición de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles y arbustos, y mediante modelos alométricos se estimó el carbono almacenado en la biomasa. Los sistemas de café bajo sombra (S1) y semisombra (S2) fijaron más carbono en la biomasa y el suelo que los sistemas (S3) y (S4), 30.72, 16.38, 2.85, 0.85 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año respectivamente. Para las emisiones de GEI se consideraron las cantidades de fertilizantes, enmiendas cálcicas, residuos de hojarasca, otros insumos y uso de combustible fósil con emisiones totales de 1.92, 1.98, 2.4, 2.5 tCO<sub>2</sub>eq para los sistemas (S1), (S2), (S3) y (S4) respectivamente, siendo el (S4) el que más contribuyó con la emisión de GEI's. La ecuación de balance de GEI permitió determinar valores netos de GEI's

---

<sup>1</sup> Documento de investigación presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Agroforestal.

<sup>2</sup> Estudiante tesista. Ingeniería Agroforestal, Universidad de Nariño. Pasto. Nariño. Colombia. erikita9006@hotmail.com.

<sup>3</sup> Estudiante tesista. Ingeniería Agroforestal, Universidad de Nariño. Pasto. Nariño. Colombia. sarita.1030@hotmail.com.

<sup>4</sup> I. Agrónoma. M. Sc. Ciencias Agrarias énfasis Suelos. Docente Hora Cátedra Universidad de Nariño. amanda.silvaparra@gmail.com.

<sup>5</sup> Ingeniero forestal. M.Sc. Bosques y Conservación Ambiental. Docente tiempo completo Universidad de Nariño. hectoramiro@hotmail.com

producidos en tCO<sub>2</sub>eq/ha/año de -28,79, -14,39, -0,0447, y +1,08 para los sistemas productivos de café, la determinación de la huella de carbono en kgCO<sub>2</sub>eq por kg de café verde producido fue de -54,79, -28,35 y -0,69 en los primeros tres sistemas, indicando una mayor sostenibilidad del sistema café con sombra, esto debido a mayores tasas de fijación de C tanto en la biomasa del componente leñoso, como del suelo. El sistema a pleno sol de café resultó ser el más contaminante, debido a que su huella de carbono fue de +1,081 kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café verde producido. El presente estudio permitió definir algunas estrategias de mitigación de GEI's para minimizar los efectos que éstos puedan ocasionar sobre el cambio climático global.

**Palabras Clave:** Café, balance de GEI, almacenamiento de carbono, emisiones, biomasa.

### ABSTRACT

This research was conducted in the municipality of the Union (Nariño); four selected production systems of coffee (shadow-S1, partially sunny-S2, home with banana-S3 and full-sun coffee-S4) who were 6-15 years of deployed, in each of these four farms were selected in which it was made a semistructured questionnaire that allowed the collection of the information; It was estimated the carbon stored in soils and biomass, for this purpose we used the methodology of the IPCC (2006), which allowed the measurement of height and diameter at breast height (DBH) of trees and shrubs, and using allometric models estimated the carbon stored in biomass. The systems of shade coffee (S1 and S2) set more carbon in the biomass and soil than S3 and S4, 30.72, 16.38, 2.85, 0.85 tCO<sub>2</sub>eq/ha/year respectively. For GHG emissions were considered the volumes of fertilizers, amendments calcium, fossil fuels, waste litter; still total GHG emissions of 1.92, 1.90, 2.00, 2.59 tCO<sub>2</sub>eq for the systems S1, S2, S3 and S4 respectively being S4 that contributed most to the emission of GHG's. The balance equation of GHG has allowed us to determine net values of GHG's produced in tCO<sub>2</sub>eq/ha/year of -28,79, -14,39, -0,0447, y +1,08 and systems for the production of coffee, the determination of the carbon footprint in kgCO<sub>2</sub>eq/kg of green coffee produced was of -54,79, -28,35 y -0,69 in the first three systems, indicating greater sustainability of the system with shade coffee, this is due to higher rates of fixation of C both in the biomass of the woody component, such as the ground. The monocrop system of coffee proved to be the most polluting, introducing a carbon footprint of +1,081

kgCO<sub>2</sub>eq/kg of green coffee produced. This study allowed us to identify some strategies of mitigation of GHG's to minimize the effects that these can cause global climate change. The systems of shade coffee (S1 and S2) set more carbon in the biomass and soil than S3 and S4 (18.59 and 10.66, 11.24 and 3.476, 7.89 and 1.16, 0.00 and 0.84 t CO<sub>2</sub>eq/ha/year) respectively.

**Key words:** Coffea, GHG (greenhouse gas) balance, carbon storage, emission, biomass.

## INTRODUCCION

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo actual. En los últimos 100 años, la temperatura media de la superficie de la Tierra aumentó en 0,74°C. Si las concentraciones del gas de efecto invernadero en la atmósfera se duplican respecto de los niveles preindustriales, se produciría un calentamiento medio de unos 3°C (Ciesla, 1996a).

Los gases de efecto invernadero (GEI's) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y vapor de agua son causantes del aumento de la temperatura global por la absorción de parte de la radiación solar infrarroja que estos realizan (Zaror, 2007; IPCC, 2007). De estos, el CO<sub>2</sub> es el gas más abundante y sus emisiones se han venido incrementando principalmente por actividades antropogénicas asociadas con el cambio de uso del suelo, deforestación, uso de combustibles fósiles y combustión de biomasa (Nair *et al*, 2009; IPCC, 2007; CEPAL, 2009a).

El cambio climático a largo plazo, podría afectar a la agricultura en diversas formas, y casi todas son un riesgo para la seguridad alimentaria de las personas más vulnerables del mundo (FAO, 1997). El aumento de temperatura podría derivar en una sustitución de algunos ecosistemas, en disminución de la productividad de los sistemas y ecosistemas agropecuarios, y en un aumento importante de personas con problemas de acceso al agua y en riesgo de sufrir hambrunas. De acuerdo a distintos escenarios climáticos, los países de América Latina podrían experimentar pérdidas de rendimientos en los cultivos de maíz, trigo, arroz, soja, café y otros, aunque dichos rendimientos también podrían aumentar en sectores específicos de forma temporal (FAO, 2011; CEPAL, 2009b).



Está ampliamente demostrado el impacto generado por las emisiones de GEI's (Gases de Efecto Invernadero) en el cambio climático a través del calentamiento global. Así, en los últimos años las organizaciones vinculadas a la producción de bienes y servicios han venido revisando sus operaciones para evaluar si las acciones que controlan pueden ser más eficientes y reducir o mitigar el cambio climático mediante la contabilización y eventual reducción de los GEI's generados en sus procesos (Federación Nacional de Cafeteros, 2013).

