



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación de la emisión y fijación de gases efecto invernadero en la producción de café en el departamento de Antioquia

Sergio Emilio Jaramillo Otálvaro

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2015

Estimación de la emisión y fijación de gases efecto invernadero en la producción de café en el departamento de Antioquia

Sergio Emilio Jaramillo Otálvaro

Tesis de investigación presentada para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director:

Dsc., Ingeniero Agrícola, Jairo Alexander Osorio Saraz

Codirector:

Ph.D., Ingeniero Forestal, Guillermo Correa Londoño

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2015

Después de salir de la zona de confort la necesidad fertiliza los sueños de seguir creciendo.

Agradecimientos

Dedico muy especialmente a mi linda familia, Luz Edilma, Sebastián y Ana María, quienes fortalecieron día a día esta meta.

A mis padres y hermanos

Agradezco a la familia cafetera de Antioquia que muy gentilmente compartió y comprendió la gran importancia del trabajo.

A mis tutores director y codirector del trabajo de grado, quienes me orientaron día a día en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

La baja rentabilidad del negocio cafetero, influenciado principalmente por la crisis económica a nivel internacional y la influencia del cambio climático, hace re diseñar las diferentes estrategias comerciales en pro de competir en el mercado por una diferenciación en la calidad de taza y la producción sostenible. Por tal motivo esta investigación tuvo como objetivo estimar el balance de emisión y fijación de GEI en la producción de cafés especiales con base en las directrices del IPCC 2006 las cuales son las primeras reportadas para el país. Se obtuvieron dos modelos alométricos (Ecuaciones 1 y 2), que permiten estimar la biomasa del cafeto (Ba) y proyectar la ganancia mensual promedia de biomasa del cafeto ($Gmpbc$).

El trabajo fue desarrollado en los núcleos con potencial de producción de cafés especiales del departamento de Antioquia, en los municipios de Ciudad Bolívar; Giraldo, La Ceja-EI Retiro y Urrao, donde 30 productores cafeteros fueron evaluados. Los resultados muestran que se fijan en promedio 1,068 kg de CO_2e/kg café cereza y 745 kg de $CO_2e/ha-mes$. El balance de fijación y emisión fue positivo de 0,268 kg de CO_2e/kg café cereza y 259 kg de $CO_2e/ha-mes$. Las emisiones de GEI por perdida de carbono de la materia orgánica del suelo, incorporación de materia orgánica y la descomposición de la hojarasca de café, peso el 84,3% de las emisiones totales, el 15,7% correspondió a las emisiones por fertilización nitrogenada.

Palabras claves:

Café especiales, Gases de efecto invernadero, biomasa, fijación, emisión,

Abstract

The low profitability of the coffee business, mainly influenced by the international economic crisis and the impact of climate change makes re design the different commercial strategies for competing in the market for a differentiation in the quality of coffee and sustainable production.

Therefore this study aims to estimate the balance of GEI emission and fixation based on the 2006 IPCC guidelines , two allometric models were obtained (Equations 1 and 2) to estimate the biomass of the coffee tree (Ba), and project the average monthly gain of biomass Coffee (Gmpbc), which are the first reported in the country.

The work was developed in the nuclei of the department of Antioquia, in the municipalities of Ciudad Bolívar; Giraldo, La Ceja-El Retiro and Urrao, where 30 coffee producers were assessed. The results show that on average 0.674 fixing kg CO₂e / kg coffee cherries and 745 kg of CO₂e / ha month. The balance was positive locking and release of 0,252 kg CO₂e / kg coffee cherries and 259 kg CO₂e / ha month. The carbon emissions from loss of SOM, MO incorporation and decomposition of litter coffee, weight 84.3% and 15.7% by additions of nitrogen synthetic fertilizers, being the largest generators.

Key words:

Special coffee, Greenhouse gases, biomass, fixing, broadcast.

Tabla de contenido

1. Marco teórico.....	4
1.1 Origen del café.....	4
1.2 Especies de café.....	4
1.2.1 Variedades de café en Colombia.....	5
1.3 Mercado cafetero.....	6
1.3.1 A nivel mundial.....	6
1.3.2 A nivel nacional.....	6
1.3.3 A nivel departamental.....	7
1.4 Tendencia del mercado del café.....	8
1.4.1 Tendencia mercado de cafés especiales.....	8
1.4.2 Tendencia del mercado de producción de cafés sostenibles.....	9
1.5 Proceso de producción de café cereza que impactan en la emisión y fijación de gases de efecto de invernadero (GEI).....	11
1.5.1 Aportes por fijación de GEI en la producción de cafés especiales.....	12
1.5.2 Aportes GEI por fertilización con ureas, aplicaciones de enmiendas y materia orgánica.....	15
1.6 Cambio Climático.....	19
2. Metodología.....	24
2.1 Localización.....	24
2.2 Unidad experimental.....	24
2.3 Variables medidas.....	25
2.4 Estimación de la emisión de N ₂ O y CO ₂ e derivado de la aplicación de fertilizantes Nitrogenados, Calces, materia orgánica y mineralización del Nitrógeno. ...	27
2.4.1 Estimación de la emisión N ₂ O y CO ₂ e por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados a los suelos, (FSN).	28
2.4.2 Estimación de la emisión N ₂ O y CO ₂ e, relacionada con la pérdida de C de la materia orgánica del suelo, incorporación de materia orgánica y la descomposición de la hojarasca. (FSOM, conjunto con FON y FCR).....	28
2.4.3 Estimación de la emisión del CO ₂ e por aplicación de Cal (Caliza y Dolomítica).....	29
2.5 Estimación de la Fijación de CO ₂ e por acumulación de biomasa.	29
2.6 Aproximación de una herramienta matemática para estimar el balance de la emisión y fijación de GEI para las zonas con potencial de producción de cafés especiales.....	32
3. Resultados y discusión.....	33
3.1 Estimación promedia por núcleo de la emisión y fijación de GEI en kg de CO ₂ e/ por kg café cereza.....	33
3.1.1 Emisión promedia de GEI por pérdida de C de la materia orgánica del suelo, descomposición de la hojarasca y aporte de MO (Kg CO ₂ e/kg de café cereza producido), por núcleo.....	33
3.1.2 Emisión promedia de GEI por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados (kg de CO ₂ e/kg café cereza).....	34
3.1.3 Fijación promedia de GEI por acumulación de biomasa en kg de CO ₂ e/kg café cereza, por núcleo.....	35
3.2 Estimación promedia por núcleo de la emisión y fijación de GEI en kg de CO ₂ e/ por ha-mes.....	36

3.2.1 Emisión de GEI promedia por núcleo, por pérdida de C de la materia orgánica del suelo, descomposición de la hojarasca y aporte de MO (kg CO ₂ e /ha-mes).....	36
3.2.2 Emisión de GEI promedia por núcleo, por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados Kg de CO ₂ e/ha-mes.....	37
3.2.3 Fijación Promedia de GEI por núcleo, por acumulación de biomasa en kg de CO ₂ e/ha-mes	37
3.3 Balance promedio de emisión y fijación de GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales.....	38
3.3.1 Balance de emisión y fijación de GEI en kg CO ₂ e por kg Café cereza por núcleos.	38
3.3.2 Balance de emisión y fijación de GEI en kg CO ₂ e por hectárea mes.	39
3.4 Desarrollo de la herramienta matemática para estimar el balance de emisión y fijación de gases de efecto de invernadero (GEI) en la producción de cafés especiales	40
3.4.1 Modelos alométricos para estimar la fijación de la biomasa actual del cafeto (Ba). 41	
3.4.2 Modelos alométricos para estimar la ganancia mensual promedia de biomasa del cafeto (Gmpc)	41
3.4.3 Adaptación de la ecuación del IPCC 2006 en función de las pérdidas de C de la materia orgánica del suelo, por incorporación de materia orgánica, descomposición de la hojarasca. (FSOM-ON,-CR).	44
3.4.4 Adaptación de la ecuación del IPCC 2006 en función la emisión GEI por aportes de fertilizantes sintéticos nitrogenados al cultivo de café.....	45
3.4.5 Adaptación e integración de las ecuación del IPCC 2006 en función la emisión de GEI por aplicaciones de cales.	45
3.5 Modelo matemática para estimar el balance de fijación y emisión de GEI en la producción de cafés especiales (kg de CO ₂ /kg café cereza).....	46
3.5.1 Modelo para la estimación de la Fijación kg CO ₂ ep.....	47
3.5.2 Modelo para la estimación de las emisiones GEI en kg CO ₂ ep/kg de café cereza cosechado en el periodo.	48
4. Conclusiones y recomendaciones	50
4.1 Conclusiones	50
4.2 Recomendaciones:	51
5. Anexos.....	52
6. Bibliografía.....	59

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 Actualidad del negocio de los cafés especiales 2014	7
Figura 2 Distribución espacial típica de los lotes en las fincas cafeteras	12
Figura 3 Relación entre la temperatura media del aire promedio y la tasa de crecimiento de (<i>Coffea arabica</i> L.) de porte bajo para rango de temperatura de 18.8 y 22 °C.....	13
Figura 4 Balance de emisión y fijación de GEI en el proceso de producción de cafés especiales.	18
Figura 5 . Proceso de medición de la biomasa del café en T2.....	30
Figura 6 Proceso de medición de la biomasa del café en T1.....	30
Figura 7 Balance promedio de emisión y fijación de CO ₂ e por kg de café cereza por núcleo.	39
Figura 8 Balance promedio de emisión y fijación de CO ₂ e/ha-mes por núcleo.	40
Figura 9 Comparación entre la estimación de la fijación de GEI con datos de campo y el modelo (Bay Gmpbc).....	43
Figura 10 Comparación entre los balances de emisión y fijación de GEI por finca estimados a partir de los datos de campo y del modelo.	49

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Relación entre la temperatura promedio el número de cruces y la tasa de crecimiento de entre nudos.	13
Tabla 2. Relación del volumen del tallo, volumen de madera y diámetros del tronco de café en tres diferentes alturas del tallo en la variedad castillo.	14
Tabla 3. Composición de algunos materiales encalantes en Colombia	17
Tabla 4. Principales fuentes de emisión de GEI, con sus respectivos potenciales de calentamiento Global	21
Tabla 5. Localización de la finca cafetera con potencial de producción de cafés especiales por núcleo.	26
Tabla 6 Promedios de emisión de GEI por pérdida de C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de MO en Kg de CO ₂ e por kg cc producido por núcleo.	34
Tabla 7 Emisión promedio GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados en kg de CO ₂ e/kg cc.	35
Tabla 8 Fijación promedio de GEI por núcleos con potencial de producción de café especial en kg CO ₂ e por kg de café cereza producido.	35
Tabla 9 Promedios de emisión de GEI por núcleos con potencial de producción de cafés especiales por pérdida de C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de materia orgánica por ha-mes.	36
Tabla 10 Emisión promedio GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados en kg de CO ₂ e/ha-mes.....	37
Tabla 11. Fijación promedio de GEI por núcleos con potencial de producción de café especial en kg CO ₂ e por ha-mes.....	38
Tabla 12 Balance de emisión y fijación GEI por kilogramo de café cereza.....	38
Tabla 13. Balance de emisión y fijación de GEI por núcleo ha-mes	39
Tabla 14 Análisis de varianza y matriz de correlación del modelo Ba aproximada al procedimiento NLIN	41
Tabla 15 Análisis de varianza y estimación del modelo de regresión polinomial múltiple, para LN en función de altitud, biomasa actual, y la edad del cafeto.	42
Tabla 16 Modelos de estimación de biomasa actual y ganancia mensual promedio de biomasa del cafeto.....	42

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>GEI</i>	Gases de Efecto Invernadero
<i>SCAA</i>	Escala Asociación de Cafés Especiales de América
<i>Núcleo</i>	Región o finca con potencial de producción de cafés especiales
<i>IPCC</i>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<i>CO₂e</i>	Dióxido de carbono equivalente
<i>CO₂ep</i>	Dióxido de carbono equivalente a un periodo dado
<i>T1</i>	Evaluación en un tiempo inicial
<i>T2</i>	Evaluación en un tiempo actual
<i>MOc</i>	Materia orgánica calcinada
<i>GWP</i>	Potencial de calentamiento global
<i>Cc</i>	Café cereza
<i>DA</i>	Densidad aparente del suelo
<i>Ps</i>	Peso del suelo
<i>D-hc</i>	Diámetro a la altura de crecimiento
<i>Ba</i>	Biomasa actual
<i>Gmpbc</i>	Ganancia mensual promedia de la biomasa de un cafeto
<i>BefGEIccp</i>	Balance de emisión y fijación de gases de efecto invernadero de café cereza
<i>EF</i>	Factor de emisión
<i>EF1</i>	Factor de emisión para emisiones de N ₂ O de aportes de N, kg N ₂ O–N
<i>FON</i>	Cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos por periodo
<i>FCR</i>	Cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos)
	Cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la
<i>FSOM</i>	Pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra.
<i>FSN</i>	Cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético

Introducción

En Colombia existen alrededor de 530.000 caficultores, de los cuales el 95% son pequeños productores que cuentan con menos de cinco hectáreas de tierra (1). La producción de café genera aproximadamente 500.000 empleos directos convirtiéndose en una importante fuente de empleo en el sector rural colombiano. Antioquia posee 94 municipios productores de café y produce 2 millones de sacos en 125.000 ha, lo que representa el 16% de la producción nacional.

Actualmente, en el escenario internacional de producción de café, Colombia ha perdido terreno frente a países como Brasil, Vietnam, Indonesia y Etiopía, ubicándose en el quinto escalafón, de acuerdo con las estadísticas de la Organización Internacional del Café (OIC) (2); sin embargo, es el mayor productor de café arábica, considerado grano de alta calidad.(3)

En 2012, la cotización del café colombiano en la bolsa de Nueva York registró una disminución del 31% en relación al año 2011. De igual manera, para el año 2012 se registró una caída en las exportaciones de 7,2 millones de sacos de café verde, 7,3% por debajo de las exportaciones del año anterior. Consecuentemente, el valor de las exportaciones se redujo en un 25%, pasando de USD 2.847 millones a USD 2.134 millones (4). Esto ha afectado la rentabilidad del negocio, pues ha estado directamente influenciada por la crisis económica a nivel internacional y la influencia del cambio climático, lo que exige rediseñar las diferentes estrategias comerciales por parte de Federación Nacional de Cafeteros (FNC) y la Gobernación de Antioquia en pro de competir en el mercado por una diferenciación en la calidad de taza y la producción sostenible (5). Sin embargo, Colombia para el año 2012 tuvo un crecimiento en el valor de las exportaciones de cafés especiales del 180%, con relación al año anterior, cuyo valor en ventas fue de USD 116 millones, para una cobertura de 129 mil productores, de los cuales 45 mil han logrado la certificación de 148 mil hectáreas (6). Entre 2008 y 2011, las exportaciones de micro lotes en el País crecieron cerca de un 210%; un 95% de dichos micro lotes exportados por Colombia provienen del departamento del Huila (7).

En años recientes, como complemento a los cafés de alta calidad, los cafés especiales han incluido el término cafés “sostenible”, lo cual implica la protección del medio ambiente, mejorando las actividades agronómicas y las prácticas comerciales, que

suponen la protección del medio ambiente que mejoren la calidad socio económica de los productores y trabajadores (8). Por lo tanto, la producción de cafés sostenibles no debe ser ajena al cambio climático y su manifestación más notoria: el calentamiento global y los eventos extremos que serán crecientemente un marco obligado en el cual se desarrollarán las actividades humanas y los intercambios económicos en las próximas décadas (9).

La FNC da a conocer que la medición de la huella de carbono en la cadena de valor del café permitirá identificar las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), y a través de estas se puede determinar las ineficiencias corregibles, mediante el mejoramiento de las diferentes prácticas agronómicas. Por tal motivo para el futuro cercano se requiere cuantificar y compensar la emisión de GEI generados en los diferentes procesos de producción del café, donde aún no se tiene datos, ni protocolos ajustados a los diferentes procesos de producción, ni para Colombia ni para Antioquia, que permitan estimar y mitigar los efectos de los GEI del cultivo.

La Gobernación de Antioquia está desarrollando el proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales”, cuya estrategia es la intervención en el mejoramiento de la producción de cafés especiales, para el acceso a mercados de cafés diferenciados, donde se han identificado a través de dos concursos de taza de café 21 regiones con potencial de producción de cafés especiales, que en su mayoría son pequeños productores de zonas marginales altas, con tazas superiores a 82 puntos de la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA), por lo cual poseen potencial para aplicar al mercado de micro lotes y así obtener una prima superior a un dólar por libra (10).

El proyecto busca que los productores de cafés especiales comercialicen directamente su café a través de micro lotes diferenciados por su calidad y perfil de taza, pero según las tendencias a nivel internacional, el valor que está dispuesto a pagar de más un consumidor de café especial, está dado no solamente por algunas características sensoriales que lo diferencia de los cafés convencionales, sino también por una segunda exigencia que es cada día mayor, “la producción de una taza sostenible y amigable con el medio ambiente” (5), de la cual se conoce muy poco en Colombia sobre todo en estimación del balance de emisión y fijación de GEI en los procesos de producción del café.