Los estudios de cálculo de biomasa de los ecosistemas forestales y agroforestales son esenciales para obtener un aproximado del carbono almacenado, ya que existe una estrecha relación entre la biomasa y el carbono de 2:1 (Ciesla, 1996b). Diferentes autores (Brown, 1994; Dixon, 1995; Budowski, 1999; Fischer y Trujillo, 1999 y Segura 1999), señalan la importancia de realizar estudios que logren cuantificar el carbono fijado o almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra, estimar económicamente su valor y otorgar un pago por el servicio ambiental (PSA) brindado.

Según la FAO (2002), el Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero

Para, Café de Colombia (2012), conocer los efectos de la producción de café sobre el medio ambiente, es un tema que en la última década ha recibido una enorme atención desde el punto de vista científico; desde el punto de vista de la conservación y huella ambiental. Debido a que continuamente se le está exigiendo altos estándares de sostenibilidad ambiental en el ámbito de la producción, el café es uno de los productos donde más

esfuerzos existen para adaptar sus tecnologías de producción para reducir su impacto ambiental.

En consecuencia de lo anterior expuesto, la presente investigación tiene como objetivo identificar las estrategias de mitigación frente al cambio climático en fincas cafeteras de la Unión, y de esta manera determinar con certeza la capacidad de almacenamiento de los SAF's con café y potencializar su importancia en la mitigación del cambio climático.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización**

La investigación se realizó en el municipio de La Unión (Nariño), con coordenadas geográficas 1° 36' y 06'' Norte y 77° 00' y 15'' Oeste, con una temperatura media de 19°C, precipitación media anual de 2116.6 mm, brillo solar promedio de 4.9 h/día, la evapotranspiración entre 152 mm y 185 mm y la humedad relativa promedio de 82.5% (Ibarra y Bastidas, 2008 y Alcaldía Municipal la Unión, 2005).

### **Tipificación de fincas**

En la selección de los sistemas productivos de café, se tuvo en cuenta el trabajo de investigación realizado por Ordóñez y Navia, (2013) "Tipificación de los sistemas de producción de café en el municipio de La Unión", donde aplicaron entrevistas de tipo semiestructurada dirigidas a 110 productores e información secundaria realizadas a diferentes instituciones vinculadas del sector cafetero. En esta investigación se determinaron tipologías por grupos de sistemas de producción, se identificaron los siguientes sistemas: café (tradicional) con sombra de leñosas (S1) café con semisombra de leñosas (S2) café asociado con plátano (S3), cultivo de café sin sombra (S4); en los sistemas identificados, es común encontrar diferencias en cuanto al manejo, lo que conlleva a diferencias notables en la producción, calidad y rendimientos económicos.

## Selección de los sistemas productivos

A partir de la tipificación de las fincas se seleccionaron sistemas de café que presentaban edades entre 6 a 15 años, donde se realizaron 4 encuestas de tipo semiestructuradas por cada uno de los sistemas para un total de 16 encuestas realizadas; estos se caracterizaron considerando los insumos usados en las fincas, y las diferentes actividades de manejo del cultivo, como se indica en la Tabla 1.

Los sistemas productivos identificados o seleccionados se encuentran ubicados entre los 1400 y 1800 msnm., tienen establecido y manejan la misma variedad, se encuentran en producción, es decir los cafetales tienen edades superiores a dos años y existe una densidad superior a 2,500 plantas por ha.

**Tabla 1.** Características de los sistemas de producción de café en el municipio de la Unión.

Características	Sistemas			
	Café bajo sombra (S1)	Café semisombra (S2)	Café Plátano (S3)	Café a pleno sol (S4)
Kg/Ha/año de fertilizante nitrogenado	387	455,07	546,33	706,67
Kg/Ha/año de hojarasca de cafetales*	4107,38	4654,48	5654,19	6478,94
Kg/Ha/año de hojarasca de leñosas*	29586,39	17614,22	0	0
Kg/Ha/año de abono orgánico aplicado	1100	1200	700	500
Kg /Ha/año de fertilizante fosfatado	21.9	24.13	32.76	37.3
Kg/Ha/año de fertilizante Potásico	73.66	91.44	98.34	142.4
Lts/Ha/año de pesticida aplicados	2	2	4	10.5
Lts/Ha/año de gasolina utilizada	72	86	108	121
Kg/Ha/año de cal aplicada	150	0	0	200

\*FARFAN, 2006

Se siguió la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2006), donde se evaluaron diferentes fuentes de emisión de GEI y de almacenamiento de carbono en la biomasa de leñosas, café y en el suelo en los diferentes sistemas seleccionados (Tabla 2).

**Tabla 2.** Fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero y almacenamiento de carbono.

Actividad	Fuentes de emisión y potencial de secuestro de carbono en biomasa y en el suelo para los diferentes sistemas de café
Labores Agrícolas	<p>Emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O del suelo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· N<sub>2</sub>O por fertilizantes sintéticos</li> <li>· N<sub>2</sub>O provenientes de abonos orgánicos (pulpa de café)</li> <li>· N<sub>2</sub>O provenientes de residuos <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Café (<i>Coffea arabica</i>)</li> <li>▪ Árboles de sombra</li> </ul> </li> </ul> <p>CO<sub>2</sub> emisiones</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub> emisiones por aplicación de cal</li> <li>· CO<sub>2</sub> emisiones por fertilizantes fosfatados</li> <li>· CO<sub>2</sub> emisiones por fertilizantes potásicos</li> <li>· CO<sub>2</sub> emisiones por aplicación de herbicidas (Glifosato)</li> </ul>
Uso de combustible fósil	Emisiones de CO <sub>2</sub> , provenientes del consumo de gasolina para maquinaria y transporte
Secuestro de Carbono	<p>Carbono almacenado en el suelo</p> <p>Carbono almacenado en la biomasa (arbórea y café).</p>

Adaptado de Barreto & La Scala (2011).

Se contabilizaron las fuentes de GEI's y de almacenamiento de C durante todo el ciclo de producción de café desde su inicio hasta la cosecha. De esta forma y teniendo en cuenta los estándares y metodologías propuestas por el IPCC (2006), se consideraron los tres reservorios de C con mayor significancia dentro de los SAF's como fueron suelo, árboles y arbustos de sombra involucrados en los sistemas, también se incluyó el C acumulado en cafetales.

## Cuantificación teórica de carbono almacenado

### En el suelo

Para determinar el carbono almacenado en el suelo se tomaron muestras de suelo en cada uno de los sistemas productivos (4 muestras por cada sistema productivo, para un total de 16 muestras), las cuales fueron analizadas en los laboratorios especializados de suelos de la Universidad de Nariño, y de esta manera se obtuvo el % de C orgánico en el suelo y la Da (densidad aparente), como se estima en el método de Walkley y Black.