Por las características geográficas y ambientales de los diferentes suelos de las regiones con potencial de producción de cafés especiales de Antioquia, los cuales se encuentran principalmente por encima de la cota de 1800 msnm, cuyos suelos tienden a tener altos contenidos de materia orgánica y pH ácidos, lo que disminuye la eficiencia de los aportes nutricionales por fertilización y mineralización, el cual incrementa los volúmenes de aplicaciones de cal y fertilizantes, lo que incide de una manera directa e indirecta en la emisión y fijación de GEI en el proceso de producción de cafés especiales.

El plan de manejo agronómico del cultivo de café, principalmente la renovación y la nutrición de este, está muy influenciado por la dinámica del precio interno del café, cuando hay buen precio, se incrementan los niveles de aporte de fertilizantes,

conllevando sobre aplicaciones de fertilizantes y de enmiendas, los cuales no son cuantificados, ni mucho menos valorados en cuanto a su efecto en la emisiones de GEI. Por tal motivo este es el primer trabajo en Colombia que buscó estimar el balance de la emisión y fijación de GEI en el proceso de producción de cafés especiales y de esta manera poder cuantificar exactamente las diferentes fuentes de emisiones para poder establecer un plan de mitigación a estas.

Este trabajo le dará una respuesta parcial a las nuevas exigencias del consumidor: “la producción de una taza sostenible y amigable con el medio ambiente”; por lo tanto, se requiere estimar el aporte aproximado de GEI y determinar cuáles son las labores agronómicas que más afectan la emisión de GEI equivalentes al dióxido de carbono (CO₂e), en los procesos de producción del café en cereza.

Por lo tanto, el desarrollo de esta investigación buscó inicialmente cuantificar el balance de emisión y fijación de GEI por kilogramo de CO₂e por kg de café cereza (cc) producido y kilogramo de CO₂e por ha-mes, en 30 fincas cafeteras con potencial de producción de cafés especiales, en cuatro núcleos del departamento de Antioquia (Cuidad Bolívar, Giraldo, La Ceja-El Retiro y Urrao), con base en las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático 2006, (IPCC, 2006) con un nivel 1, y a partir de estos resultados obtenido en campo se desarrolló una aproximación a una herramienta matemática que permite estimar los balances de emisión y fijación GEI en los procesos de producción de café cereza, el cual comprende dos modelos alométricos Ba y Gmpbc. Y a partir de esta herramienta se podrá mitigar y compensar los diferentes impactos ambientales generados en el proceso de producción del cafés, de una manera medible.

1. Marco teórico

1.1 Origen del café

El café (*Coffea arabica* L), es originario de las regiones tropicales altas de Etiopía, situadas entre los 6° y 9° norte, entre 1600 y 2000 metros de altitud, con temperaturas medias entre 18° y 20°C y que requieren entre 1.500 y 1.600 mm de precipitación media anual (11).

El café posee más de 6000 especies, pertenece a la familia de las Rubiaceas, compuesta por 500 géneros y. Esta diversidad de especies de que se tiene actualmente el café es producto de la interacción de estas formas genéticas y los distintos ambientes o climas en que se desarrollaron a lo largo de su evolución, en su mayoría de origen tropical, y con amplia distribución geográfica, de todos los géneros que constituyen las Rubiaceas, el género *Coffea* es el de mayor importancia económica. De las 103 especies descritas en el género *Coffea*, 41 son originarias del África continental, donde se distribuye a lo largo de la zona tropical húmeda. Aproximadamente 59 especies se encuentran silvestres en la isla de Madagascar, mientras que por lo menos tres, son originaria de las islas Mascarenas, particularmente de Mauricius y las islas La Reunión (12).

1.2 Especies de café

- *Coffea canephora* (Robusta).

Existen dos grupos comerciales conocidos, Robusta y Conilon, este último caracterizados por su grano pequeño. La variedad *canephora* es originaria de la zona ecuatorial del África central y occidental. Se cultiva ampliamente en algunos países americanos como Brasil y Ecuador. Es útil en el mejoramiento de *Coffea arabica* por su rusticidad, buena producción y la resistencia de algunos clones a plagas y enfermedades, especialmente a la roya del cafeto y las enfermedades del fruto. Su bebida se caracteriza por ser amarga y tener un alto contenido de cafeína (13).

- *Coffea eugenioides*

Especie diploide originaria de la región de los grandes lagos africanos, de la cual se han descrito diferentes formas. Presenta arboles con resistencia a la roya, útiles en programas de hibridación con *C. arabica*. Las plantas son de poco crecimiento, hojas y frutos pequeños. Se registra como tolerante a condiciones desfavorables de suelo (13). Es uno de los padres de la especie *C. arabica*.

– *Coffea liberica*

Especie diploide, variable en formas taxonómicas y caracteres morfológicos con árboles de porte pequeño en lugar de arbustos. Los frutos son grandes, de disco prominente, pulpa gruesa y densa. Aunque tuvo éxito en África, por su resistencia a la roya, su cultivo fue abandonado, prefiriendo la especie *C. canephora*, por sus mayores producciones, manejo más fácil y calidad de la bebida (14).

– *Coffea arabica*

Nativo de Etiopía y/o Yemen; es la principal especie cultivada para la producción de café, y la de mayor antigüedad en la agricultura, datándose su uso desde finales del primer milenio en la península arábiga. Alcanza los 12 m de altura en estado silvestre, con hojas opuestas, ovales u oblongas, de color verde oscuro. Los frutos de *C. arabica* contienen menos cafeína que otras especies cultivadas comercialmente. Se cultiva ampliamente en Colombia. Las variedades más conocidas son: Típica, Borbón, Mundo Novo, Caturra, Mokka o Mocca y Geisha.

1.2.1 Variedades de café en Colombia

En Colombia el germoplasma se ha introducido en diferentes épocas, procedente de países como Etiopía, El Congo, India, Brasil y Costa Rica se ha utilizado con el objetivo del mejoramiento del café. La mayoría de introducciones comprenden *C. arabica*, y algunas selecciones de *C. canephora*, *C. liberica* y unos cuantos representantes de otras 12 especies de este género.

La variedad típica fue la más cultivada en América. En Colombia fue la única variedad hasta la época de 1960, en 1955, se empezaron a realizar experimentos con Borbón y Mundo Novo, los cuales mostraban más productividad.

Al principio se hicieron cruzamientos de Típica con Borbón, buscando selecciones que combinaran un tamaño de grano grande con alta producción. En la década de 1960 se introdujo y evaluó la variedad Caturra;. A comienzos de 1970 y ante la inminencia de la llegada de la roya el país se cruzaron genotipos portadores de genes de resistencia a la roya, el más importante de los cuales es el híbrido de Timor, un híbrido natural entre *C. arabica* y *C. canephora*, con varios genes de resistencia a la enfermedad. Para la liberación de variedades resistentes a la roya, y considerando la estrecha base genética de las variedades cultivada en ese momento, sinónimo de vulnerabilidad, se escogió como estrategia de mejoramiento genético la diversidad y como resultado del cruzamiento de Caturra con el híbrido de Timor se obtuvo la variedad Colombia, y más tarde las variedades Tabi y Castillo.

1.3 Mercado cafetero

1.3.1 A nivel mundial

El café ha sido por muchas décadas un producto de gran importancia para el comercio internacional, pues es el artículo agrícola de mayor volumen, que involucra a naciones pobres en desarrollo como productores y a países desarrollados como consumidores. La oferta mundial ha estado históricamente ligada a los niveles de producción de Brasil. Desde los finales de los años 90, la producción mundial se incrementó 20%, alcanzando cerca de 130 millones de sacos para el año cafetero 1999/2000 (15), y un mercado mundial superior a 90 millones de sacos para el 2006 (16).

El mercado internacional para el periodo 2012-2013 registró una producción de 151 millones de sacos donde Brasil y Vietnam contribuyeron con 56 y 25 millones de sacos respectivamente. El consumo mundial se estimó en 138,3 millones de sacos, cifra considerada como la más alta en la historia, siendo Estados Unidos el mayor consumidor con 21,9 millones de sacos (17).

1.3.2 A nivel nacional

En Colombia existen alrededor de 530.000 caficultores, de los cuales el 95% son pequeños productores que cuentan con menos de cinco hectáreas de tierra (18). La producción de café genera aproximadamente 500.000 empleos directos, convirtiéndose en una importante fuente de empleo en el sector rural colombiano.

La producción y rentabilidad del negocio ha está influenciado por la crisis económica a nivel internacional y la influencia del cambio climático, lo que exige rediseñar las diferentes estrategias comerciales por parte de Federación Nacional de Cafeteros en pro de competir en el mercado por una diferenciación en la calidad de taza y la producción sostenible (17).

Para el año 2012, Colombia tuvo un crecimiento en el valor de las exportaciones de cafés especiales del 180% con relación al año anterior, cuyo valor en ventas fue de USD 116 millones, para una cobertura de 129 mil productores, de los cuales 45 mil han logrado la certificación de 148 mil hectáreas, (6) entre 2008 y 2011 las exportaciones de micro lotes en el país crecieron cerca de un 210%, un 95% de dichos micro lotes exportados por Colombia provienen de Huila. Durante el 2011 se exportaron 66 micro lotes, con un precio que osciló entre 2,42 y 6,73 USD/libra, precio que se trasladó al productor (18).

Según el clúster de café de Antioquia, los cafés superiores a 80 puntos en la escala SCAA (Microlotes, especializados por mercado, estándar premium), tienen una tendencia en el mercado a crecer aproximadamente un 30%. (Figura 1).

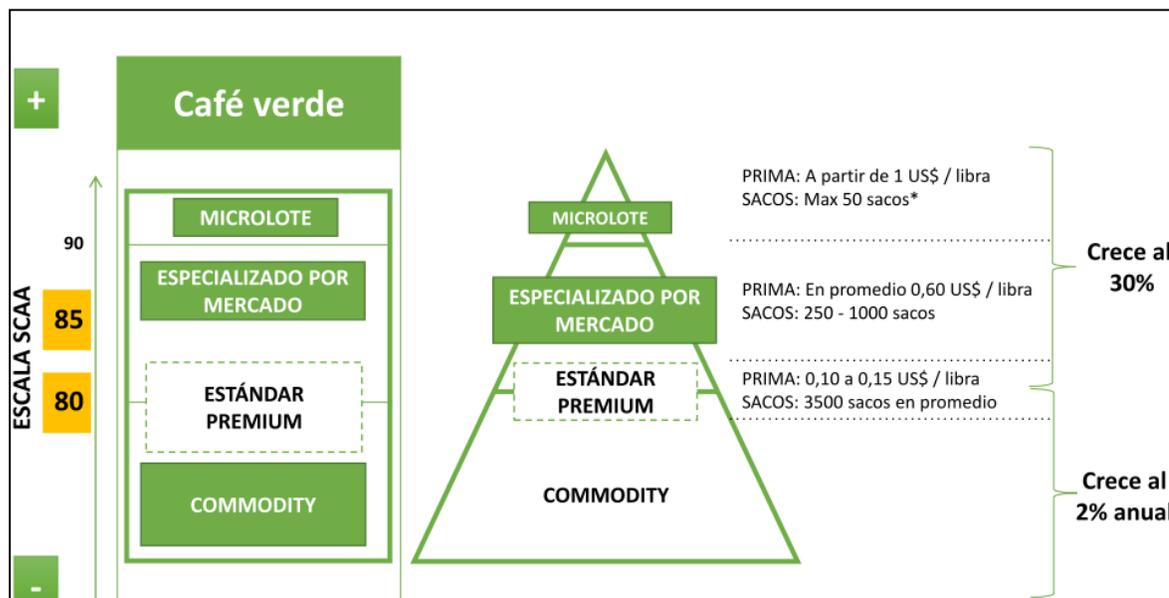


Figura 1 Actualidad del negocio de los cafés especiales 2014
 Fuente: Clúster café Antioquia, Cámara de comercio de Medellín para Antioquia 2014.

1.3.3 A nivel departamental

Antioquia posee 94 municipios productores de café, que producen 2 millones de sacos en 125.000 ha, que contribuyen con el 16% de la producción nacional. La Gobernación de Antioquia, a través de su proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales”, ha identificado 21 núcleos con potencial de producción de cafés especiales, debido a sus características naturales de producción, altura, clima y suelos en las siguientes subregiones del departamento:

- Suroeste Antioqueño: Andes, Betulia, Caramanta, Ciudad Bolívar, Montebello, Salgar, Titiribí y Urrao.
- Oriente: Abejorral, Sonsón, La Ceja, El Retiro, Alejandría, San Carlos.
- Nordeste: Amalfi
- Norte: Santa Rosa de Osos
- Occidente: Santafé de Antioquia, Giraldo, Dabeiba, Peque y Caicedo

Estos 21 núcleos han sido reconocidos por la Gobernación de Antioquia a través de sus dos concursos de taza de café de Antioquia, lo que permitió identificar a productores y núcleos con potencial en la producción de cafés especiales, con tazas mayores a 80 puntos en la escala SCAA. Para el 2013 se logró que participaran del concurso 34 lotes,

y 21 compradores, de los cuales 9 lotes de café alcanzaron un precio hasta de dos dólares la libra.

Para el año 2014 se logró incrementar el número de lotes y de compradores de 60 y 38 respectivamente, de los cuales 55 lotes alcanzaron un precio superior a los 2 dólares la libra, el lote ganador del concurso fue subastado en US15.5/libra. (10)

1.4 Tendencia del mercado del café

La baja cotización del café colombiano en la bolsa de Nueva York, registró una disminución del 31% en los precios 2012 con relación al año 2011 (17), donde la baja rentabilidad del negocio hace rediseñar las diferentes estrategias comerciales por parte de FNC y la gobernación de Antioquia, en pro de competir en el mercado por una diferenciación en la calidad de taza y la producción sostenible (4), a la vez buscar la denominación de origen, para mejorar la participación en el mercado a nivel internacional.

El crecimiento del consumo de café en el mundo está en los países productores/exportadores (26% del total) y los países emergentes (18%), y el consumo de café en valor crece en el mundo por encima del consumo en volumen (7% vs 2%) (3), donde la tendencia del mercado a nivel mundial está enmarcada en dos líneas una a los cafés especiales y la otra a la producción de cafés sostenibles.

1.4.1 Tendencia mercado de cafés especiales

La industria de cafés especiales nació en Norte América, como reacción a la disminución de la calidad de café ofrecido por los tostadores comerciales. El café especial se enfoca en una percepción de alta calidad y originalidad, se define por algunos agentes de la industria como “buena preparación de un único origen y sabor distinto (8). Son cafés que provienen de un país, región o finca, con un sinnúmero de cualidades únicas, debido a que crecen en sitios especiales, y que son vendidos al consumidor final sin ser mezclados con cafés de otras calidades o con cafés de otros orígenes (19), son valorados por los consumidores por sus atributos consistentes, verificables y sostenibles, por lo cual se paga un precio superior al productor.

Se pueden clasificar según la escala SCAA en: (Figura 1).

- Microlotes: son producciones máximas de 50 sacos de café verde con más 90 puntos SCAA.
- Especializados por mercado: son producciones máximas por finca entre 250 a 1.000 sacos de café verde con un puntaje entre 80-85 puntos SCAA.
- Estándar Prémium: son lotes de café verdes máximo de 3.500 sacos con un puntaje de 80 puntos SCAA.

En los últimos cinco años, La FNC vendió 4,8 millones de sacos de cafés especiales, que generaron primas adicionales transferidas a los productores involucrados por valor de \$93.835 millones de pesos. (al grano).

Otra tendencia es la denominación de origen del café, la cuales se refiere a las especificaciones de una región geográfica, conocida por ofrecer un producto, cuyas características y calidad se deben esencialmente al ambiente dentro la región o finca, con cualidades únicas, debido a que crece en sitios especiales (núcleos), que busca promover el reconocimiento regional, crear confianza y lealtad con el consumidor, mejorar y mantiene la calidad, son vendidos por micro lotes y sin ser mezclado al consumidor final. Entre los cafés de origen más famosos se encuentran: Granos de Moca de Yemen Java, Sumatra y Celebese de Indonesia; Blue Mountain de Jamaica; Cona de Hawaii; Antigua de Guatemala; Terrazú y Tres Ríos de Costa Rica; AA de Kenia y Supremos de Colombia (19).

Para industria y los consumidores se han creado los estándares de calidad, que transmiten información sobre los atributos del producto. Estos estándares se pueden clasificar en tres grupos: Obligatorios, voluntarios y privados.

- Estándares Obligatorios: Cuando los impone un gobierno en forma de regulación. Dicho estándar puede afectar los flujos comerciales debido a la adopción de requerimientos técnicos, pruebas, certificados, y procedimientos de etiquetado para mercancías importadas.
- Estándares voluntarios: tienen como origen de coordinación formal, en el que los participantes de un mercado o sector buscan lograr un acuerdo. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), ha establecido más de 7000 estándares voluntarios, algunos están estipulados como respuesta a las peticiones de los consumidores, como las etiquetas ecológicas y etiquetado de comercio justo.
- Estándares Privado: Son desarrollados y monitoreados internamente por organizaciones internacionales. Producción de cafés especiales ha crecido en años recientes

1.4.2 Tendencia del mercado de producción de cafés sostenibles

En el acuerdo internacional de café de 2007 el objeto de mayor prioridad para el sector cafetero mundial estuvo enmarcado en los tres pilares fundamentales que refuerza el desarrollo sostenible: el económico, social y el ambiental donde OIC impulsa promover la toma de conciencia de las necesidades de una economía sostenible del café. (15).

Dentro de la categoría de cafés de valor agregado, los sostenibles han crecido a un ritmo más acelerado y representan más del 60% del portafolio de cafés especiales de la FNC. Las políticas para el cafés sostenibles han estado lideradas por la FNC y las diferentes firmas tostadoras, como Nestlé, Nespresso, Starbucks o Kraft, las cuales ha involucrado a los productores el acceso a certificaciones y protocolos internacionales principalmente en los sellos como 4C, Fair Trade, Rainforest Alliance, Organic y UTZ, entre otros.

Colombia es el segundo proveedor mundial de café certificado Fair Trade USA, el tercero mundial de café 4C, el segundo de café Rainforest y el tercero de café UTZ. Ya cuenta con más de 184 mil productores con verificaciones y/o certificaciones de algún protocolo de sostenibilidad y por tanto reciben primas de calidad. (20).

Cada estándar de sostenibilidad o sello pone mayor o menor énfasis en alguno de los tres pilares de la sostenibilidad: responsabilidad social, sensibilidad ambiental y equidad económica. Pero para el año 2014 los diferentes sellos han incorporado en sus listan de verificación nuevos elementos referentes al cambio climático en función de las mediciones de las emisiones de GEI:

- El sello C.A.F.E Practices de Starbucks incorporo el criterio cambio climático, donde se verifica que la finca haya participa en un proyecto formal para calcular y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el tiempo. (21).
- El sello de certificación UTZ, incorpora el bloque ambiental que busca que las fincas cafeteras tenga la capacidad de adaptarse al cambio climático y reducir las emisiones de GEI que contribuyen al cambio climático. (22).
- El sello Renforest Alliance incorpora a su lista de verificación en su principio 10 “Manejo integrado de cosecha” diferentes elemento cuyo objetivo principal está encaminado en reducir las emisiones de GEI e incrementar las captura de dióxido de carbono. (23).
- De igual manera bajo el marco de la sostenibilidad se requiere continuamente de la evolución de la ingeniería para construir tecnología que permita ser más eficiente y sostenible en las labores agrícolas y el procesamiento del café, a través de trabajos de investigación. Las cuales ya han generado tecnología para la recolección de café, el beneficio ecológico por vía húmeda con reducción en el consumo de agua y control de contaminación del más del 90%.(20).

1.5 Proceso de producción de café cereza que impactan en la emisión y fijación de gases de efecto de invernadero (GEI)

El proceso de producción de café para la zona cafetera colombiana está concentrada principalmente en la Variedad Castillo, Caturra, Catimor, con una distribución espacial de las finca cafetera entre 4 a 8 lotes con diferentes edades, densidades de siembra y variedades, lo que implica un conocimiento propio de la fenología del café para cada región geográfica, ya que es importante para la apropiada planeación en el manejo de las practicas agronómicas como fertilización, control de enfermedades, plagas, malezas y renovación de los lotes.

La floración del cafeto determina la amplitud, el número de pases de la cosecha y la distribución porcentual de la misma a lo largo del año, esto se traduce en la cosecha y la travesía (24), para las zonas con potencial de producción de cafés especiales en Antioquia la época de cosecha se concentra en el segundo semestre y la travesía en el primer semestre. Por tal motivo la fenología de café es esencial para los cálculos de la estimación de tasa de crecimiento y acumulación o pérdida de la biomasa del cafeto.

Como se puede observar en el figura 2 la mayoría de los arreglos de las fincas con potencial de producción de cafés especial, están compuestos por varios lotes de diferentes variedades, densidades y edad de siembra. Para determinar la fijación de biomasa total de la finca en un periodo de tiempo dado, una buena herramienta es determinar la edad y densidad ponderada a través de su peso relativo de cada lote.

La edad ponderada y densidad ponderada de una finca cafetera permite comparar y evaluar en un tiempo dado el incremento o disminución de la biomasa en función de la renovación del lote y la edad de este, esto implica si en un tiempo 1 (T_1) frente a un tiempo 2 (T_2), se realizó una renovación de un lote con tamaño significativo ya sea por siembra o por zoqueo, esto impactará en la disminución de la edad ponderada y densidad ponderada de la finca, y al disminuir la edad ponderada disminuirá la fijación de la biomasa en el T_2 frente al T_1 , lo que impacta negativamente la emisión de CO_2 por parte de la finca para este periodo.

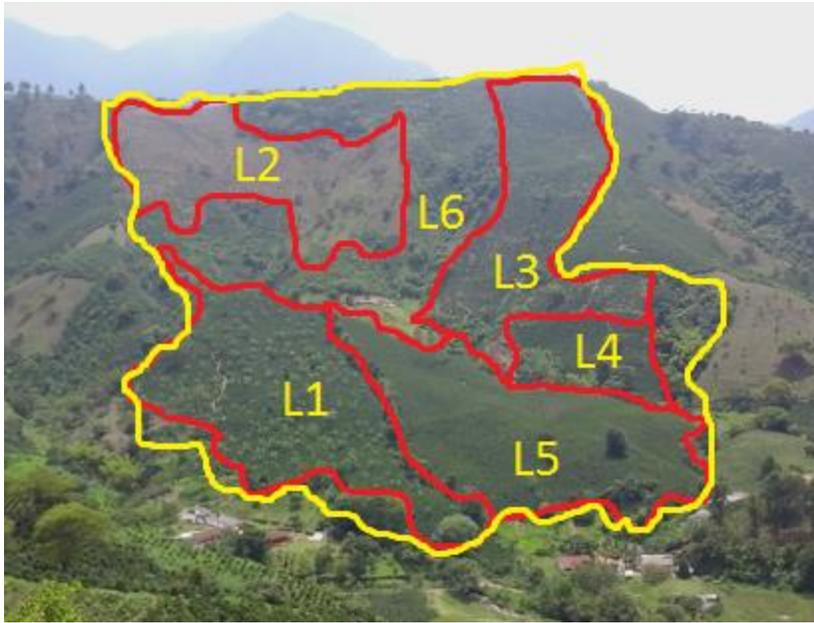


Figura 2 Distribución espacial típica de los lotes en las fincas cafeteras
(Fuente: elaboración propia).

1.5.1 Aportes por fijación de GEI en la producción de cafés especiales

La tasa de crecimiento y acumulación de biomasa en las estructuras leñosas del cafeto (tallo/raíz) en un periodo dado en el cultivo permite la fijación de CO₂ de la atmósfera y que estas se acumulen en estas estructuras. Para la estimación de la biomasa generada en el proceso de producción de cafés especiales se puede estimar según la metodología del IPCC 2006, Nivel 1 (25), sobre la base de los cambios de existencia de carbono del ecosistema, este incluye biomasa aérea y biomasa subterránea, donde se estima una relación entre la biomasa aérea y subterránea de 0,27 - 0,28 ton de raíz/m³, muy parecida a la registrada en almacenamiento promedio de carbono en sistemas agroforestales de Laurel y Poré con café en Costa Rica donde se determinó una relación promedio de 23% (26).

Para las estimaciones de la tasa de crecimiento en café (cm/mes) y fijación de biomasa (kg/mes), se deben tener en cuenta que esta variable está en función de la variedad de café, la temperatura, la precipitación, la densidad de siembra, la fertilización, la edad del cultivo entre otras. Estudios realizados por Cenicafé estimó una tasa de formación de cruces del café, que oscila entre 0,76 a 1,32 cruces/mes, con un valor medio de 1 cruz/mes. La tasa de crecimiento para la Variedad Castillo oscila entre 2 y 6 cm/mes, con un valor promedio de 4 cm/mes. (27), (figura 3 y tabla 1).

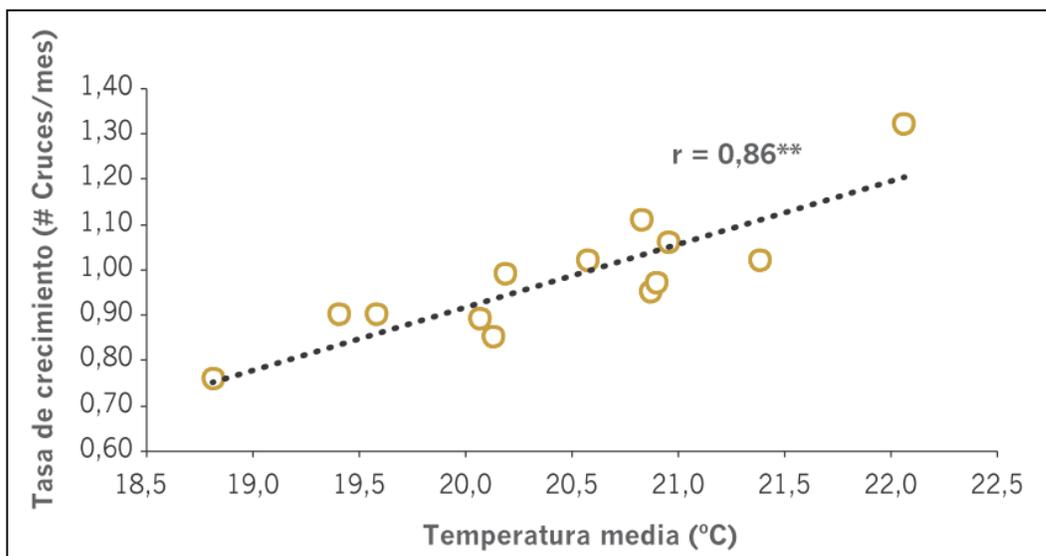


Figura 3 Relación entre la temperatura media del aire promedio y la tasa de crecimiento de (*Coffea arabica* L.) de porte bajo para rango de temperatura de 18.8 y 22 °C.

(Fuente: Ramírez 2011).

Tabla 1. Relación entre la temperatura promedio el número de cruces y la tasa de crecimiento de entre nudos.

Temperatura media (°C)	Para Una longitud promedio de entrenudos de 4 cm	
	Cruces/mes	Tasa de crecimiento (cm.mes ⁻¹)
18,0	0,64	0,026
18,41	0,70	0,028
19,5	0,85	0,034
20,0	0,92	0,037
20,5	0,99	0,040
21,0	1,06	0,042
21,5	1,12	0,045
22,1	1,21	0,048
22,5	1,26	0,050

Fuente: Ramírez 2011.

Estudios realizados por Farfán (2014), en la estación central Naranjal, en 5.000 tallos por hectárea de la variedad Colombia de 7 años, encontró un peso de 17,5 t, con un volumen de 37,5 m³ .y que los volúmenes del tallo, y el volumen total y los diámetros del tallo varían de acuerdo a la variedad y densidad de siembra (Tabla 2).

Tabla 2. Relación del volumen del tallo, volumen de madera y diámetros del tronco de café en tres diferentes alturas del tallo en la variedad castillo.

Densidad de siembra	Volumen de Tallo cm ³	Volumen m ³ .ha ⁻¹	Diámetro Inferior (cm)	Diámetro Medio (cm)	Diámetro Superior (cm)
7200	1657	11,9	5,8	4,3	2,7
5400	2307	12,5	6,4	5,1	3,3
3600	1762	6,3	5,8	4,6	2,6
9000	1584	14,3	5,3	4,3	2,6

Fuente: Farfán 2014.

De igual manera Farfán (2014) reporta una densidad la madera de café que varía de acuerdo a la variedad: Para la variedad castillo reporto una densidad de 0,543 g cm⁻³ y de 0,613 g cm⁻³, para la variedad Tabí (28). Otros estudios realizados por el grupo Monarca, sobre propiedades físico-mecánicas de la madera del café han reportado una densidad de la madera del café de 0.91 g cm⁻³, donde la madera de café es más densa que la Teca (*Tectona grandis*), el Zapán (*Clathrotropis brachypetalo*), y el Algarrobo (*Prosopis sp.*), (29) . De igual manera el IPCC 2006 estima que la madera de café tiene una fracción de carbono de materia seca de 0,5 ton C md⁻¹ /ton dm (30).

La estimación de la biomasa del café puede establecerse a partir del volumen de la secciones leñosas del tallo (Volumen útil leñoso) (28), la cual se estima con la ecuación volumen útil de tallo multiplicado por densidad de la madera de café y a partir del promedio de diferentes lecturas del lote más pertinente en función de la edad y densidad ponderada se puede proyectar la acumulación de la biomasa total multiplicando por el total de árboles.

$$Vs = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 + r^2 + (R + r))$$

Dónde:

Vs = Volumen de la sección

h =Altura de la sección

R = Radio mayor

r= Radio menor

Otra forma de calcular la biomasa aérea del cafeto es el modelo alométrico para estimar la biomasa aérea de *Coffea arabica de segura* (31)

$$B=10^{(-1.113+1.578 \cdot \log(D15)+0.581 \cdot \text{Log}(ht))}$$

Dónde:

B= Biomasa aérea del cafeto (kg/árbol)

D15 = Diámetro del tronco a 15 cm del suelo

Ht = altura del cafeto.

1.5.2 Aportes GEI por fertilización con ureas, aplicaciones de enmiendas y materia orgánica

Los grandes retos de la agricultura moderna radica en satisfacer una demanda cada vez mayor por lo que, los productores se ven obligados a mejorar cada día más su productividad, a través de incrementar los aportes de fertilizantes haciendo un uso inadecuado de este, que ha conllevado a la degradación química de los suelos y a la contaminación de otros recursos naturales (32).

De los tres millones de hectáreas distribuidas en la zona cafetera, el 52% de estos suelos son suelos derivados de cenizas volcánicas, altamente fijadoras de fósforo, con pH inferiores a 5,5, son ricos en materia orgánica, de excelentes condiciones físicas, son Andisoles con predominio de alófono en la fracción arcillas y posee óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, factores que influyen negativamente en la disponibilidad de nutrientes para el cafeto. (33). La forma más común para suplir estos requerimientos nutricionales del cultivo de café son con aplicaciones de fertilizantes comerciales, que son aplicados en su mayoría sin el apoyo de un análisis químico de fertilidad del suelo y una correcta interpretación de este, con base a la densidad aparente de estos suelos.

Se estima que las necesidades nutricionales del cafeto para vegetación son 100-10-90 kg de N- P₂O₅ – K₂O respectivamente por hectárea, según la producción del lote se calcula que por cada 100 arrobas de café pergamino seco por hectárea se requiere 32-4-40 kg N - P₂O₅– K₂O. Frente a las aplicaciones de Cal, se recomienda que no se debe aplicar cales al suelos con pH superiores 5.5 ni que contenga más de 4.0 miliequivalentes/ 100 gramos de suelo de calcio (33). De igual manera Cenicafé reportó para cafetos de más de 2.000 días de sembrado tiene un requerimiento nutricional por hectárea año de 560 kg de N, 52 kg de P, 520 kg de K y 240 kg de Ca (32).

El aporte por fertilización con urea a los suelos conduce a una pérdida de CO₂ que se fija en el proceso de producción industrial. La urea (CO(NH₂)₂) se convierte en amonio (NH₄⁺), ion hidroxilo (OH⁻), y bicarbonato (HCO₃⁻), en presencia de agua y de enzimas de ureasa. De igual manera cuando se le agrega cal, el bicarbonato que se forma se convierte en CO₂ y agua. Esta categoría de fuente de emisión se incluye porque la absorción de CO₂ de la atmósfera durante la fabricación de urea se estima en el sector de procesos industriales y el uso del fertilizantes sintéticos nitrogenados (30).

– Aportes de GEI Por fertilización con fuentes de Urea

Actualmente, para cafetos en producción se recomienda aplicar entre 200 y 280 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de N, de acuerdo con los niveles de materia orgánica en el suelo. Esta demanda puede ser suplida con diferentes fuentes nitrogenadas, entre las cuales se destacan: urea, nitrato de amonio, nitrato de amonio cálcico, fosfato diamónico (DAP),

fosfato monoamónico (MAP), nitrato de potasio, nitrato de calcio y sulfato de amonio. Del anterior grupo de fertilizantes, la urea es la fuente que más ha incrementado su demanda mundial en los últimos años, y ha adquirido gran importancia económica debido a la tendencia al alza en su precio, debido a las variaciones del precio internacional del petróleo, y más exactamente del gas natural, materia prima de la cual se deriva este insumo (34). Sadeghian et al. (35) encontró que cuando se deja de aplicar N, la producción se puede reducir hasta en un 49% en cafetales al sol y un 40% en cafetales con sombrero parcial, en los primeros dos años de producción.

El nitrógeno es importante porque forma parte de la proteína, clorofila, alcaloides etc., es importante también en la relación C/N por su acción en la duración del periodo vegetativo, constituye del 1 al 5% de materia seca en general, (33). Ordóñez et al. (36) relaciono la textura del suelo con la volatilización, donde encontró que suelos de textura arcillosa y franco-arcillosa presentaron niveles más bajos de pérdida de NH_3 con valores entre 6,28 y 6,98% en comparación con aquellos suelos de textura franco-arcillo-arenosa, donde se registraron pérdidas de NH_3 entre 21,03 y 18,26%.