El carbono orgánico almacenado en el suelo (tCOS ha<sup>-1</sup>) se estimó como lo menciona Andrade e Ibrahim (2003), a partir del porcentaje de carbono en el suelo (%COS), la densidad aparente (Da) y la profundidad del muestreo (P):

$$\text{COS} = \% \text{COS} * \text{Da} * \text{p}$$

### En arboles

En cada uno de los sistemas productivos se tomaron parcelas rectangulares de 250 m<sup>2</sup> (5 x 50 m), 2 por cada finca, donde se midió la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) (se midió a 1.30 m de la base del árbol) de todos los arboles con diámetro superior a 5 cm (IPCC. 2003) y mediante modelos alométricos se determinó la biomasa de los árboles (Tabla 3).

**Tabla 3.** Modelos alométricos para la estimación de la biomasa en SAF's con café

Especie	Nombre Científico	Modelo	Autor
Aguacate	<i>Persea americana</i>	$\text{LogBt} = (-1,11 + 2,64 * \text{Log}(\text{dap}))$	Andrade <i>et al.</i> 2003
Guaba	<i>Inga edullis</i>	$\text{LogBt} = (-0,795 + 2,244 * \text{Log}(\text{dap}))$	
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	$\text{LogBt} = (-1,11 + 2,64 * \text{Log}(\text{dap}))$	
Limón	<i>Citrus lemon</i>	$\text{Bt} = -6,64 + 0,279 * \text{AB} + 0,000514 * \text{AB}^2$	Segura y
Mango	<i>Mangifera indica</i>	$\text{LogBt} = (-1,11 + 2,64 * \text{Log}(\text{dap}))$	Kaninnen. 2005.
Naranja	<i>Citrus aurantium</i>	$\text{Bt} = -6,64 + 0,279 * \text{AB} + 0,000514 * \text{AB}^2$	
Nogal	<i>Juglans olanchana</i>	$\text{LogBt} = (-1,417 + 2,755 * \text{Log}(\text{dap}))$	
Otros árboles de sombra		$B = 10^{-0,834 + 2,223 * \text{log}(\text{dap})}$	Segura <i>et al.</i> 2006

Fuente: Adaptado de Narváez *et al.*, 2009.

### En cafetales

La estimación de C en la biomasa de cafetales se determinó con base en el trabajo de Segura & Andrade (2012), con una tasa de fijación de 1.1 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año para producción de café convencional, con un número total de 3333,33 plantas/ha, se tuvieron en cuenta las distancias de siembra para el cálculo de árboles/ha en cada uno de los sistemas seleccionados.

La estimación del carbono almacenado se realizó mediante la fórmula  $CA=B*Fc$  donde: CA =Carbono almacenado en ( $tCha^{-1}$ ), B = biomasa de cada uno de los componentes del sistema y Fc = fracción de carbono por defecto 0.5 (IPCC, 2006).

A partir de los datos de acúmulos de C en el suelo y la biomasa obtenidos en sistemas de 6 a 15 años de edad, se compararon con datos de acúmulos de C en el suelo obtenidos en años anteriores mediante fuentes de tipo secundarias. Las tasas de fijación de C en el suelo se estimaron mediante la siguiente formula:

▲ tasa de fijación=  $(C_{acumulado\ año\ final}-C_{acumulado\ año\ inicial})/(año\ final -año\ inicial)$  según el (IPCC, 2006).

Las tasas de fijación de C (CFijado) en los árboles en  $tC/ha/año$  se determinó como el carbono almacenado (CA) por árbol dividido entre la edad (años) del mismo.

### **Cuantificación teórica de emisiones de GEI**

#### **Factores de emisiones consideradas y unidades de conversión usadas**

La metodología simplificada utilizada por el IPCC, 2006 incluye la estimación de la cantidad total de GEI's emitidos en  $kgCO_2eq$  teniendo en cuenta algunos factores de emisión elaborados por varios autores. La Tabla 4 muestra los factores de emisión (FE) para cada una de las fuentes seleccionadas. Todos los resultados serán expresados en kilogramos equivalentes de  $CO_2$  ( $kgCO_2eq$ ), para lo cual será usado un potencial de calentamiento global (PCG) de 310  $kg\ CO_2eq/kg\ N_2O$ ; 1  $kg\ CO_2eq/kg\ CO_2$  (IPCC), y de 3,67  $kg\ CO_2eq/kg$  por  $kg$  de C secuestrado (SMITH et al. 2007). Para producir 1  $kg$  de café en verde se tuvo en cuenta los  $kgCO_2eqs$  emitido, secuestrado y el balance neto por  $kg$  de producto obtenido en cada uno de los sistemas simulados.

**Tabla 4.** Modelos para la determinación de los factores de emisiones (FE) causadas por uso de combustibles fósiles y aplicación de fertilizantes

Fuentes	Modelo de Factores de Emisión FE	Autor
Fertilizantes nitrogenados (sintéticos), Fijación de N por leguminosas, residuos de hojarasca de árboles de sombra, y cafetos.	${}^1\text{CO}_2\text{e} = {}^2\text{N}_{\text{Tn}} * (1 - {}^5\text{FG}) * {}^4\text{GWP} * {}^3\text{EF}_\text{N} * \frac{44}{28}$	IPCC.2003
Combustibles fósiles	$\text{CO}_2\text{e} = \frac{\text{C} * \text{EF}}{1000}$	IPCC.2003
Glifosato	$\text{CO}_2\text{e} = 18,8 \text{ kg / L glifosato}$	Helsel, 1992
Cal	$\text{CO}_2\text{e} = \{({}^6\text{Mc} * \text{EF}_\text{c}) + ({}^7\text{MD} * {}^9\text{EF}_\text{D})\} * \frac{44}{28}$	IPCC (2006)
Fertilizantes potásicos	$\text{CO}_2\text{e} = 0,2 \text{ kg/kg potasio}$	LAL (2004)
Fertilizantes fosfatados	$\text{CO}_2\text{e} = 0,2 \text{ kg/kg fosforo}$	LAL (2004)

<sup>1</sup>CO<sub>2</sub>e: toneladas de carbono emitido – <sup>2</sup>N<sub>Tn</sub>: toneladas de nitrógeno – <sup>3</sup>EF<sub>N</sub>: factor de emisiones por nitrógeno (por Defecto 0.01) – <sup>4</sup>GWP: potencial de calentamiento global del N<sub>2</sub>O (por defecto 310) – <sup>5</sup>FG: Fracción que se volatiliza como NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub> (valor por defecto 0.1) – <sup>6</sup>Mc: toneladas de cal (CaCO<sub>3</sub>) – <sup>7</sup>MD: toneladas de dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) – EFC y EFD: factores de emisión de cal y dolomita respectivamente (0.12 para carbonato de calcio y 0.13 para dolomita) <sup>8</sup>C: litros de combustible utilizados – <sup>9</sup>EF: factor de emisiones del combustible, por defecto se toma 2.83 kg CO<sub>2</sub>e/1 para diesel y 2.33 CO<sub>2</sub>e/ 1 para gasolina.

Fuente: Adaptado de Narváez *et al*, 2009.

## Balance de GEI

Para cada uno de los sistemas productivos se estableció la ecuación de balance, para ello se agruparon y sumaron todas las emisiones de GEI's de cada una de las fuentes expresadas en kgCO<sub>2</sub>eq, y a estas se les resta la sumatoria de las fijaciones de carbono en el suelo y la biomasa, como lo indica Ibrahim *et al* (2012).

$$\text{Balance GEI} = \sum \text{kgCO}_2\text{eq emisiones} - \sum \text{kgCO}_2\text{eq} \text{tasas de fijación de C en el suelo} + \text{biomasa}$$

Para la determinación de la Huella de Carbono estos valores fueron expresados como kgCO<sub>2</sub>eq/kgcafé verde producido en cada uno de los sistemas simulados.

## Identificación de estrategias de mitigación

Teniendo en cuenta los resultados en el balance de GEI, se procedió a formular las estrategias para los diferentes sistemas productivos investigados, con el fin de que estas sean consideradas como alternativas que minimicen los efectos de los GEI's que se están generando durante todo el proceso productivo de café y de esta manera tengan repercusiones positivas en cambios climáticos deseables.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Emisiones de GEI en los diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.).

En la escala global, el 13% de las emisiones de gases que influyen en el clima pertenece al sector agrícola, en el que está involucrada directamente la producción del cultivo de café, GTZ (2009), afirma que si se toma en cuenta la distribución sectorial de las emisiones de gases invernadero al interior del sector gran parte, un (37%) se debe al uso de fertilizantes. La tabla 5 muestra los resultados de las emisiones de GEI en los sistemas productivos identificados.

**Tabla 5.** Emisiones de GEI's (tCO<sub>2</sub>eq/ha) en los diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la Unión –Nariño<sup>1</sup>.

Fuente de emisión	Sistemas							
	<sup>1</sup> S1	% de participación	<sup>2</sup> S2	% de participación	<sup>3</sup> S3	% de participación	<sup>4</sup> S4	% de participación
Emisiones N <sub>2</sub> O directas (ton CO <sub>2</sub> eq/Ha/año)								
N <sub>2</sub> O por fertilizantes sintéticos (Nitrogenados)	0,08	7,21	0,23	20,58	0,24	21,25	0,56	50,45
N <sub>2</sub> O por residuos (hojarasca café)	0,38	19,72	0,43	22,29	0,52	26,88	0,59	30,78
N <sub>2</sub> O por residuos (hojarasca de sombra)	1,33	52,57	1,20	47,43	0	0	0	0
N <sub>2</sub> O por aplicación de abono orgánico	0,01	6,51	0,01	7,10	0,08	40,00	0,10	47,50
Total	1,80	31,30	1,87	32,52	0,83	14,48	1,25	21,74
Emisiones de CO <sub>2</sub> (ton CO <sub>2</sub> eq/Ha/año)								



CO <sub>2</sub> por fertilizantes fosfatados	0,004	18,87	0,005	20,79	0,007	28,23	0,007	32,14
CO <sub>2</sub> por fertilizantes potásicos	0,015	17,33	0,02	21,52	0,02	23,14	0,03	33,51
CO <sub>2</sub> por herbicidas (Glifosato)	0,04	10,44	0,04	10,44	0,08	20,89	0,20	54,83
CO <sub>2</sub> por aplicación de Cal	0,02	40,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	60,00
CO <sub>2</sub> por combustible fósil	0,05	2,61	0,05	3,12	0,57	32,57	1,08	61,71
Total	0,12	5,43	0,11	5,12	0,67	29,79	1,343	59,62
Total Emisiones	1,92	21,59	1,98	22,31	2,40	27	2,59	29,09

<sup>1</sup>Sistema de café con sombra, <sup>2</sup>Sistema de café con semisombra, <sup>3</sup>Sistema de café con plátano, <sup>4</sup>Sistema de café en monocultivo.

### Emisiones de N<sub>2</sub>O

El principal gas de efecto invernadero que se genera por prácticas agrícolas es el óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) que es expresado como 310 veces la equivalencia del potencial de calentamiento con respecto al CO<sub>2</sub> (Bretscher, 2005).

La fuente de emisión de N<sub>2</sub>O más relevante en los sistemas productivos de café, fue encontrada en el sistema de café bajo sombra (S1) con una emisión de 1,33 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año, que es causada por la incorporación de hojarasca al suelo generada por los árboles de sombra (*Inga sp*), esta cifra se debe, a que la presencia de árboles dentro de un sistema aumenta la cantidad de materia orgánica lábil y ésta a su vez aumenta la emisión de N<sub>2</sub>O a través de un proceso de mineralización.

De Klein; Novoa; Ogle; Smith; Rochette y Wirth (2007) afirman que el óxido nítrico se produce naturalmente en el suelo como resultado de la acción microbiana sobre las transformaciones de amonio en nitrato (nitrificación) y de nitrato en amonio (desnitrificación). Por tanto, el nitrógeno fijado por las plantas leguminosas pueden de alguna manera minimizar las emisiones si se contabiliza como N fijado en la biomasa viva, pero el reciclado en el suelo tienden a elevar las emisiones.

Teniendo en cuenta las diferentes fuentes de fertilización utilizadas por los caficultores para cada sistema de producción de café, se encontró que la fuente de fertilización que más

aporta a la emisión de N<sub>2</sub>O es la que se realiza con fertilizante cafetero (17-6-18-6 y/o 17-6-18-2), este es el fertilizante nitrogenado más utilizado en la zona y el sistema donde es más aplicado es en el de café a pleno sol (S4), por lo que la cantidad de emisión por fertilizantes nitrogenados es significativamente mayor con respecto a los demás sistemas (0.56, 0.24, 0.23, 0.08 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año respectivamente).

De acuerdo con Bretscher (2005) el menor volumen de emisión encontrado en fincas con sistemas de producción sostenible se debe al menor contenido de nitrógeno y, a que los abonos orgánicos contienen compuestos químicos más estables que los fertilizantes sintéticos.

El nitrógeno (N) es el nutriente más limitante de la producción de los sistemas agrícolas, siendo necesaria la aplicación de fertilizantes nitrogenados para una producción agrícola óptima. Se calcula que la agricultura contribuye en cerca de un 80% a las emisiones antropogénicas de N<sub>2</sub>O y en casi un 40% a sus emisiones globales. El N<sub>2</sub>O es estable en la troposfera y tiene un tiempo de permanencia en la atmósfera mayor de 100 años, de forma que su efecto relativo como gas invernadero es unas 130 veces superior al del CO<sub>2</sub>. Por lo tanto las implicaciones del N<sub>2</sub>O producido por la agricultura como gas invernadero durarán durante varias generaciones futuras (Gonzales *et al.* 2007).