Otros estudios realizados por Leal et al. (37), en suelos derivados de cenizas volcánicas ubicado en la zona cafetera central de Colombia, encontraron pérdidas de nitrógeno por volatilización ocurridas en plantaciones de café a libre exposición solar y en etapa productiva, tuvieron un incremento notable al segundo día de aplicación, en la cual se presentaron los máximos valores (8,6% para Naranjal y 9,3% para Paraguaicito). Durante los primeros cinco días las pérdidas acumuladas tuvieron promedios de 22,8% para Naranjal y 27,2% para Paraguaicito. Al finalizar el período de evaluación, el porcentaje total de pérdidas de N ascendió a 30,4% en Naranjal y 34,8% en Paraguaicito.

Estudios realizados por segura en el 2012 sobre la medición de la huella de carbono de café en Costa Rica determino que 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 $\text{kg CO}_2\text{e/kg}$ de grano de café verde (38).

– Aporte GEI por aplicaciones de enmiendas

Por medio de esta práctica se busca incorporar cal al suelo para corregir efectivamente la acidez e incrementar los niveles de calcio en los suelos cafeteros, aumentar el pH y neutralizar el aluminio intercambiables, aportar nutrientes como calcio, magnesio y en algunas oportunidades fósforo.

Las fuentes de cal que más se aplican en Colombia son: Carbonato de Ca, Mg que se encuentran en la Cal agrícola (CaCO_3), Cal viva (CaO), Cal apagada Ca(OH) , dolomítica, (CaCO_3 Mg CO_3). Ver tabla 4 de composiciones, Las recomendaciones Técnicas de aplicación por parte de FNC se dan principalmente para la época de siembra y en los lotes de renovación, e igualmente en aquellos suelos con pH muy ácidos. (32).

Tabla 3. Composición de algunos materiales encalantes en Colombia

Principales fuentes de Cal			
Fuentes	CaCO ₃	MgCO ₃	CaO
	(%)		
Cal agrícola	70		40
Cal apagada	Min 80		Min 40
Dolomítica	50	30 - 40	
Roca fosfórica	Min 57		15 – 20
Cal viva	Min 70		Min 40

Fuente: Sandeghian 2008.

Los agregados de carbono a los suelos en forma de cal ya sea por piedras calizas (CaCO₃) o dolomítica (CaMg (CO₃)₂) conducen a emisiones de CO₂, ya que las cales se disuelven y liberan bicarbonato (2HCO₃⁻), que se convierten en CO₂ y agua (30). Cuando se aplica calcio soluble (CaO), estas fuentes no contienen carbono inorgánico y no se incluyen en los cálculos para la estimación de las emisiones de CO₂ por aplicaciones al suelo, pues el proceso de producción de este libera el CO₂ orgánico en la fabricación y no en el suelo.

– Aportes de GEI por mineralización de la materia orgánica

Los depósitos de carbono orgánico en el suelo no son estáticos debido a la diferencias entre entradas y salidas de C a través del tiempo, en gran parte la entrada está dada por la productividad del cultivo, la descomposición de la hojarasca y su incorporación al suelo mineral. Las pérdidas o salidas del C están dadas principalmente por la mineralización, respiración del suelo de la erosión y lixiviación (25).

Una gran parte de la entrada de C procede de la hojarasca aérea de los suelos por lo que la MOs tiende a concentrarse en los horizontes superiores del suelo, con aproximadamente la mitad de este en los primeros 30 cm,(25) a menudo este perfil superior es el más expuesto a las descomposiciones química, perturbaciones naturales y manejo del hombre. La hojarasca producida por el cultivo de café están compuesta de carbono rico en energía que se pierde principalmente en CO₂, y por eso contribuye en poca medida al mantenimiento de la materia orgánica del suelos (39). Ver figura 4.

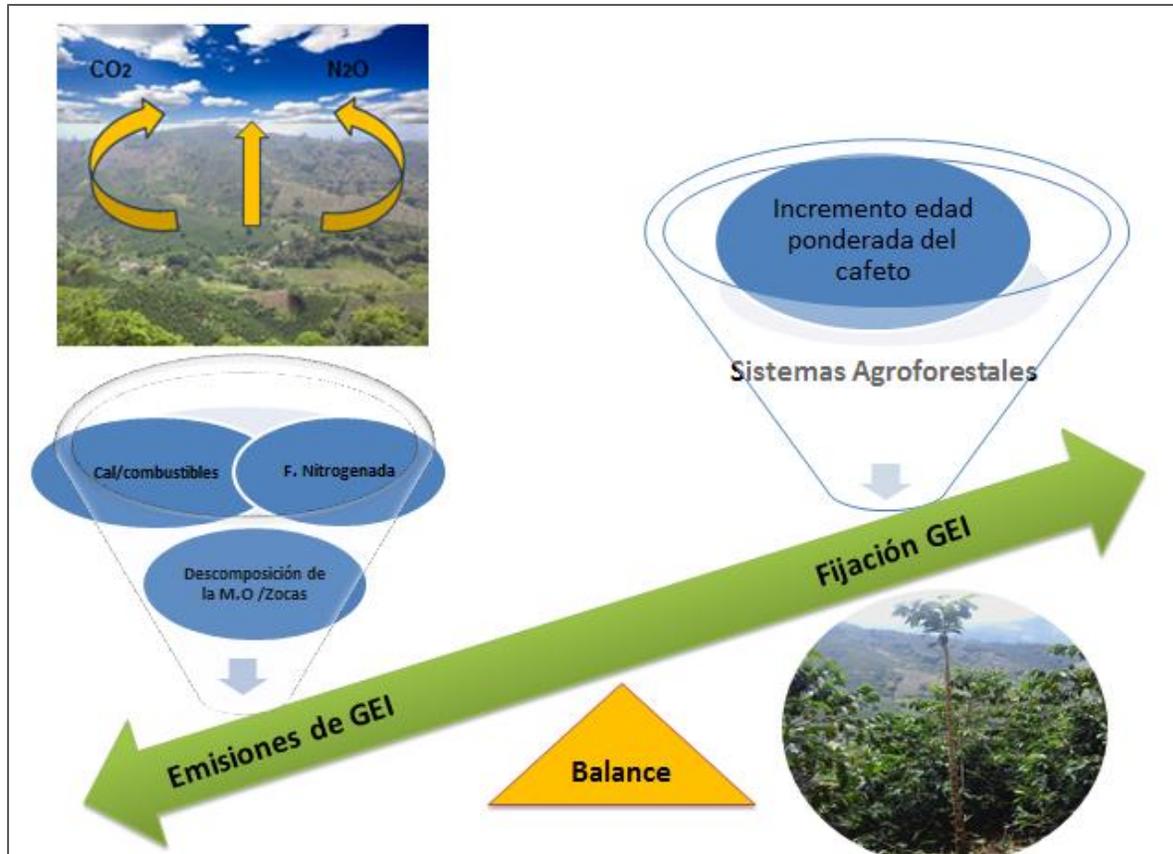


Figura 4 Balance de emisión y fijación de GEI en el proceso de producción de cafés especiales.
(Fuente: Elaboración propia).

Según las comparaciones de los diferentes métodos de estimación de carbono del suelo el IPCC 2006 establece que los suelos que no se saturan con agua durante algunos días deben contener al menos el 20% de C orgánico en peso, lo que equivale aproximadamente el 35% de la materia orgánica. (40). El método de Van Bemmelen de 1,724, el cual asume que el 58% de la materia orgánica está compuesto por C. Sin embargo, este contenido deriva de la composición elemental promedio de los ácidos húmicos pero no contempla la composición de todas las sustancias orgánicas del suelo (41), Muchos autores han cuestionado la aplicación indiscriminada de este factor y han demostrado que tiene alta variabilidad entre tipos de suelos y aún dentro de un mismo perfil (42), Galantini informó que se pueden encontrar concentraciones de C del 58% en la materia orgánica humificada y hasta del 40-42% en la materia orgánica joven o de residuos vegetales.

El método de calcinación LOI (*loss on ignition*) cuantifica directamente el contenido de materia orgánica y se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a elevadas temperaturas (43). La temperatura óptima se estableció alrededor de 360°C, ya que temperaturas más altas queman el carbono orgánico, destruye más

carbono inorgánico, causa más pérdida de agua estructural en la arcilla, y se utiliza más energía eléctrica (44).

En la Subestación Experimental Paraguaicito de Cenicafe se evaluó la descomposición de la materia seca y la transferencia de nutrientes, el café produjo $4,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de materia orgánica. La tasa de descomposición mensual (k) fluctuó entre 0.87 y 1,08, y se encontró que en los 365 días se descomponen e incorporan al suelo el 65,1% de los residuos producidos por el café, con una transferencia de nutrientes al suelo del 64,8% de N; 82,9% de P, 96,7% de K, 34,3% de Ca y 63,1% de Mg; (45).

Otros estudios realizados por Cardona (2005), encontró el valor K para café libre exposición de 1.70 para Chinchiná a una altitud de 1.400 msnm, y 1.39 para el municipio de Albán a 1.500 msnm, y un valor K 1.44 y 1.51 para café con sombrío respectivamente. Igualmente encontró que no hay diferencias estadísticas entre la tasa de descomposición K en café con sombrío y a libre exposición solar. Estos resultados de descomposición coinciden con los registros de la literatura para materia orgánica en zona cafetera colombiana, en lo que la hojarasca producida por el café es catalogada como material de rápida descomposición.

En Costa Rica se han hecho algunos estudió sobre la variación estacional y espacial de la transformación del N en las plantaciones de café con y sin árboles de sombra en el Valle Central, sobre la mineralización de N y nitrificación neta, donde se encontró que la mineralización neta del N y nitrificación neta visualizan marcadas variaciones estacionales, las tasas más bajas ocurrieron durante la estación seca (enero - marzo). La tasa anual media de la mineralización neta de N fue de $14.8 \text{ g N mineralizado}$ el cual se oxida a NO_3 en ambos tipos de plantaciones (46). De igual manera se encontró que en Costa Rica reciben relativamente grandes aportes de N a través de la fertilización (aproximadamente $30 \text{ g N m}^2 \text{ año}^{-1}$).

1.6 Cambio Climático

El cambio climático también conocido como calentamiento global es uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad (47). La convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNCCU), define el cambio climático como: “cambio climático atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial”, y que incide en la variedad de clima observado durante un periodo de tiempo comparables (9). Las principales fuentes de emisión de GEI a nivel mundial se concentran en la generación de electricidad, mano facturas, construcciones, transporte y quema de otros combustibles con un 71% del total, el sector agropecuario con un 13% y la emisión neta ocasionada por los cambios de uso de suelo con un 6%.

Tras conocer la existencia del problema que plantea el posible cambio climático mundial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el programa de la convención Marco de

las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNCCU), programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, crearon conjuntamente en el año 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), cuyo objetivo es completar la conversión marco (CMNUCC), mediante su trabajo en materia de desarrollar una metodología para estimar los inventarios nacionales de GEI (30).

Actualmente las mediciones y las metodologías para estimar las emisiones y observaciones de GEI para el sector de la agricultura, silvicultura, y otros usos del suelo (AFLOU), incluyen un marco general para aplicar los métodos y las ecuaciones pertinentes para cada sector que posee una estructura de tres niveles:

- Nivel 1, esta herramienta está diseñada para que resulte los más simples de usar, para lo cual se suministran, en la directrices del IPCC 2006 las ecuaciones y los valores de los parámetros por defecto, donde se cuenta con datos de las diferentes actividad específicas por país. En lo referido al nivel 1, a menudo se dispone mundialmente de fuentes de estimaciones de datos de la actividad, por ejemplo, tasas de forestación, estadística de producción agrícola, mapas de cobertura de la tierra a nivel global, uso de fertilizantes, datos sobre la población ganadera, etc. Estos datos en general son poco precisos a nivel de espacio.
- En el Nivel 2 se emplea la misma metodología del IPCC 2006 que en el nivel 1, pero se aplican factores de emisión y de cambio en las existencias que se basan en datos específicos del país o de la región en lo referido a las categorías más importantes de uso de la tierra o de ganado. También se utilizan datos de resolución temporal y espacial y de actividad más desagregada, de manera que se correspondan con los coeficientes definidos para el país por regiones específicas y por categorías.
- En el Nivel 3, se utilizan métodos de orden superior, incluidos modelos y sistemas de medición de inventario, hechos a medida para satisfacer las circunstancias nacionales que se repiten con el tiempo, basados en datos de la actividad de alta resolución y desagregados a nivel sub-nacional. (48).

Con estas directrices se ha podido cuantificar los inventarios nacionales de emisión de GEI, en la actualidad, los países con mayores emisiones GEI son, en orden decreciente, China, Estados Unidos, la India, Rusia y Japón. En 2011, este conjunto de países concentraban el 45% de la población mundial y generaba el 56% del total de emisiones de CO₂. China y Estados Unidos juntos representaron el 45% de las emisiones mundiales en 2011. América Latina y el Caribe aportaron un 5% del total de las emisiones mundiales ese año. (9).

Como estrategia para enfrentar los desafíos de la interrelación del comercio internacional con iniciativas vinculadas con el cambio climático en las economías industrializadas, especialmente con la medición y etiquetado de HC, La CEPAL está desarrollando un proyecto “Huella de Carbón y exportaciones de alimento”, que propone fortalecer las capacidades de los gobiernos (Colombia, Ecuador, Nicaragua, República Dominicana, Argentina, Perú y Uruguay) y exportadores de alimentos, para mitigar estos desafíos. Por lo tanto los gobiernos, como parte de sus compromisos adquiridos en el Protocolo de Kioto, en calidad de países en desarrollo, deben informar cada cuatro años sobre sus emisiones y capturas de GEI (inventarios), así como sus iniciativas voluntarias de mitigación. En los inventarios debe informarse sobre lo que sucede en los distintos sectores y las principales fuentes de emisión de cada país.

El protocolo de Kioto considero seis gases de efecto invernadero, los cuales tienen un potencial de calentamiento global (GWP), diferencial en el tiempo, con respecto al CO₂, los cuales tres son gases industriales, ver tabla 4. (49).

Tabla 4. Principales fuentes de emisión de GEI, con sus respectivos potenciales de calentamiento Global

Nombre	Fórmula Química	Fuente de Emisión	Potencial de calentamiento global por años	
			20	100
Dióxido de Carbono	CO ₂	Combustibles fósiles (CF), deforestación, cementos	1	1
Metano	CH ₄	Rellenos sanitario, fermentación entérica, arroz, CF	72	25
Óxido Nitroso	N ₂ O	CF, fertilización, fibras sintéticas, estiércol	289	289
Hidrofluorocarbonos	HFC	Gases refrigerantes, fundición de aluminio, producción de semiconductores	12.000	14.800
Perfluorocarbonos	PFC	Producción de aluminio, y de semiconductores	6.500 – 9200	
Hexafluoro de azufre	SF ₆	Transmisión y distribución de electricidad.	22.800	

Fuente: Elaboración a partir de Fromann (2014) y González (2011)

El cambio climático tienen diferentes impactos en el sector agrícola y ambiental, generados principalmente por los cambios extremos en la precipitación y la temperatura, que repercuten entre otras en la disponibilidad de agua y el confort humano y animal (50). En América latina ya está sufriendo los efectos directos del calentamiento global, con sequía, deshielo, inundaciones y fenómenos climáticos extremos, todos esto

fenómenos afectan de una manera directa la agricultura, la seguridad alimentaria, el abastecimiento de agua, La salud pública, La calidad de vida de los ecosistemas. (6).

Otros efectos directos del cambio climático que han influenciado en todo el territorio colombiano es el fenómeno del niño y la niña, en las zonas cafetera del país se han registrado hasta en un 20% en la reducción de la precipitación anual durante los años que ocurre el fenómeno del niño y un incremento en las precipitaciones durante el fenómeno de la niña (11).

Estudios recientes realizados por el programa de investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ciat), analizó la situación del café, especialmente de la variedad arábica, con base en la situación del cambio climático al año 2050, el cual fue proyectando por 21 modelos de circulación global, los cuales concluyeron que cerca del 57% del área cafetera del país podría verse afectada por el cambio climático. Para la zona andina (Perú, Colombia y Ecuador), el café tiende a subir su rango de cota natural entre unos 400 a 500 msnm, las elevaciones adecuadas para el café arábica se prevé que van a pasar de 500-1500 msnm a 1000-2800 msnm. la precipitación aumentaría 100-170 mm, el número de meses secos aumentaría de 1 a 2 meses (51).

Con todo este escenario generado por el cambio climático en la zonas cafeteras, se requiere promover y desarrollar e integrar los Sistemas de Gestión Social y Ambiental , que conduzca a una producción más sostenible orientados a la mitigación de los efectos y causas del cambio climático, generados por las diversas prácticas agrícolas, que integren las características propias del suelo, la producción del café, la calidad de la taza y su requerimiento nutricional, para mitigar e impactar de una manera positiva la producción de café (52).

Por estas razones cada día más los países productores desarrollan diversas estrategia para posesionar sus diferentes atributos de sus cafés en el mercado mundial, es como encontramos a Perú como el mayor de productor mundial de café orgánico en el mundo (53). Costa Rica, demostró ser amigable con el medio ambiente al fijar netamente entre 2,4 y 13 kg CO₂e/kg de café verde, donde se encontró que la actividad más impactante fue la fertilización nitrogenada (63-82%) del total de la emisión (38).