### **Emisiones de CO<sub>2</sub>**

En la caficultura, los nutrientes que más se usan para enriquecer los suelos y mejorar el rendimiento son fertilizantes de origen mineral, principalmente de nitrógeno, fosfato y potasio. Se usan también para enriquecer el suelo de nutrientes secundarios u oligoelementos, entre ellos el manganeso, el hierro, el boro y el zinc (ICC,2009).

Las emisiones por fertilizantes fosfatados, potásicos y por aplicación de glifosato son las que presentaron valores menores de emisión con respecto a las demás fuentes. Las emisiones por fertilizantes fosfatados variaron entre 0,004 (S1) y 0,007 (S4) tCO<sub>2</sub>eq/ha/año respectivamente; para fertilizantes potásicos las emisiones fueron 0.015, 0.02, 0.02, 0.03 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año en los sistemas (S1), (S2), (S3), (S4) respectivamente; y para glifosato 0.04, 0.04, 0.08, 0.20 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año en los sistemas evaluados, en estas tres fuentes de emisión se presentó que los sistemas de producción bajo sombra son los que menor emisión reportan debido a las bajas aplicaciones de insumos, mientras que los sistemas (S3) y

(S4) presentan altos valores de emisión lo que se atribuye a la mayor cantidad utilizada de fertilizantes potásicos, fosforados y glifosato.

Con respecto a las emisiones por aplicación de cal, estas variaron entre 0,02 (S1) y 0,03 (S4) tCO<sub>2</sub>eq/ha/año, debido a que los sistemas (S2) y (S3) no realizan aplicaciones de cal (tabla 6). Se presentó un valor mayor de emisiones por esta fuente en el sistema (S4), esto debido a que las mayores cantidades de enmiendas cálcicas se deben a que sistemas convencionales de producción cafetera que no incluyen árboles leguminosos, requieren regular el Al<sup>+++</sup> intercambiable, los suelos generalmente en la zona Norte de Nariño son de naturaleza ácida. Situación contraria encontró Narvaez *et al.* (2009) en donde las fincas certificadas como fincas de producción sostenible, presentaron mayor volumen debido a las aplicaciones que realizan con la finalidad de obtener mejor absorción de los nutrientes disponibles en el suelo sin la aplicación de fertilizantes sintéticos.

Según IPCC (2006) el encalado se emplea para reducir la acidez del suelo y mejorar el crecimiento de los cultivos en sistemas gestionados, en particular en tierras agrícolas y bosques gestionados. El agregado de carbonatos a los suelos, en forma de cal (p. ej., piedra caliza cálcica (CaCO<sub>3</sub>) o dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) conduce a emisiones de CO<sub>2</sub>, puesto que las cales se disuelven y liberan bicarbonato (2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), que se convierte en CO<sub>2</sub> y agua (H<sub>2</sub>O).

Las emisiones provenientes del uso de combustibles fósiles incluyen el transporte (de insumos y producto) y el combustible consumido en las labores de desyerbas (guadaña). Se encontraron emisiones que variaron entre 0,05 para los sistemas (S1), (S2) y 1,08 (S4), y de 0,57 para (S3) tCO<sub>2</sub>eq/ha/año (Tabla 6), presentándose mayores emisiones en el sistema de café en monocultivo (S4) al utilizar 121 L/ha de gasolina (Tabla 1); esto se puede atribuir a que en éste sistema se realizan mayores prácticas de desyerba a través del uso de la guadaña lo que implica un mayor consumo de gasolina. Narváez *et al.* (2009) encontró que las fincas certificadas por RA (Rainforest Alliance) presentan el volumen más altos de emisiones (0.16 tCO<sub>2</sub>eq/ha) provenientes de esta fuente.

Los volúmenes de emisiones totales de GEI's fueron mayores en los sistemas (S3) y (S4) con valores de 2,4 y 2,5 tCO<sub>2</sub>eq/ha para los sistemas cafeteros (S1) y (S2), se obtuvieron valores de 1,92 y 1,98 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año, siendo inferiores a los sistemas convencionales,

corroborándose lo planteado por la UNFCCC (Convención del marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) en las decisiones CDM-EB 42 y CDM-EB 44 de septiembre de 2008, donde se indica que las emisiones de GEI's causadas en sistemas sostenibles son menores, y que éstas se atenúan como resultado de menores cantidades de insumos externos y el uso de arbóreas leguminosas que minimizan el uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados.

### **Tasas de fijación y almacenamiento de carbono en la biomasa de árboles de sombra, café y en el suelo.**

La captura de carbono en los suelos agrícolas se contrapone al proceso de desertificación por medio del papel que juega el incremento de la materia orgánica al suelo y la función que esta cumple sobre la estabilidad de la estructura, resistencia a la erosión hídrica y eólica, a la retención de agua, y al aspecto esencial de la cobertura de la superficie del suelo dada directamente por los residuos de las plantas (cobertura muerta), para prevenir la erosión e incrementar la conservación del agua (FAO 2002).

La tasa de fijación total de carbono almacenado en la biomasa de árboles de sombra, varió entre 0 y 18,59 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año en los sistemas de producción de café S4 y S1 respectivamente, con una tasa de fijación media de 7,45 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año en el S<sub>2</sub> (Tabla 5). Alrededor del 51% de la fijación de carbono fue acumulada por los árboles de sombra (incluyendo maderables, de servicio y frutales), el 12,42% en cafetales y el 30,7% en el suelo (7,45 vs 4,03t CO<sub>2</sub>eq/ha/año, respectivamente; Tabla 5).

**Tabla 6.** Tasas de fijación de carbono en la biomasa de árboles de sombra y en el suelo de los diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la Unión, Nariño.

Sistema	Producción (Kg/ha/año)	Tasa fijación (t CO <sub>2</sub> eq/ha/año)				KgCO <sub>2</sub> eq secuestrado/Kg de producto verde*
		Biomasa leñosas	Biomasa cafetales	Suelo	Total	
Café con sombra	526,25	18,59	1,47	10,66	30,72	58,37
Semisombra	507,45	11,24	1,66	3,47	16,38	32,28
Café-plátano	647,75	0	1,69	1,16	2,85	4,40
Monocultivo	998,25	0	1,69	-0,84	0,85	0,85
Promedio	669,92	7,45	1,63	4,03	13,12	24,39
%		51	12,42	30,7		

\*Producto de café cereza es el café que queda después de la despulpada.

Los sistemas de producción de café bajo sombra (S1) y semisombra (S2) fijaron más carbono en la biomasa y el suelo que los sistemas café plátano y a pleno sol variando de la siguiente forma 30.72, 16.38, 2.85, 0,85 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año (Tabla 6). De igual forma las tasas de fijación de carbono por unidad de café cereza, presentan una diferencia considerable entre los sistemas de producción de café bajo sombra y semisombra de (58.37 y 32.28 kgCO<sub>2</sub>eq/ha/año secuestrado por kg de producto producido) con respecto a los sistemas (S3) y (S4) que obtuvieron valores de 4.40 y 0,85 kgCO<sub>2</sub>eq secuestrado/kg de café cereza. Segura *et al*, 2012 afirman que las características de los árboles de sombra, tal como la densidad y composición botánica, el tamaño de los individuos, la tasa de crecimiento y la edad de la madera, tienen una mayor influencia sobre las tasas de fijación de carbono que los sistemas de monocultivo.

Estudios de fijación de carbono en biomasa en SAF con café han arrojado tasas de entre 7,7 y 16,9 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año (Ávila; Jiménez; Beer; Gómez & Ibrahim, 2001; Aristizábal y Guerra 2002; Hergoualc'h; Blanchart; Skiba; Henault & Harmand, 2012; Andrade; Marín; Pachón y Segura, en edición), coincidiendo con las tasas calculadas de fijación 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).

La tasa de fijación de CO<sub>2</sub>eq almacenado en los suelos varía entre -0,84 y 10,6 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año del sistema en monocultivo (S4) para el sistema de café con sombra (S1), en el sistema de monocultivo existe un decaimiento de C en los suelos de -0,84 tC/ha/año, indicando que es un sistema menos sostenible en el tiempo, esto debido principalmente al laboreo continuo del suelo, baja protección del suelo y pérdida por erosión, se observan mayores valores de fijación de C en los sistemas productivos con sombra, lo que se atribuye a la incorporación de hojarasca tanto de las especies arbóreas como de los cafetales; mientras que en S3 se presentó una tasa de fijación de 1,16 t CO<sub>2</sub>eq/ha/año o de 0,31 t C/ha/año). El carbono fijado en el suelo es el resultado de la incorporación de la materia orgánica generada por la hojarasca y las raíces muertas de los árboles (Ávila, 2001). Veldkamp (1993) menciona que el tipo de suelo también tiene implicaciones directas sobre la capacidad de retener carbono, debido a que los suelos volcánicos

(Andisoles) tienen gran capacidad de almacenar materia orgánica debido a los complejos que se forman con los componentes de la matriz del suelo (Mora, 2001).

### Balance de GEI

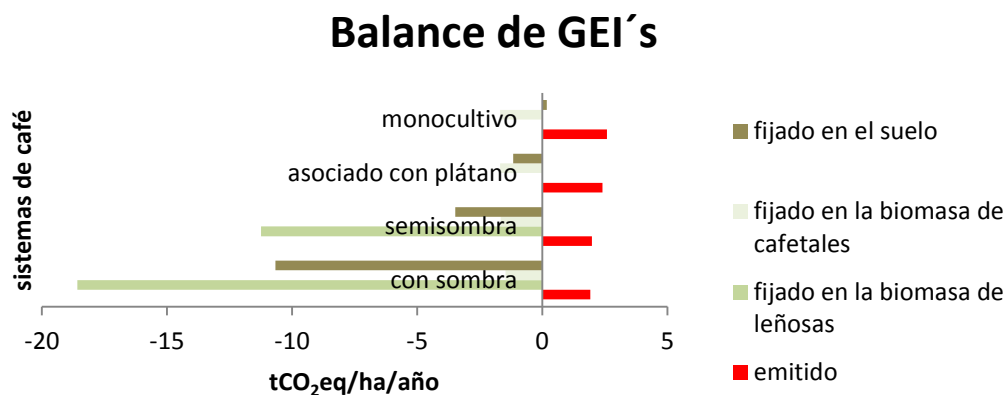
El balance de GEI para los sistemas productivos (S1), (S2) y (S3) es negativo (-28.79, -14.39, -0,44 tCO<sub>2</sub>eq/ha/año) como se muestra en la Tabla 7. Estos valores pueden ser atribuidos a las prácticas de manejo que se generan en cada uno de estos sistemas, las cuales permiten un mayor almacenamiento de carbono tanto en la biomasa (árboles de sombra y cafetos) como en el suelo, logrando contribuir a la mitigación de los GEI's emitidos, al ser superior el valor del carbono almacenado que las emisiones producidas en cada uno de los sistemas; las emisiones de GEI en estos sistemasa diferencia del sistema del café en monocultivo (S4) son mayores con respecto a los GEI's emitidos en los otros sistemas.

**Tabla7.** Estimación del balance de GEI(tCO<sub>2</sub>eq/ha/año) para los diferentes sistemas de producción de café en la Unión, Nariño.

Fuentes de emisión y secuestro de C (tCO <sub>2</sub> eq/ha/año)	Sistema			
	(S1)	(S2)	(S3)	(S4)
t CO <sub>2</sub> eq emitido	+1,92	+1,98	+2,40	+2,59
tCO <sub>2</sub> eq fijado en la Biomasa de leñosas	-18,59	-11,24	0	0
tCO <sub>2</sub> eq fijado en la biomasa de cafetales	-1,47	-1,66	-1,69	-1,69
tCO <sub>2</sub> eq fijado en el suelo	-10,66	-3,47	-1,16	+0,18
tCO <sub>2</sub> eq neto	-28,79	-14,39	-0,44	+1,08
Kg/ha café verde	526,25	507,45	647,75	998,25
kgCO <sub>2</sub> eq neto/kg de café verde	-54,72	-28,35	-0,69	+1,081

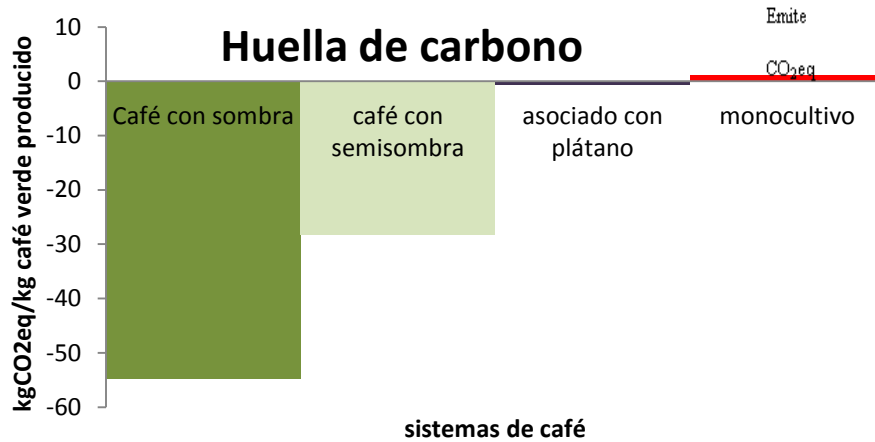
Los valores negativos en el balance final indican que son kgCO<sub>2</sub>eq que sedejaran de producir a la atmosfera por efecto del secuestro de C por parte de las leñosas perennes, los

cafetales y el suelo que suman en el balance final, por tanto  $S4 < S1 > S2 > S3$ , indicando una mayor sostenibilidad en los sistemas de café con sombra (S1) y café con semisombra (S2), el sistema de café en monocultivo (S4) emitiría 1,081 kgCO<sub>2</sub>eq por cada kg de producto verde, correspondiendo así a la huella de carbono (Figura 3 y 4).