En Colombia también se han desarrollado otros estudios en la producción en el balance de GEI en la agroindustria de la palma de aceite, donde las principal emisión fue producto del cambio del uso del suelos con un 40.9% de las emisiones (54).

Otra herramienta para cuantificar las emisiones de GEI es las Huellas de Carbono (HdC), los métodos para calcular las emisiones de carbono han sido relativamente rápido y se han ido adaptando a las diversas políticas gubernamentales y las agendas corporativas. La huella ecológica es un nuevo indicador para reflejar los impactos actuales de la sociedad en los recursos naturales y medio ambiente, que comienza a perfilarse como un gran mecanismo de protección para la competitividad de las producciones nacionales y un medio simple a la entrega de información a los consumidores, pues ya está

produciendo cambios diferenciales en los precios de los productos etiquetados con su respectiva HdC el cual puede representar un ingreso extra (bonos) o un egreso en los costos por emitir carbono,(47).

2. Metodología

La estimación del balance de emisión y fijación de GEI en la producción de café cereza se realizó en cinco regiones del departamento de Antioquia con potencial de producción de cafés especiales, con base en las directrices del IPCC 2006 con un nivel 1.

A partir de las estimaciones obtenidas en campo se construyó dos modelos alométricos para determinar la fijación de GEI por acumulación de biomasa del cafeto. Se adaptó las diferentes ecuaciones del IPCC 2006 para integrar la ecuación general de emisión de GEI, y a partir de esta y de los modelo alométrico, se desarrolló la ecuación de balance de emisión y fijación de GEI para el cafeto.

2.1 Localización

Las estimaciones del balance de emisión y fijación de GEI, se desarrolló en 30 fincas cafeteras representativas de las diferentes regiones del departamento de Antioquia, localizadas en los municipios de Ciudad Bolívar, Giraldo, El Retiro-La Ceja y Urrao, las cuales se han destacado en los concursos de taza café de Antioquia, por tener tazas superiores a 80 puntos en la escala SCAA, lo que convierten en núcleos con potencial de producción de cafés especiales, (Tabla 5).

2.2 Unidad experimental

Se determinó dos unidades experimentales:

- La unidad experimental para la determinación de emisión de GEI fue la finca cafetera con potencial de producción de cafés especial.
- La unidad experimental para la estimación de la fijación de GEI fue el lote más pertinente frente a la edad y densidad ponderada de la finca. En dicho lote se estimó en 20 sitios de siembra la biomasa actual del cafeto correspondiente a febrero/2015, (T2), y a partir de este se estimó la biomasa correspondiente al mes de agosto de 2014 (T1).

–

2.3 Variables medidas

Se evaluó dos variables debido a que las unidades de emisión y fijación de CO₂e en el proceso de producción pueden variar de acuerdo a la dinámica del clima, el manejo agronómico del cultivo y las exigencias del mercado, así:

- Variable 1: Balance de la emisión y fijación GEI en kg de CO₂e por kg café cereza producido periodo (cosecha principal).
- Variable 2: Balance de la emisión y fijación GEI en kg de CO₂e por ha-mes.

Tabla 5. Localización de la finca cafetera con potencial de producción de cafés especiales por núcleo.

Núcleo	Vereda	Finca	Altitud (m)	Coordenadas	
				N	W
La Ceja-El Retiro	El Higuero	El Danubio	1818	5° 56' 50.0"	75° 29' 4.4"
	La Miel	La Argentina	1987	5° 57' 22.9"	75° 30' 59.6"
		La Marsella	1912	5° 57' 30.8"	75° 30' 12.2"
	Nazareth	El Mirador	1965	5° 58' 35.6"	75° 30' 46.3"
		Buenos Aires	1990	5° 58' 26.6"	75° 30' 53.8"
Ciudad Bolívar	La Hondura	Santa Ana	1850	5° 52' 21.9"	75° 56' 36.8"
	La Lindaja	Aguas Frías	1905	5° 54' 25.0"	75° 57' 10.7"
		Los Naranjos	1875	5° 53' 56.7"	75° 57' 28.1"
	Punta Brava	El Privilegio	1558	5° 52' 18.4"	75° 58' 1.2"
	Remolino Arriba	Aguas Claras	1761	5° 53' 10.9"	75° 58' 13.3"
		Vuelta Bonita	2021	5° 53' 48.2"	75° 58' 12.8"
	Samaria	La María	1719	5° 54' 5.3"	76° 0' 0.9"
		La Palomera	1870	5° 54' 12.1"	75° 59' 57.3"
		El Porvenir	1836	5° 54' 9.5"	75° 59' 36.9"
	La Gulunga	La Carolina	1901	5° 54' 57.6"	75° 57' 45.6"
Urrao	Aguacates	La Mata de Guadua	2051	6° 8' 47.9"	76° 3' 32.4"
		El Tigre	2130	6° 9' 35.1"	76° 3' 27.4"
	Arenales	El Cadillal	1931	6° 10' 29.1"	76° 4' 41.2"
	Pabón- Sector Hoyo Rico	Las Flores	1934	6° 14' 0.8"	76° 8' 46.8"
	San Carlos	Bella Vista	2054	6° 9' 31.9"	76° 5' 26.3"
		La Falda	1884	6° 11' 32.5"	76° 5' 57.3"
		El Placer	2052	6° 8' 47.7"	76° 5' 23.7"
	Santa Catalina	El Rosal	2008	6° 10' 18.8"	76° 9' 47.9"
		La Esperanza - La Gulunga	2010	6° 10' 56.8"	76° 10' 0.3"
		La Esperanza - La Lorena	1930	6° 11' 10.2"	76° 8' 47.3"
Giraldo	Cuajarón	La Zunga	2045	6° 37' 55.9"	75° 57' 30.2"
		La zunga 2	2042	6° 37' 51.1"	75° 57' 25.2"
	La Sierra	Montero	1933	6° 38' 46.4"	75° 56' 10.7"
		Durazno	2069	6° 38' 40.6"	75° 56' 20.2"
	La Sierrita	La Falda del Centro	1996	6° 37' 37.5"	75° 56' 19.8"

2.4 Estimación de la emisión de N₂O y CO₂e derivado de la aplicación de fertilizantes Nitrogenados, Cales, materia orgánica y mineralización del Nitrógeno.

Para estimar la emisión de CO₂e en los procesos de producción de café cereza, se realizaron entrevistas y cuestionarios a los productores y técnicos de cada finca, donde se cuantificó el volumen de aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados, enmiendas, materia orgánica y la producción de café cereza concerniente al periodo de la cosecha cafetera (agosto de 2014 a febrero de 2015). Para determinar la emisión de N₂O se estimaron a partir de las sumatoria de dos aportes principales.

- Aportes por fertilización sintética nitrogenada.
- Aporte conjunto de la mineralización del N relacionado con la pérdida de C de la materia orgánica del suelo, incorporación de materia orgánica y el aporte de N por residuos agrícola (hojarasca de café).

Para esta estimación se empleó la ecuación emisiones totales de N₂O de suelos gestionados (Nivel 1) del IPCC 2006 (55). Así:

$$N_{2O-N} = N_{2O-N \text{ aportes}}$$

Donde:

N₂O-N= emisiones directas anuales de N₂O-N producidas a partir de suelos gestionados, kg N₂O-N año⁻¹. /periodo

N₂O-N aportes = emisiones anuales de N₂O-N producidas por aportes de N al suelos gestionados, kg N₂O-N año⁻¹/periodo.

Dónde:

$$N_{2O-N \text{ aportes}} = [(FSN + FON + FCR + FSOM + CO_2 - C \text{ Emisión}) * EF1] * GWP$$

Dónde:

FSN = cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año⁻¹/periodo

FON = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos por periodo.

FCR = cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), kg N año⁻¹/periodo.

FSOM = cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N año⁻¹/período.

CO₂-C Emisión = emisiones anuales de C por aplicación de cales, kg C periodo.

EF1 = factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N, kg N₂O-N (kg aporte de N)⁻¹/período.

GWP = Potencial de calentamiento global por efecto invernadero, N₂O con respecto a CO₂.

2.4.1 Estimación de la emisión N₂O y CO₂e por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados a los suelos, (FSN).

Para la estimación de la emisión por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados se determinó a partir de la ecuación FSN del IPCC 2006 Nivel 1 (55). Donde se estableció el aporte total de fertilización de fuentes nitrogenada en el periodo de agosto de 2014 a febrero de 2015, (Anexo A), y a través de este se obtuvo el volumen de nitrógeno aplicado en el periodo (Kg de N). Así:

$$FSN = (Kg\ N\ aplicado\ periodo) * EF1 * M_{N2O}/M_{N2} * GWP$$

Dónde:

FSN= Kg CO₂e (por aporte de N)⁻¹

EF1= 0,01

MN₂O/MN₂= 44/28 es la relación de masas de las moléculas de N₂O y N₂

GWP N₂O = 298.

2.4.2 Estimación de la emisión N₂O y CO₂e, relacionada con la pérdida de C de la materia orgánica del suelo, incorporación de materia orgánica y la descomposición de la hojarasca. (FSOM, conjunto con FON y FCR)

Para estimar las emisiones CO₂e conjunta por pérdida de C de la materia orgánica, incorporación de materia orgánica y descomposición de la hojarasca, se estableció a partir de la metodología del IPCC 2006 nivel 1 para, FON-FCR, y nivel 2 para FSON, (55), las cuales se integraron a partir de la estimación de la materia orgánica por el método de calcinación de Loss on Ignition, (56).

Para cada unidad experimental (finca cafetera), se delimitó un lote de 2.000 m², que fuera representativo y que estuviera en plena producción. En este lote se tomó 2 muestras compuesta de 10 submuestras tomadas en zig zag y se eliminó los primeros 3 cm de la superficie del suelo. Las muestra fueron tomadas a una profundidad de 20 cm, en dos tiempos diferentes (septiembre de 2014 y febrero de 2015), las cuales se

promedió su MOC para obtener un solo %MOc correspondiente a este periodo de cosecha, (Anexo B). De igual manera se tomó una muestra de suelo para determinar su densidad aparente a través del método del cilindro. El cálculo de %MOc se realizó por diferencia de peso en las distintas temperaturas, según la ecuación. Así:

$$\% \text{ MOc} = \frac{((\text{peso crisol} + \text{suelo a } 105^{\circ}\text{C}) - (\text{peso crisol} + \text{suelo a } 360^{\circ}\text{C}))}{(\text{Peso crisol} + \text{suelo a } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso del crisol})} * 100$$

Para la estimación del C se estableció el peso del suelo en función de la densidad aparente a una profundidad de 20 cm y el promedio del %MOc. El %C de suelos se cálculos con base a las directrices de IPCC 2006 (40), que corresponde al 35% de la MO. Se estimó una tasa de mineralización del C de 1.39 (57) reportada para cafés a libre exposición y se utilizó un factor de conversión de kg de C a kg de CO₂e de 44/12. (55).

2.4.3 Estimación de la emisión del CO₂e por aplicación de Cal (Caliza y Dolomítica)

La estimación de emisión de CO₂ por aplicación de cales se calculó a través de la ecuación emisiones anuales de CO₂ por aplicación de cal del IPCC 2006 nivel 1 (55).

$$\text{CO}_2\text{-C emisión} = ((M \text{ caliza} * EF \text{ caliza}) + (M \text{ dolomitica} * EF \text{ dolomitica}))$$

Donde:

CO₂ –C Emisión = emisiones anuales de C por aplicación de cales, kg C periodo.

M=cantidad anual de piedra caliza (CaCO₃) o dolomita (CaMg (CO₃)₂), kg periodo.

EF = factor de emisión, kg de C (kg de piedra dolomita)⁻¹ = 0,13

EF = factor de emisión, kg de C (kg de piedra caliza)⁻¹. = 0,12

2.5 Estimación de la Fijación de CO₂e por acumulación de biomasa.

Para cuantificar la tasa de fijación de CO₂e a través de acumulación de la biomasa para el periodo de cosecha (T1 a T2), donde T1 (mes de Agosto 2014) y T2 (mes de febrero 2015), se cuantifico la edad y densidad de siembra de los diferentes lotes de la finca y a partir de estas se estimó la edad y densidad ponderada de la finca. Las mediciones se desarrollaron en 20 sitios al azar en el lote más pertinente a la edad y densidad ponderada de la finca, los sitios que tuvieron más de un eje se sumó su biomasa total.

Para cuantificar la biomasa en T2, se midió por sitio los diámetros inferiores en la base del tallo de cada eje (R). El diámetro superior (r) se midió en la zona de transición del

tallo leñoso al verde. La altura (h) comprendió la sección del tallo leñoso, desde la base hasta la zona de transición entre el tallo lignificado y tallo verde (Figura 5).



Figura 5 . Proceso de medición de la biomasa del café en T2.
(Fuente: Elaboración propia)

Para establecer la biomasa aérea en T1 (agosto de 2014), se proyectó desde el mismo sitio o árbol en que se evaluó la biomasa del T2, la altura se determinó a partir de restar a la altura T2 la altura total de crecimiento del árbol en esos siete meses. El crecimiento del cafeto se estimó a partir de una tasa de emisión de un entrenudo por mes (24). Por lo tanto se midió la diferencia de altura entre el primer entrenudo (superior) y el entrenudo siete (inferior). La medición de diámetro inferior (R) se midió a una distancia por encima del diámetro de la base correspondiente a la altura de crecimiento ($D-hc$), El diámetro superior (r) fue el mismo evaluado en T2, (Figura 6).



Figura 6 Proceso de medición de la biomasa del café en T1
(Fuente: Elaboración propia)

La fijación de CO₂e se estimó a partir de la ecuación cambios en la existencia de carbono del método de la diferencia de existencia del IPCC 2006, (25). Donde se estimó la tasa anual de acumulación o de crecimiento de Biomasa (raíz/tallo), con un nivel 2. Así:

$$\Delta CB = \frac{(C_{T2} - C_{T1})}{(T_2 - T_1)}$$

Dónde:

$$C_{\sum_{i=j}} = \sum_{i=j}^n (A_{i-j} * V_{i-j} * BCF_{SLJ} * (1 + R) * Cf_i)$$

ΔCB = Cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa (la suma de los términos de biomasa aérea y subterránea) en tierras que permanecen en la misma categoría, (kg C periodo).

C_{T2} = total de carbono en biomasa para cada subcategoría de tierras que permanecen en la misma categoría en el momento T2, (kg de C).

C_{T1} = total de carbono en biomasa para cada subcategoría de tierras que permanecen en las misma en el momento T1, (kg de C).

C= total de carbono en biomasa para el período T1 a T2.

A = superficie de tierra que permanece en la misma categoría de uso de la tierra (ha).

V= Volumen de las existencias venales en crecimiento, (cm³ ha⁻¹)

i = zona ecológica i (i = 1 a n)

j = dominio climático j (j = 1 a n)⁻¹

R = relación entre biomasa aérea y biomasa subterránea, kg d.m. de biomasa subterránea (kg d.m. de biomasa aérea). Donde R=0,27 kg de raíz dm/kg de dm. (25)

CF= fracción de carbono de materia seca, kg C (kg d.m.)⁻¹. Donde CF=0.5 kg de C/kg de dm. (58)

BCEFS =factor de conversión y expansión de biomasa para la expansión del volumen de existencias venales en crecimiento a biomasa aérea, toneladas de crecimiento de biomasa aérea (cm³ de volumen de existencias en crecimiento)⁻¹.

La cuantificación del CO₂ acumulado en cada fracción de biomasa se ha calculado a través de la relación existente entre el peso total de una molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de carbono (12).

Para determinar la estimación de la fijación CO₂e/kg café cereza a través la ecuación de cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa, se le modifico la superficie de tierra (A) por el total de árboles de la finca y el factor de conversión y expansión de la biomasa (BCEFS), se reemplazó por la proyección promedia de biomasa total en T1

Para determinar el volumen de las existencias venales de crecimiento se empleó la ecuación volumen de una sección (Vs). Así:

$$Vs = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 + r^2 + (R + r))$$

Dónde:

Vs= Volumen de la sección.

h= Altura de la sección.

R= Radio Mayor.

r= Radio menor.

2.6 Aproximación de una herramienta matemática para estimar el balance de la emisión y fijación de GEI para las zonas con potencial de producción de cafés especiales.

Para desarrollar una aproximación de una herramienta matemática que permita estimar la fijación de biomasa, se tendrá en cuenta los resultados de la estimación de la biomasa actual (B_a) y la ganancia mensual promedio de la biomasa de un cafeto (G_{mpbc}), obtenido en 600 árboles de café, medidas en 30 fincas cafeteras. Los datos se examinaron para normalidad, homogeneidad y análisis de la varianza (ANOVA). A partir de esto se desarrolló el modelo alométrico para B_a , en función del diámetro de la base del tallo y de la altura de este, empleándose una matriz de correlación del modelo aproximada al procedimiento NLIN.

Para la estimación G_{mpbc} , se ajustó a un modelo de regresión polinómica múltiple, para LN en función de la altitud, biomasa actual y la edad del cafeto con un nivel de confianza del 95,0%.