**Figura 3.** Balance final de GEI's (tCO<sub>2</sub>eq/ha/año) en los diferentes sistemas cafeteros evaluados en la Unión, Nariño.

Según Segura & Andrade (2012), en investigaciones similares encontró que no existieron 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 CO<sub>2</sub>/kg de café verde de grano producido, coincidiendo en este estudio con el sistema de café en monocultivo (S4). Sin embargo, estos autores encontraron una finca orgánica atípica, cuyo factor de emisión fue increíblemente mayor que el resto de las fincas evaluadas (44,3 kg CO<sub>2</sub>/kg del grano de café verde). Este valor pudo 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.



**Figura 4.** Huella de carbono en kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café verde producido.

El sistema de café con sombra (S1) ocasionó una huella de carbono mayor al sistema de café con semisombra (S2) con -54,72 y -28,35kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café verde producido, en ambos sistemas las fijaciones de carbono son mayores a las emisiones. El sistema de café con plátano tiene una menor contribución en el secuestro de C con respecto a los dos anteriores, disminuyendo así las emisiones en -0,69 kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café en verde, el sistema de café en monocultivo se considera como el único emisor con 1,08 kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café verde producido (Figura 2).

Según Segura & Andrade (2012), en investigaciones similares encontró que no existieron 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 CO<sub>2</sub>/kg de café verde de grano producido, coincidiendo en este estudio con el sistema de café en monocultivo (S4). Sin embargo, estos autores encontraron una finca orgánica atípica, cuyo factor de emisión fue increíblemente mayor que el resto de las fincas evaluadas (44,3 kg CO<sub>2</sub>/kg del grano de café verde). Este valor pudo 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.



## **Estrategias de mitigación**

Con base en la información suministrada por el almacenamiento de carbono, cuantificación de GEI y balance, se proponen las siguientes estrategias para minimizar los GEI's frente al cambio climático en los diferentes sistemas cafeteros evaluados.

### **Estrategia 1.** Minimizar el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Al pasar del sistema de café en monocultivo (S4) para el sistema de café con sombra (S1) se están minimizando por uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados 480 kgCO<sub>2</sub>eq, del sistema de café con plátano (S3) para el sistema de café con sombra (S1) en 210 kgCO<sub>2</sub>eq y del sistema de café con semisombra (S2) para el sistema de café con sombra (S1) en 150 kgCO<sub>2</sub>eq, esto se debe a la importancia de las especies leñosas arbóreas leguminosas que fijan N y disminuyen la fertilización nitrogenada sintética en el sistema café con sombra y semisombra. Como complemento a esta estrategia se propone realizar un monitoreo de medición de GEI en la cadena del sector cafetero de la Unión, de esta manera promover la identificación, cuantificación y seguimiento de las emisiones en los sistemas productivos de café como son los especiales y orgánicos donde la dependencia por fertilizantes sintéticos nitrogenados puede disminuir.

### **Estrategia 2.** Reducción del uso de herbicidas (glifosato)

Al pasar del sistema café en monocultivo (S4) para el sistema café con sombra (S1) se estaría minimizando por aplicación de herbicidas (Glifosato) 160 kgCO<sub>2</sub>eq, pasar del sistema café asociado con plátano (S3) para la adopción del sistema café con sombra (S1) se reduciría en 40 kgCO<sub>2</sub>eq. Para contribuir a la disminución del uso de herbicidas e insecticidas, se propone la capacitación a profesionales y agricultores sobre tecnologías amigables con el medio ambiente que sustituyan parcialmente o por completo el uso de estos compuestos químicos; para ello se debe proponer programas y proyectos con propósitos de masificación de innovaciones tecnológicas de bajo o cero emisiones de GEI a lo largo de toda la cadena del café.

### **Estrategia 3.** Minimización de emisiones por el uso de combustible fósil (CO<sub>2</sub>) por quema, fabricación, transporte y almacenamiento.

Minimizar las labores agrícolas como son la preparación del suelo en el sistema de monocultivo, el uso de la guadaña que origina CO<sub>2</sub> por la quema de combustibles fósiles y

generación de otros gases durante su fabricación, transporte y almacenamiento, estrategia importante en la reducción de GEI's en sistemas cafeteros de la Unión, Nariño, puesto que el presente balance permitió determinar que los sistemas de monocultivo demandan más cantidad de gasolina, al pasar de éste sistema a sistemas más sostenibles como los sistemas de café con sombrío (S1) y sistema con semisombrio (S2) se estarían reduciendo las emisiones de GEI's en 49, y 35 kgCO<sub>2</sub>eq/ha/año respectivamente.

**Estrategia 4.** Implementación del componente arbóreo en los sistemas productivos de café.

Siendo que los árboles son la mayor fuente de almacenamiento de carbono (Tabla 5), contribuyen a la fijación de nitrógeno; lo que permite la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados. El balance de GEI (Tabla 7.) muestra que el sistema de café bajo sombrío (S1) se convierte en un sumidero importante de CO<sub>2</sub>eq al brindar mayores secuestros de C tanto en la biomasa como en el suelo por la producción de hojarasca en el sistema permitiendo unas tasas de fijación significativas en el tiempo. El sistema (S1) café con sombra contrarresta 15,17 veces el valor de las emisiones del sistema café en monocultivo (S4), en tanto que el sistema (S2) café con semisombra contrarresta 7,40 veces el valor de las emisiones de (S4), y el sistema (S3) 3,02 veces el valor de las emisiones del sistema de monocultivo de café (S4), lográndose determinar así que existe un secuestro considerable de C en el sistema (S1) tanto por biomasa de leñosas más el componente de cafetales como por el suelo.

Una de las alternativas más viables para la incorporación del componente arbóreo en los sistemas de café es a través de los SAF, los cuales son amigables con el ambiente, aumentan la diversidad, y son fuente de almacenamiento de C, además las producciones bajo estos sistemas reducen las emisiones de GEI. Para promover la implementación de SAF con café en el municipio de la Unión se deberán desarrollar mecanismos de incentivos para la implementación de sistemas de producción bajo prácticas amigables con el ambiente y que tengan establecidos programas más sostenibles de producción, eficientes con bajas emisiones de GEI y alto almacenamiento de carbono.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las mayores emisiones de gases de efecto invernadero GEI's se totalizaron en el sistema de café en monocultivo, seguidamente en el sistema de café asociado con plátano, sistema de semisombra y el sistema de café bajo sombrío resultó siendo menor emisor de GEI's.