Para desarrollar la herramienta matemática para la estimación de las emisiones CO_2e se estableció con base en la consolidación de las ecuaciones del IPCC 2006 en función de tres tipos de emisión:

- Emisión por fertilización nitrogenada.
- Emisiones de C por aplicación de cales.
- Pérdida de C de la materia orgánica del suelo, por incorporación de materia orgánica y descomposición de la hojarasca

3. Resultados y discusión

La investigación se llevó a cabo en 30 fincas cafeteras, distribuidas en cuatro núcleos con potencial de producción de cafés especiales (Ciudad Bolívar, Giraldo, El Retiro-La Ceja y Urrao), en las cuales se encontraron las siguientes características promedias:

- Área neta de investigación 154 has de café, con un área neta promedio por finca de 5,1 ha.
- Altitud promedio de 1.934 msnm, con un rango de 1.558 a 2.058 msnm.
- Edad ponderada promedio del café de 48 meses.
- Densidad ponderada de siembra 4.960 árboles café/ha.
- Árboles totales de café: 743.520, de los cuales el 53% corresponde a la variedad Castillo, 27% a Caturra, 10% para Catimor y 10% a variedad Colombia.
- Promedio de producción de café cereza por árbol 1,22 kg
- Porcentaje de MOc promedio de 19,3%, con un rango entre 7,2% a 39,1% de MOc.

3.1 Estimación promedio por núcleo de la emisión y fijación de GEI en kg de CO₂e/ por kg café cereza

3.1.1 Emisión promedio de GEI por pérdida de C de la materia orgánica del suelo, descomposición de la hojarasca y aporte de MO (Kg CO₂e/kg de café cereza producido), por núcleo

En la tabla 6, se presenta los valores promedios de emisión de GEI de los núcleos. La emisión por pérdida del C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de materia orgánica en kg de CO₂e por kg de café cereza, tiene una participación del 84,3 % de las emisiones totales, (Anexo C), se halló un rango de emisión de 0,38 a 1,180, con una emisión promedio de 0,674 kg de CO₂e/kg de café cereza. Segura et al (2012), reporto un hallazgo de una finca atípica de 43.3 kg CO₂e por kg de café verde, debido principalmente a los altos aportes de materia orgánica, los cuales fueron de 102 ton/há-año.

El núcleo de Urrao presenta diferencias estadísticas, ya que duplica el promedio de emisión de CO₂e por pérdida de C, emite 1.108 Kg CO₂e/kg de cc, frente a los demás núcleos, esto debido principalmente a que este núcleo tiene el mayor contenido promedio de %MOc con un 29.5%, frente 17,1% del núcleo Ciudad Bolívar, el 15% de La Ceja-El Retiro, y el 9,5% del núcleo de Giraldo. De igual manera registra los promedios más bajos en la producción promedio de café cereza por árbol y de densidad de siembra, con 0,82 kg/cc y 4,080 árboles-ha respectivamente.

Debido a los altos contenidos de materia orgánica de estos suelos, no se registró por parte de los productores aportes de este al suelo en ninguna finca.

Tabla 6 Promedios de emisión de GEI por pérdida de C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de MO en Kg de CO₂e por kg cc producido por núcleo.

Promedio de emisión por pérdida de C	
Núcleo	kg CO ₂ e/kg café cereza
Urrao	1,108 a
Ciudad Bolívar	0,4906 b
La Ceja-El Retiro	0,4718 b
Giraldo	0,3781 b

Las medias con una letra común no difieren significativamente en las emisiones por pérdida de C de la MOs, descomposición de las hojarasca y aporte de MO (prueba DMS al 5%).

3.1.2 Emisión promedio de GEI por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados (kg de CO₂e/kg café cereza).

En la tabla 7 se presentan las emisión promedio GEI por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados en kg de CO₂e/kg cc por núcleo. Donde el núcleo de Urrao presenta diferencia estadística, que lo ubica como el núcleo que más emite con 0,215 kg de CO₂e/kg café cereza, seguido del núcleo La Ceja-El Retiro y Giraldo.

Ciudad Bolívar y Giraldo son los núcleo que menos emiten GEI con kg 0,055 y 0,083 kg de CO₂e/kg cc respectivamente, influenciado especialmente por que dicho núcleo presenta la mayor producción promedio de kg cereza por árbol de 1,6 y 1,2 respectivamente.

La emisión promedio por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados fue de 0,125 kg de CO₂e/kg cc, lo que equivale a una participación del 15,7 % de las emisiones totales. No se reportó emisiones por aplicación de cales ya que las fuentes empleadas fueron CaO,. Segura et al (2012), reporto una participación en las emisiones por aplicaciones de fertilizantes nitrogenado que oscilo entre 0,21 y 0,73 kg de CO₂e/kg café verde, para una participación del 68 al 82% de las emisiones. Este factor aunque muy similar difiere en el porcentaje de participación, debido a que no se tuvo en cuenta las pérdidas de C de la MO del suelo y la descomposición de la hojarasca.

Tabla 7 Emisión promedio GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados en kg de CO₂e/kg cc.

Promedio de emisión por aplicación fertilizantes sintéticos	
Núcleo	kg CO ₂ e/kg café cereza
Urrao	0,215 a
La Ceja-El Retiro	0,1278 b
Giraldo	0,08333 bc
Ciudad Bolívar	0,05552 c

Las medias con una letra común no difieren significativamente en las emisiones por aplicación de fertilizantes nitrogenados (prueba DMS al 5%).

3.1.3 Fijación promedio de GEI por acumulación de biomasa en kg de CO₂e/kg café cereza, por núcleo

En la tabla 8 se presentan la fijación en kg de CO₂e/ kg de café cereza producido en el periodo, se encontró que no hubo diferencias significativas. Sin embargo los núcleos de Urrao y Giraldo fueron los núcleos que más fijaron. La fijación oscilo entre 0,682 a 1,459 para un promedio de 1,068 kg de CO₂e/kg cc, el cual es menor a lo reportado por Segura et al (2012), de 13.1 kg de CO₂e/kg café verde, lo que representa una equivalencia aproximada de 2,6 kg de CO₂e/kg cc.

Teniendo en cuenta que la fijación de biomasa está en función de la tasa de crecimiento y el diámetro inferior del tallo, se obtuvo en la investigación una tasa de crecimiento de 3.3 cm/mes, muy acorde con lo registrado por Ramírez (2014), que reportó un promedio de 4 cm/mes para la variedad castillo. De igual manera se obtuvo un diámetro promedio del tallo inferior de 4.9 cm, muy acorde con lo reportado por Farfán (2014) de 4.3 a 5.1 cm. (Anexo D).

Tabla 8 Fijación promedio de GEI por núcleos con potencial de producción de café especial en kg CO₂e por kg de café cereza producido.

Medias de la Fijación GEI por acumulación de Biomasa	
Núcleo	kg CO ₂ e/kg café cereza
Urrao	1,459 a
Giraldo	1,037 a
Ciudad Bolívar	0,835 a
La Ceja-El Retiro	0,682 a

Las medias con una letra común no difieren significativamente en la fijación de GEI (prueba DMS al 5%).

3.2 Estimación promedia por núcleo de la emisión y fijación de GEI en kg de CO₂e/ por ha-mes

3.2.1 Emisión de GEI promedia por núcleo, por pérdida de C de la materia orgánica del suelo, descomposición de la hojarasca y aporte de MO (kg CO₂e /ha-mes)

En la tabla 9 se presenta la emisión de GEI por pérdida de C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de materia orgánica por ha-mes, donde no se encontró diferencias mínimas significativas. Esta emisión tuvo un peso de 83.3% de las emisiones totales, y osciló entre un rango de 330 a 432, para un promedio mensual de 404 kg de CO₂e ha-mes, lo que representa un rango anual de 3.960 a 5.180 kg CO₂ ha.

Teniendo en cuenta que la investigación obtuvo en promedio en la densidad aparente del suelo de 0,833 g/cc y 19,3% MOc a 20 cm de profundidad y estimando el 35% MOc corresponde al carbono orgánico del suelo, se estimó en promedio , un almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de 112.53 Mg ha-año, resultado superiores a los estudios realizados por Mena et al (2011) en Costa Rica, (26) sobre la biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café en bosques secundarios en diferentes gradiente altitudinales, donde reporto un promedio de almacenamiento de carbono en el suelo de 102 Mg ha-año a una profundidad de 30 cm.

Tabla 9 Promedios de emisión de GEI por núcleos con potencial de producción de cafés especiales por pérdida de C de la MOs, descomposición de la hojarasca y aporte de materia orgánica por ha-mes.

Promedio de emisión GEI por pérdida del C de la MO y la descomposición de la hojarasca y aporte de MO	
Núcleo	Kg CO ₂ e/ha-mes
Urrao	432,3 a
Ciudad Bolívar	428,3 a
La Ceja-El Retiro	376 a
Giraldo	329,6 a

Las medias con una letra común no difieren significativamente en las emisiones por perdida de C de la MOs, descomposición de las hojarascas y aporte de MO. (Prueba DMS al 5%).

3.2.2 Emisión de GEI promedio por núcleo, por aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados Kg de CO₂e/ha-mes

En la tabla 10 se presentan las emisiones promedias GEI por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados. No se encontró diferencias mínimas significativas entre los núcleos. Esta emisión tiene un peso del 16.7%, del total de emisión, y oscilo entre 69 a 99.4 kg de CO₂e/ha-mes, con un promedio general de 81 kg, lo que equivale a una emisión promedio anual de 975 kg de CO₂e por ha.

Tabla 10 Emisión promedio GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales por aplicaciones de fertilizantes sintéticos nitrogenados en kg de CO₂e/ha-mes.

Medias de emisión de GEI por fertilización sintética	
Núcleo	Kg CO ₂ e/ha-mes
La Ceja-El Retiro	99,38 a
Giraldo	83,47 a
Urrao	83,39 a
Ciudad Bolívar	69,09 a

Las medias con una letra común no difieren significativamente en las emisiones por aplicación de fertilizantes nitrogenados. (prueba DMS al 5%).

3.2.3 Fijación Promedia de GEI por núcleo, por acumulación de biomasa en kg de CO₂e/ha-mes

En la tabla 11 se presenta la fijación promedio por acumulación de biomasa de GEI por núcleo. No se encontró diferencias mínimas significativas, el promedio de fijación mensual fue de 745 kg CO₂e por ha-mes, el rango osciló entre 557 a 970 kg CO₂e por ha-mes, lo que equivale en fijar en promedio anual 8.941 kg de CO₂e por hectárea, muy acorde con 8.100 kg de CO₂e/ha/año de fijación promedio registrada para café en Costa Rica reportado por Segura (2012).

Comparando estos resultados con los estudios realizados por Andrade (2014), sobre la fijación de Carbono, en sistemas de producción de café en monocultivo, en el Libano Tolima, donde encontró un almacenamiento de la biomasa aérea de C de 2.2 Mg ha⁻¹ en un periodo de 3.5 años (59), lo que equivale a una fijación de 8.066 Kg CO₂e, para un promedio anual de 2.666 kg CO₂e por ha, muy por debajo de los 8.940 kg de CO₂e por hectárea año encontrados en esta investigación, debido principalmente que este estudio se realizó en un solo periodo (7 meses), cuyo arboles promediaban una edad ponderada de 48 meses, al cual se le tuvo en cuenta la biomasa subterránea, equivalente al 27% de biomasa aérea.

Tabla 11. Fijación promedio de GEI por núcleos con potencial de producción de café especial en kg CO₂e por ha-mes.

Medias de Fijación GEI por acumulación de Biomasa	
Núcleo	Kg CO ₂ e/ha-mes
Giraldo	969,9 a
Ciudad Bolívar	901,4 a
La Ceja-EI Retiro	584,2 a
Urrao	557 a

Las medias con una letra común no difieren significativamente en la fijación de GEI (prueba DMS al 5%).

3.3 Balance promedio de emisión y fijación de GEI por núcleo con potencial de producción de cafés especiales.

3.3.1 Balance de emisión y fijación de GEI en kg CO₂e por kg Café cereza por núcleos.

En la Tabla 12 se presenta el balance entre la fijación y emisión promedio de GEI por núcleo. Donde no se encontró diferencias mínimas significativas.

En términos generales la producción de cafés cereza en zonas de potencial de producción cafés especiales tiene un balance positivo, está fijando entre 0,083 a 0,575, para un promedio de 0,27 kg CO₂e por kg café cereza (figura 7 y Anexo E). Lo que nos indica que el proceso de producción de café cereza en estos núcleos es sostenible y responsable con el medio ambiente referente al almacenamiento de GEI, para el periodo de estudio.

Tabla 12 Balance de emisión y fijación GEI por kilogramo de café cereza

Medias del balance de emisión y fijación de GEI	
Núcleo	Kg CO ₂ e/Kg café cereza
Giraldo	0,5751 a
Ciudad Bolívar	0,2894 a
Urrao	0,1362 a
La Ceja-EI Retiro	0,0832 a

Las medias con una letra común no difieren significativamente del balance de emisión y fijación y de GEI (prueba DMS al 5%)..

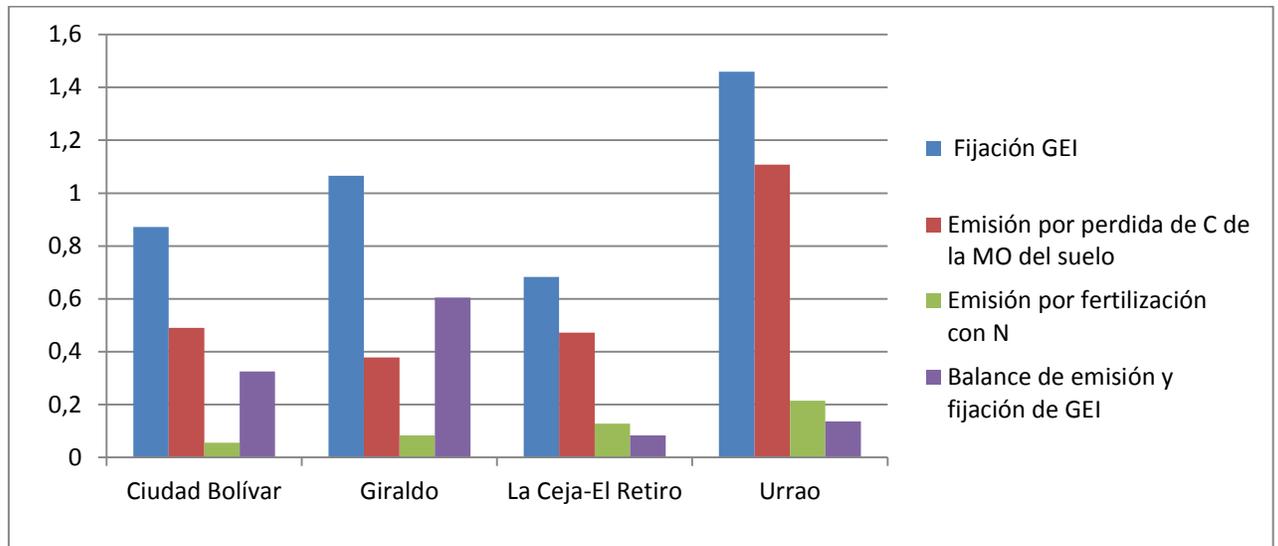


Figura 7 Balance promedio de emisión y fijación de CO₂e por kg de café cereza por núcleo.

3.3.2 Balance de emisión y fijación de GEI en kg CO₂e por hectárea mes.

La tabla 13 presenta el balance entre la fijación y la emisión promedio de GEI por núcleo. Se encontró diferencias mínimas significativas, siendo el núcleo de Urrao el que menos fijó debido principalmente a su mayor emisión por pérdida de C de la MO del suelo. Giraldo, Ciudad Bolívar, La Ceja-El Retiro son los núcleos que más fijaron, pero sin diferencias mínimas significativas entre ellos.

Todos los núcleos presentaron un balance favorable a la fijación de CO₂e ha-mes con un promedio de 259 kg CO₂e/ha-mes y un rango que osciló entre 41,3 a 557, lo que equivale a un promedio general anual de 3.112 kg CO₂e por ha. (Figura 8, Anexo F).

Tabla 13. Balance de emisión y fijación de GEI por núcleo ha-mes

Medias del balance de emisión y fijación de GEI	
Núcleo	Kg CO ₂ e/ha-mes
Giraldo	556,9 a
Ciudad Bolívar	404 a
La Ceja-El Retiro	108,8 ab
Urrao	41,26 b

Las medias con una letra común no difieren significativamente del balance de emisión y fijación y de GEI (prueba DMS al 5%).

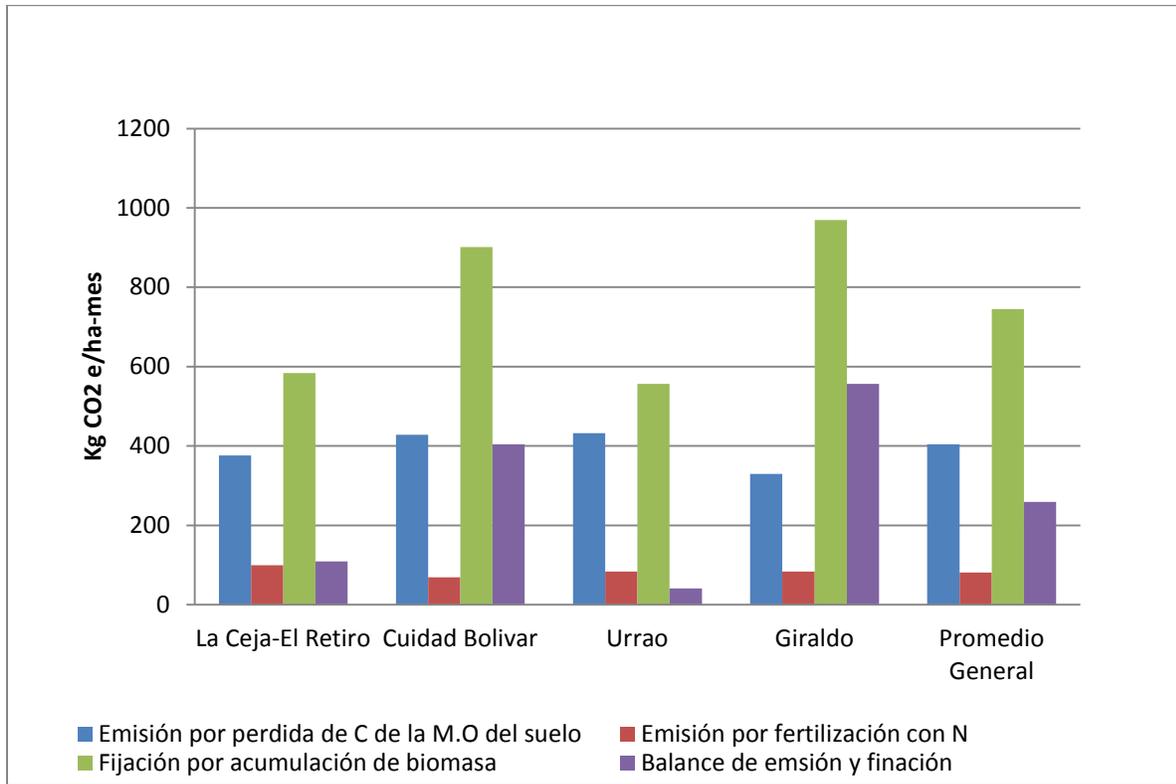


Figura 8 Balance promedio de emisión y fijación de CO₂e/ha-mes por núcleo.

3.4 Desarrollo de la herramienta matemática para estimar el balance de emisión y fijación de gases de efecto de invernadero (GEI) en la producción de cafés especiales

La herramienta matemática para estimar el balance de emisión y fijación de GEI en la producción de café, está compuesta por:

- Estimación de fijación GEI, que comprende los modelos alométricos para estimar la fijación de biomasa actual (Ba) y la ganancia promedio mensual de biomasa del cafeto (Gmpbc).
- Estimación de la emisión de GEI, compuesta por la adaptación de las ecuaciones del IPCC 2006 en función de las pérdidas de C de la materia orgánica del suelo, por incorporación de materia orgánica, descomposición de la hojarasca, aportes de fertilizantes sintéticos y aplicaciones de cal.

3.4.1 Modelos alométricos para estimar la fijación de la biomasa actual del cafeto (Ba).

A partir y con los resultados obtenidos en campo y del modelo de Segura (31), se estableció que el mejor modelos que más se ajusta para determinar la biomasa actual (Ba), fue la ecuación 1 (tabla 16), ajustado por el procedimiento NLIN de SAS, el cual presento un $P < 0,0001$, y un R^2 de 0,97, que indica un elevados ajustes de sus componentes, altura del tallo leñoso y el diámetro en la base del tallo, ver tabla 14.

El modelo muestra un ajuste en los diferentes arreglos y condiciones del cultivo, al que se puede someter a las diferentes regiones o núcleos con potencial de producción de cafés especiales, el cual mejora el R^2 0,94 del modelo de segura (Figura 9).

Tabla 14 Análisis de varianza y matriz de correlación del modelo Ba aproximada al procedimiento NLIN

Fuente	Sumatoria de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Valor-P
Modelo	1027,2	3	342,4	<0,0001
Residuo	8,7922	592	0,0149	
Total Corregido	1036,0	545		

Parámetro	Estimación	Error	Límite de confianza (95%)	
		Estándar		
A	-3,4387	0,0344	-3.5063	-3.3711
B	0,6744	0,00839	0,6579	0,6908
C	0,5085	0,00799	0,4928	0,5242
	Press	Sesgo	EMC	R^2
	8,96858	0,003984052	0,12187	0,97296

3.4.2 Modelos alométricos para estimar la ganancia mensual promedio de biomasa del cafeto (Gmpc)

El modelo para determinar la ganancia mensual promedio de la biomasa de un cafeto, se ajustó a un modelo de regresión polinómica múltiple, para LN en función de la altitud, biomasa actual y la edad del cafeto, (Ecuación 2, tabla 16).

Según el análisis de varianza y estimación del modelo de regresión polinomial múltiple, para Gmpbc en función de altitud, biomasa actual, y la edad del cafeto, existe una relación estadísticamente significativa en la estimación de la Gmpbc entre las variables,

con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R^2 nos indica que el modelo ajustado nos explica el 66,08% de la variabilidad en Gmpbc.(tabla 15).

Tabla 15 Análisis de varianza y estimación del modelo de regresión polinomial múltiple, para LN en función de altitud, biomasa actual, y la edad del cafeto.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	142,8	7	20,4001	162,85	0,0000
Residuo	73,2814	585	0,125267		
Total (Corr.)	216,082	592			

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	-17,4717	2,66334	-6,56008	0,0000
Altitud	0,011156	0,00262334	4,25261	0,0000
Biomasa actual	1,69378	0,346897	4,88265	0,0000
Edad	0,158811	0,0314628	5,04757	0,0000
Biomasa actual ²	-0,0874457	0,00913848	-9,56896	0,0000
Altitud ²	-0,00000214367	6,95078E-7	-3,08408	0,0021
Altitud*Edad	-0,0000814806	0,0000158717	-5,13371	0,0000
Biomasa actual*Altitud	-0,000382966	0,000182393	-2,09967	0,0362

Tabla 16 Modelos de estimación de biomasa actual y ganancia mensual promedia de biomasa del cafeto

Biomasa actual de Cafeto (kg)	
Ecuación 1	$Ba = 10^{(-3.4387 + 0.6744 * \log(Db) + 0.5085 * \log(ht))}$
Ganancia mensual promedia de biomasa del cafeto (kg/mes)	
Ecuación 2	$Gmpbc = 10^{(-17.4717 + 0.011156 * A + 1.69378 * Ba + 0.158811 * E - 0.0874457 * Ba^2 - 0.00000214367 * A^2 - 0.0000814806 * A * E - 0.000382966 * Ba * A)}$

– Donde el modelo Biomasa actual asume que:

Ba = Biomasa actual de un cafeto (Kg)

Db: Diámetro de la base

ht: Altura del tallo (leñoso)

- El modelo de Ganancia mensual promedio de la biomasa de un cafeto (Gmpbc), asume que:

Gmpbc = Ganancia mensual promedio de la biomasa de un cafeto (kg/mes)

A: Altura sobre el nivel del mar del lote

Ba = Biomasa actual

E: edad del lote (mes)

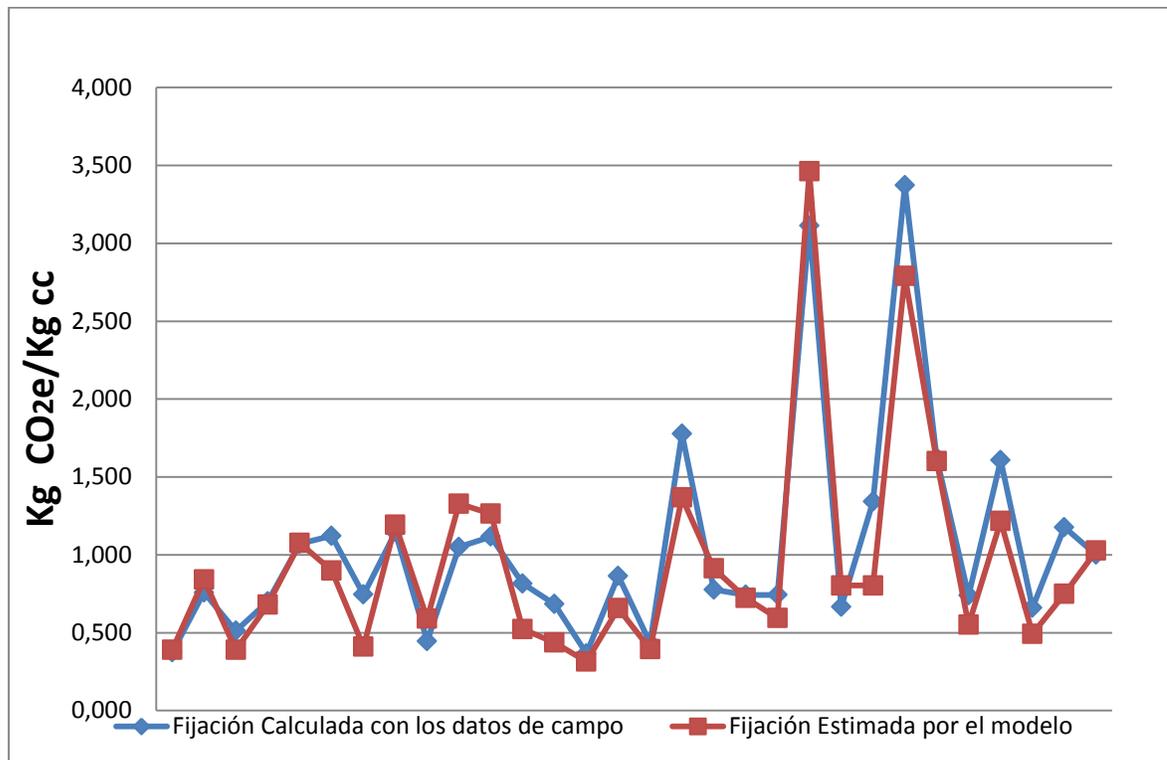


Figura 9 Comparación entre la estimación de la fijación de GEI con datos de campo y el modelo (Bay Gmpbc).

Los modelos Ba y Gmpbc conjuntos presentaron un buen comportamiento y ajuste en la estimación de la fijación de GEI por kg café cereza, en la figura 9 se puede observar cómo se ajusta la fijación de GEI por finca estimados a partir de los datos de campo y del modelo.

3.4.3 Adaptación de la ecuación del IPCC 2006 en función de las pérdidas de C de la materia orgánica del suelo, por incorporación de materia orgánica, descomposición de la hojarasca. (FSOM-ON,-CR).

A partir de la transformación, adaptaciones de las ecuaciones FSOM-ON-CR EFN del IPCC 2006, nivel 1 para ON-CR EFN y nivel 2 para FSOM, se integró a la herramienta matemática para estimar la emisión de GEI por fertilización sintética nitrogenada así:

Ecuación 3: Emisión de CO₂e por pérdida de C de MOs, descomposición de la hojarasca y aportes de materia orgánica.

$$F_{SON-ON-CR} = (\sigma_{as} * \%MOC * t * a) * 2.973 \text{ m}^3$$

Dónde:

F_{SON-ON-CR}= Emisión kg CO₂e por pérdida de C de MOs, descomposición de la hojarasca y aportes de materia orgánica. (kg/mes)

Da= Densidad aparente del suelo (kg/m³)

%MOC= Porcentaje de la materia orgánica calcinada a 20 cm.

t= Tiempo del periodo de recolección de la cosecha (meses).

a= Área neta de producción de café (ha)

La constante 2,973m³ corresponde al producto de las variables: (Vs, FC C-CO₂, FCMO-C, Tm)/12.

Dónde:

Vs: Volumen de suelo a 20 cm de altura = 2.000 m³

FC C-CO₂= Factor de conversión para convertir las emisiones de CO₂-C en CO₂. (44/12).

FCMO-C = Factor de conversión %MOs a %C del suelos (%35).

Tm= Tasa anual de mineralización de C (1,39).

Para determinar las emisiones de CO₂e por pérdida de C de MOs, descomposición de la hojarasca y aportes de materia orgánica. (kg/mes), se requiere inicialmente estimar el % MOC a 20 cm (%MOC) y de terminar la densidad aparente del suelo.

3.4.4 Adaptación de la ecuación del IPCC 2006 en función la emisión GEI por aportes de fertilizantes sintéticos nitrogenados al cultivo de café.

A partir de la transformación, adaptación de la ecuación EFN del IPCC 2006, nivel 1 se integró a la herramienta matemática para estimar la emisión de GEI, por fertilización sintética nitrogenada así:

Ecuación 4: Emisión de CO₂e por fertilización nitrogenada

$$EFN_{CO2ep} = [Kg N p] * 4.6828$$

Dónde:

EFN = Emisión por fertilización nitrogenada en el periodo (CO₂e/kg c.c)

kg N_p = kg de nitrógeno sintético aplicado al cultivo en el periodo evaluado. La Constante 4.682 comprende el producto de los factores de conversión de la ecuación de FSN, (EF1, M_{N2O}/M_{N2} , GWP).

Dónde:

$$EF1 = 0,01$$

$M_{N2O}/M_{N2} = 44/28$ es la relación de masas de las moléculas de N₂O y N₂

GWP N₂O = 298.

3.4.5 Adaptación e integración de la ecuación del IPCC 2006 en función la emisión de GEI por aplicaciones de cales.

A partir de la transformación, adaptación de la ecuación CO₂-C = emisiones anuales de C por aplicación de cales del IPCC 2006 nivel 1, se integró a la herramienta matemática para estimar la emisión GEI por aplicaciones de cales, así:

Ecuación 5: Emisión de CO₂e anual de C por aplicación de cales

$$CO2-C = ((M_{caliza} * 0,4392) + (M_{dolomitica} * 0,4758))$$

Dónde:

CO₂-C = emisiones anuales de C por aplicación de cales, (kg CO₂e periodo)

M = cantidad anual de piedra caliza (CaCO₃) o dolomita (CaMg(CO₃)₂), (kg periodo)

Las constantes 0,4392 para piedra caliza y 0,4758 para piedra dolomítica se determinaron por los productos de constantes EF y FC así:

Para piedra Caliza: $0,4392 = EF * FC$.

Dónde:

EF= factor de emisión, kg de C (kg de piedra Caliza)⁻¹ = 0,12.

FC=Factor de conversión para convertir las emisiones de CO₂-C en CO₂. (44/12).

Para piedra dolomítica: $0,4758 = EF * FC$.

Dónde:

EF= Factor de emisión, kg de C (kg de piedra dolomita)⁻¹ = 0,13.

FC= Factor de conversión para convertir las emisiones de CO₂-C en CO₂. (44/12).

3.5 Modelo matemática para estimar el balance de fijación y emisión de GEI en la producción de cafés especiales (kg de CO₂/kg café cereza)

El modelo matemático desarrollado para estimar el balance de emisión y fijación de GEI de café cereza (kg CO₂e/kg), posee dos variables para determinar la fijación, el modelos de estimación de biomasa actual (Ecuación 1) y el modelo ganancia mensual promedio de la biomasa del café (Gmpbc) (Ecuación 2).

Dónde:

$$BefGEIcc = \frac{((Fijación\ kg\ CO_2ep) - (Emisión\ kg\ CO_2ep))}{kg\ cc}$$

Dónde:

- BefGEIcc= Balance de emisión y fijación de gases de efecto invernadero de café cereza (kg CO₂e/kg café cereza).
- Fijación kg CO₂ep= fijación por ganancia de biomasa en un periodo dado (kg CO₂e por periodo).
- Emisión de kg CO₂ep=Emisión de GEI por kg CO₂e/kg café cereza.
- Kg cc= kilogramos de café cereza.

3.5.1 Modelo para la estimación de la Fijación kg CO₂ep

A través de los modelos biomasa actual (Ba) y Ganancia mensual promedio de biomasa del cafeto (Gmpbc), nos permitirá estimar la fijación de la biomasa en un T₂ y proyectar la a un T₁.

- El modelo Gmpbc combinado con el modelo Ba nos permitirá estimar el cambio de existencia de carbón con una sola lectura en un T₂ y proyectar la a un T₁. Este modelo es menos preciso que Ba, ya que Gmpbc presenta un estadístico R-Cuadrado que nos indica que el modelo ajustado nos explica el 66,08%, a pesar que existe una relación estadística mente significativa en la estimación de la Gmpbc entre las variables, edad, altitud, biomasa actual y edad del café, con un nivel de confianza del 95,0%.

$$FGEIC \text{ kg CO}_2\text{ep} = \frac{(Gmpbc * at * t)}{kgcc} * Cf * Fc$$

Donde:

FGEIC= Fijación de gases de efecto invernadero del café (kg CO₂/kg c.c)

Gmbc= Ganancia mensual promedio de la biomasa de un cafeto (kg/mes) (Ecuación 2)

at= Arboles totales de café de la finca.

t=. Tiempo o periodo de evaluación (meses)

Cf= fracción de carbono de materia seca, kg C (Kg d.m.)⁻¹. Donde CF=0.5 kg de C/kg de dm.

Fc= factor de conversión de kg de C a kg de CO₂e (44/12)

kgcc= Kg de café cereza (kg).