Los sistemas de producción de café bajo sombra y semisombra fijan más carbono en la biomasa que los sistemas de café plátano y de monocultivo a pleno sol. La fijación de C en los suelos en los sistemas café con sombra, semisombra y café con plátano presentaron tasas de fijación de acúmulos de C positivas de mayor a menor respectivamente, en el sistema de monocultivo se presenta una pérdida gradual de C del suelo en el tiempo, debido a la baja incorporación de materia vegetal y a las labores intensas del suelo.

Alrededor del 51% de la fijación de carbono se presentó por la biomasa de los árboles de sombra (incluyendo maderables, de servicio y frutales), y un 30% restante por el suelo para los sistemas café con sombra, semisombra y café asociado con plátano. El sistema de café en monocultivo se considera como menos sostenible en el tiempo, ya que no permite el acumulo de C en la biomasa y en los suelos, con una huella de carbono estimada en 1,081 kgCO<sub>2</sub>eq/kg de café verde producido.

Los sistemas de producción de café bajo sombra en el municipio de la unión son sostenibles y contribuyen a la disminución del cambio climático.

Se recomienda el desarrollo de planes y proyectos enfocados a la reducción de GEI a través de la implementación de prácticas amigables con el ambiente en la cadena productiva del café como son la utilización de menores fuentes externas que garanticen la producción de cafés más limpios y de mejor calidad.

Se recomienda realizar otros estudios sobre un mejor monitoreo de emisiones de GEI's en sistemas cafeteros y la simulación de secuestro de C en otras zonas de Nariño y Colombia, con el fin de tener una base de datos importante que permita estudiar el comportamiento de GEI's con el cambio climático regional, nacional y global.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a la colaboración y apoyo de las siguientes personas e instituciones:

Al programa de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Nariño, en especial a Hector Ordoñez, Amanda Silva, Ildefonso Narváez, Carmen Lucia del Castillo.

A la Federación y comité de cafeteros del Municipio de la Unión.

A familiares y amigos y a todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron al alcance y cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE, H. E IBRAHIM, M. 2003. Como monitorear carbono en sistemas silvopastoriles. Agroforestería en las Américas, Vol. 10. CATIE. Turrialba. Costa Rica. Volumen 10: 109 – 116.

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.; 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.

BARRETO, E & LA SCALA, N. 2011. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. Agriculture, Ecosystems and Environment, 141 (2011) 77-85. 2011.

BROWN, K. 1994. Economic and political feasibility of international carbon offsets. Forest Ecology and Management 68: 217-229.

BUDOWSKI, B. 1999. Secuestro de carbono y gestión forestal en América Tropical. Bosque y desarrollo 20 (21) 17-20.

BRETSCHER, D. 2005. Agricultura orgánica y gases con efecto invernadero. Corporación Educativa para el Desarrollo Costarricense (CEDECO). San José, Costa Rica. 27.

CAFÉ DE COLOMBIA. 2012. Café y medio ambiente. Disponible en: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/mucho\\_mas\\_que\\_una\\_bebida/cafey\\_medio\\_ambiente/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/mucho_mas_que_una_bebida/cafey_medio_ambiente/).

CEPAL. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Naciones Unidas, CEPAL. Santiago de Chile. 148 p. Ciesla, WM. 1996. Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Roma, IT, FAO. 147 p.

DIXON, K. 1995. Sistemas agroforestales y gases de invernadero. Agroforestería en las Américas 2 (7): 22-26.

FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Paris, Francia

FAO. 2011. Herramientas para la adaptación y mitigación del cambio climático en el sector agropecuario. Lima, Perú. Disponible en: <http://www.rlc.fao.org/es/publicaciones/acc>.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. 2013. Huella de carbono, prioridad para la Federación de Cafeteros de Colombia. Disponible en: <http://www.federaciondecafeteros.org/algrano-fnc-es>.

FISCHER, M.J; TRUJILLO, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales. (1999) Turrialba, Costa Rica; FAO –CATIE, SIDE. p. 115-135.

GONZALES, C; ESTAVILLO, J; PINTO, M; PEREDA, M; AIZPURA, A. 2007 Fertilization nitrogenada y sostenibilidad: contaminación ambiental frente a producción y calidad. Disponible en: [http://www.ikerkuntza.ehu.es/p273content/es/contenidos/informacion/vri\\_encuentos/es\\_vri\\_encu/adjuntos/4\\_GMurua\\_L.pdf](http://www.ikerkuntza.ehu.es/p273content/es/contenidos/informacion/vri_encuentos/es_vri_encu/adjuntos/4_GMurua_L.pdf). recuperado el 24 de marzo del 2014.

HELSEL, ZR. 1992. Energy and alternatives for fertilizer and pesticide use. In: Fluck RC, editor. Energy in farm production. Amsterdam: Elsevier; 1992. p. 177 – 201.

HERGOUALC'H, K.; BLANCHART, E.; SKIBA, U.; HENAULT, C. & HARMAND, J. M. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee () monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148: 102–110.

IBRAHIM, M.; SEPÚLVEDA, C.; TOBAR, D.; RÍOS, N.; GUERRA, L.; CASASOLA, F.; VEGA, A. 2012. Balance de gases de efecto de invernadero en los sistemas ganaderos de doble propósito en la región Chorotega. Disponible en: [http://biblioteca.catie.ac.cr:5151/repositoriomap/bitstream/123456789/230/1/Ibrahim\\_Balance%20de%20gases.pdf](http://biblioteca.catie.ac.cr:5151/repositoriomap/bitstream/123456789/230/1/Ibrahim_Balance%20de%20gases.pdf) recuperado el 10 de febrero del 2014.

IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUC). Suiza. 628.

ICC. 2009. Estudio de los precios de los fertilizantes. Disponible en: <http://dev.ico.org/documents/icc-102-2c-fertilizers.pdf>.

IPCC. 2007. Synthesis report: Climate change 2007. IPCC. Suiza. 52.

LAL, R., 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub> - enrichment. *Soil Till. Res.* 43, 81-107.

NAIR, R. et al. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Plant nutrition. Soil Science*.

NARVAEZ, I.; GONZALES, C. 2009. Almacenamiento de carbono en fincas cafeteras certificadas en Costa Rica. 24 pag. Turrialba, Costa Rica.

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.

ORDOÑEZ, H y NAVIA, J. 2013. Tipificación de los sistemas de producción de café en el municipio de La Unión Nariño. Seminario Internacional de Agroforestería; Quibdó – Choco, Colombia. 20 p.

SEGURA, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CTIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.

SEGURA, M Y KANNINEN, M. 2006. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *BIOTROPICA*. 37(1): 2–8.

SMITH, K. A.; McTAGGART, I. P. & TSURUTA, H. Emissions of N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub>O associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use and Management*. 13, supplement 4, 296-304. 1997.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2008. CDM - EB44. Executive board of the clean development mechanism forty-fourth meeting. UNFCCC. 24.

ZAROR, C. 2007. Cambio climático y cambio global. *Ciencia Ahora*. 20 (10). México. 21-