- El modelo Ba (Ecuación 1), nos permitirá establecer el cambio de existencia de carbono de una manera más precisa, siempre y cuando se realicen dos mediciones (T₁ y T₂) en un rango de tiempo (mes/año). Este modelo mejora el modelo de segura, ya que integra la biomasa subterránea, y mejora el R² de este modelo que pasa de 0,94 a 0,973.

$$FGEIC \text{ kg CO}_2\text{ep} = \frac{((BaT2 - BaT1) * at * t)}{kgccp} * Cf * Fc$$

Dónde:

BaT2 = Biomasa actual en un tiempo 2

BaT1 = Biomasa actual en un tiempo 1

3.5.2 Modelo para la estimación de las emisiones GEI en kg CO₂e/kg de café cereza cosechado en el periodo.

La consolidación y adaptación de estas ecuaciones para estimar la emisión de GEI que integren el modelo matemático no distorsiona los resultados originales obtenido con base a los datos de campo, en función de las ecuaciones originales del IPCC 2006 nivel 1.

$$\text{Emisión de kg CO}_2\text{ep} = \frac{(\text{EFN} + (\text{CO}_2 - \text{C}) + (\text{FSO} - \text{ON} - \text{CR}))}{\text{kgccp}}$$

Dónde:

Emisión de kg CO₂e/kg = Emisión de GEI por kg CO₂e/kg café cereza periodo.

EFN = Emisión por fertilización nitrogenada (CO₂e) (Ecuación 4)

CO₂ -C= Emisiones de C por aplicación de cales en periodo (kg) (ecuación 5)

FSO-ON-CR= Pérdida de C de la materia orgánica del suelo, por incorporación de materia orgánica y la descomposición de la hojarasca kg N año. (Ecuación 3)

kgccp= Café cereza cosechado en el periodo (Kg).

Al comparar los resultados obtenidos en la balance de emisión y fijación de GEI por kg café cereza producido en el periodo calculados en las 30 fincas cafeteras con potencial de producción de café especiales, con los resultados obtenidos a partir de la herramienta matemática se puede observar que la herramienta presenta un excelente comportamiento tanto para el balance negativo, como para el positivo en la emisión y fijación de GEI, como se observa en la figura 10.

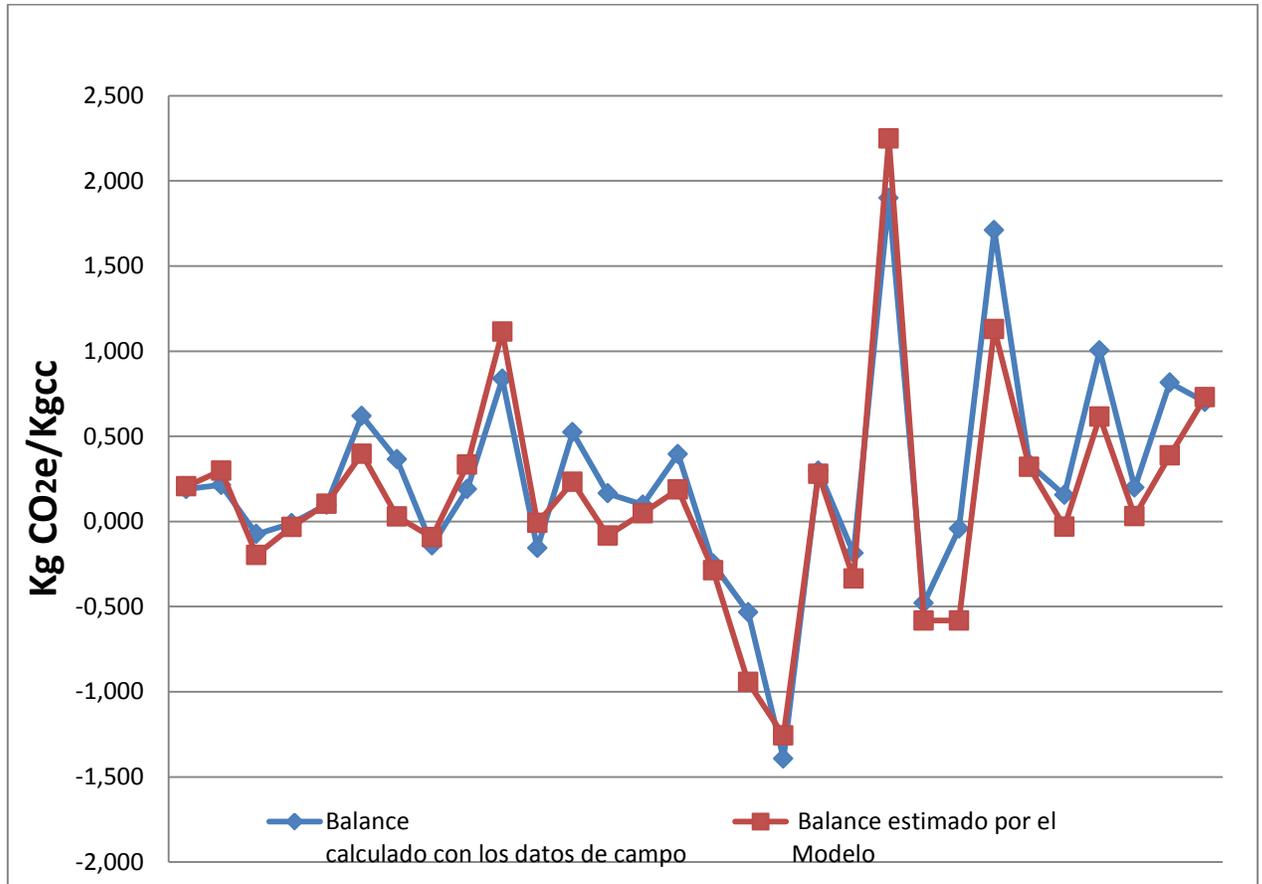


Figura 10 Comparación entre los balances de emisión y fijación de GEI por finca estimados a partir de los datos de campo y del modelo.

4. Conclusiones y recomendaciones

En la actualidad el sector cafetero colombiano no cuenta con herramientas propias o desconoce de una manera general su balance de emisión y fijación de GEI. Por tal motivo este trabajo es la primera aproximación que se realiza en Colombia, y será una herramienta para el sector cafetero para la implementación de multicertificaciones frente al cambio climático.

4.1 Conclusiones

- Los balances generales fueron positivos a la fijación donde se estimó en promedio un balance de 0,27 kg de CO₂e por kg de café cereza, el cual permitirá suplir de una manera parcial o totalmente las emisiones de GEI, al que se incurrirán en las labores de despulpado, lavado y secado del grano.
- El balance promedio de fijación en Kg de CO₂/ha-mes fue de 259, lo que corresponde a 3.112 Kg de CO₂/ha-año con un rango de 41,2 a 557 kg CO₂/ha-año. Se encontró diferencias mínimas significativas en el balance entre los núcleos, siendo el núcleo de Urao el que menor balance obtuvo con 41.26 Kg de CO₂/ha-año. Los núcleos de Ciudad Bolívar, Giraldo, La Ceja y El Retiro fueron los de mejor balance, los cuales se movieron en un rango de 108,8 a 556,9 Kg de CO₂/ha-año.
- La fijación neta en kg de CO₂e/ kg de café cereza producido en el periodo, se encontró que no hubo diferencias significativas entre núcleos. Esta osciló entre 0,682 a 1,459, para un promedio de 1,068 kg de CO₂e/kg cc, el cual es menor a lo reportado por Segura et al (2012), de 13.1 kg de CO₂e/kg café verde, lo que representa una equivalencia aproximada de 2,6 kg de CO₂e/kg café cereza. Las emisiones totales sumaron 0,799 kg de CO₂e/kg café cereza, de los cuales 0,674 CO₂e/kg café cereza correspondió a la pérdida de C del suelo, aporte de MO y la descomposición de hojarasca, y 0,125 CO₂e/kg café cereza a la fertilización sintética nitrogenada. Se cuantificó en promedio un balance neto positivo en la fijación de 0,27 kg de CO₂e por kg de café cereza, el cual permitirá suplir de una manera parcial o totalmente las emisiones de GEI, al que se incurrirán en las labores de despulpado, lavado y secado del grano.

- La fijación promedio total fue de 745 Kg de CO₂e/ha-mes, los que corresponde a 8.941 kg de CO₂/ha-año: La fijación se movió entre un rango de 557 a 970Kg de (6,6 - 11,6 t CO₂e/ha-mes). No se encontró diferencias mínimas significativas. Las emisiones promedias totales fue de 486 kg de CO₂/ha-año, de las cuales del 404 kg CO₂e/ha-mes correspondió a la perdida de C del suelo, aporte de MO y la descomposición de hojarasca, y 81 kg CO₂e/ha-mes CO₂e/kg a la fertilización sintética nitrogenada.
- La Labor agronómica que más impacto en la emisión de GEI, fue la perturbación de los suelos cafeteros por perdida de C del suelo, aporte de MO y la descomposición de hojarasca, con un 84,3%, de las emisiones, debido especialmente a que estos núcleos presentaron un alto %MOc (19,3% en promedio).
- El modelo Ba encontrado permitirá establecer el cambio de existencia de carbono de una manera más precisa,. Este modelo encontrado integra la biomasa subterránea, y presenta un R² de 0,973.
- El modelo Gmpbc combinado con el modelo Ba desarrollado, permitirá estimar el cambio de existencia de carbón. y permite analizar el comportamiento en función de variables como edad, altitud, biomasa actual y edad del caféto, con un nivel de confianza del 95,0%.

4.2 Recomendaciones:

- Se requiere estandarizar los procesos de lavado, fermentación y secado de café, para poder cuantificar las emisiones de CO₂e/kg café pergamino seco, pertinentes a la post-cosecha, ya que en cada finca varían permanentemente estos procesos en el año, influenciada principalmente por el volumen de café a procesar, el estado del clima, y el precio de interno del café.

5. Anexos

Anexo A: Consolidado de aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados y cales por finca y núcleo.

Núcleo	Vereda	Finca	Kg N sintético aplicado	Kg de Cales (CO ₃)
La Ceja-El Retiro	El Higuero	El Danubio	184	
La Ceja-El Retiro	La Miel	La Argentina	336	
La Ceja-El Retiro	La Miel	La Marsella	675	
La Ceja-El Retiro	Nazareth	El Mirador	228	
La Ceja-El Retiro	Nazareth	Buenos Aires	119	
Ciudad Bolívar	La Hondura	Santa Ana	1.054	
Ciudad Bolívar	La Lindaja	Aguas Frías	732	
Ciudad Bolívar	La Lindaja	Los Naranjos	192	
Ciudad Bolívar	Punta Brava	El Privilegio	191	
Ciudad Bolívar	Remolino Arriba	Aguas Claras	223	
Ciudad Bolívar	Remolino Arriba	Vuelta Bonita	2.550	
Ciudad Bolívar	Samaria	La María	293	
Ciudad Bolívar	Samaria	La Palomera	298	
Ciudad Bolívar	Samaria	El Porvenir	322	
Ciudad Bolívar	La Gulunga	La Carolina	1.163	
Urrao	Aguacates	La Mata de Guadua	261	
Urrao	Aguacates	El Tigre	272	
Urrao	Arenales	El Cadillal	167	
Urrao	Pabón- Sector Hoyo Rico	Las Flores	96	657
Urrao	San Carlos	Bella Vista	331	3.171
Urrao	San Carlos	La Falda	339	
Urrao	San Carlos	El Placer	2.210	
Urrao	Santa Catalina	El Rosal	122	
Urrao	Santa Catalina	La Esperanza - La Gulunga	96	
Urrao	Santa Catalina	La Esperanza - La Lorena	263	
Giraldo	Cuajarón	La Zunga	114	
Giraldo	Cuajarón	La zunga 2	120	3.600
Giraldo	La Sierra	Montero	316	
Giraldo	La Sierra	Durazno	172	
Giraldo	La Sierrita	La Falda del Centro	120	3.600

Anexo B: Consolidado densidad aparente del suelo y MOc por finca y núcleo.

Núcleo	Finca	Densidad aparente del suelo (gr/cc)	(% MOc del suelos por periodo (2014-2015))		Promedio MOc de periodo (%)
			Agosto	Febrero	
La Ceja-El Retiro	El Danubio	1,25	8,7	9,1	8,9
La Ceja-El Retiro	La Argentina	1,03	10,8	10,8	10,8
La Ceja-El Retiro	La Marsella	1,35	10,2	7,9	9,0
La Ceja-El Retiro	El Mirador	0,66	17,4	12,4	14,9
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	0,61	36,1	26,0	31,1
Ciudad Bolívar	Santa Ana	1,13	11,1	13,5	12,3
Ciudad Bolívar	Aguas Frías	1,07	11,0	9,2	10,1
Ciudad Bolívar	Los Naranjos	0,71	31,8	14,0	22,9
Ciudad Bolívar	El Privilegio	1,2	11,5	7,0	9,3
Ciudad Bolívar	Aguas Claras	0,65	13,9	10,3	12,1
Ciudad Bolívar	Vuelta Bonita	1,24	15,2	22,1	18,7
Ciudad Bolívar	La María	0,98	12,2	14,6	13,4
Ciudad Bolívar	La Palomera	0,91	23,0	18,6	20,8
Ciudad Bolívar	El Porvenir	0,98	15,7	7,5	11,6
Ciudad Bolívar	La Carolina	0,56	33,5	29,1	31,3
Urrao	La Mata de Guadua	0,42	27,3	24,3	25,8
Urrao	El Tigre	0,54	25,6	30,0	27,8
Urrao	El Cadillal	0,63	27,9	35,2	31,5
Urrao	Las Flores	0,45	26,7	30,0	28,3
Urrao	Bella Vista	0,35	35,8	37,7	36,7
Urrao	La Falda	0,61	22,4	23,3	22,9
Urrao	El Placer	0,51	30,9	28,5	29,7
Urrao	El Rosal	0,51	51,2	27,0	39,1
Urrao	La Esperanza - La Gulunga	0,53	19,9	28,0	23,9
Urrao	La Esperanza - La Lorena	0,43	27,8	29,8	28,8
Giraldo	La Zunga	1,26	11,6	7,6	9,6
Giraldo	La zunga 2	1,24	8,8	5,6	7,2
Giraldo	Montero	1,06	10,8	13,6	12,2
Giraldo	Durazno	1,24	10,3	8,9	9,6
Giraldo	La Falda del Centro	1,08	9,7	8,0	8,8

Anexo C: Porcentaje de participación por tipo de emisión y por peso sobre la fijación por finca y núcleo.

Núcleo/Municipio	Finca	(%) Participación por tipo de emisión		Peso en (%) de emisión sobre La fijación
		Por pérdida de C de la M.O del suelo	Por fertilización con N	
La Ceja-El Retiro	El Danubio	86,6	13,4	49,2
La Ceja-El Retiro	La Argentina	81,5	18,5	71,7
La Ceja-El Retiro	La Marsella	69,2	30,8	114,7
La Ceja-El Retiro	El Mirador	65,7	34,3	101,6
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	90,8	9,2	90,8
Ciudad Bolívar	Santa Ana	88,1	11,9	44,7
Ciudad Bolívar	Aguas Frías	90,2	9,8	51,1
Ciudad Bolívar	Los Naranjos	98,5	1,5	112,3
Ciudad Bolívar	El Privilegio	81,5	18,5	57,7
Ciudad Bolívar	Aguas Claras	79,7	20,3	20,3
Ciudad Bolívar	Vuelta Bonita	93,5	6,5	114,0
Ciudad Bolívar	La María	74,9	25,1	35,8
Ciudad Bolívar	La Palomera	90,1	9,9	76,0
Ciudad Bolívar	El Porvenir	71,6	28,4	73,1
Ciudad Bolívar	La Carolina	86,3	13,7	54,2
Urrao	La Mata de Guadua	80,2	19,8	157,2
Urrao	El Tigre	85,5	14,5	130,0
Urrao	El Cadillal	84,1	15,9	279,2
Urrao	Las Flores	82,5	17,5	59,9
Urrao	Bella Vista	82,4	17,6	125,2
Urrao	La Falda	87,7	12,3	39,0
Urrao	El Placer	82,8	17,2	172,2
Urrao	El Rosal	81,4	18,6	103,2
Urrao	La Esperanza/La Gulunga	85,5	14,5	49,3
Urrao	La Esperanza/La Lorena	80,7	19,3	79,1
Giraldo	La Zunga	79,1	20,9	78,9
Giraldo	La zunga 2	90,5	9,5	37,5
Giraldo	Montero	85,0	15,0	70,0
Giraldo	Durazno	68,3	31,7	30,8
Giraldo	La Falda del Centro	82,1	17,9	29,8
Promedio General		82,9	17,1	83,6

Anexo D: Tabla resumen por núcleo y finca en T1 y T2 en: Altura del tallo, diámetros del tallo s superiores e inferiores, acumulación y ganancia de biomasa, edad y variedad del café.

Núcleo	Finca	Altura T1 (cm)	Altura T2 (cm)	Crecimiento (cm) periodo	Tasa de Crecimiento mensual (cm)	Biomasa Total (Kg) T1	Biomasa Total (Kg) T2	Ganancia Biomasa (Kg) periodo	Ganancia Biomasa (Kg/mes)	Diámetro T1 (cm)	Diámetro T2 (cm)	Diámetro superior (Cm)	Variedad	Edad en meses
La Ceja-El Retiro	El Danubio	134,8	154,2	19,4	2,8	1,1	1,6	0,6	0,1	3,9	4,8	0,6	Castillo	48
La Ceja-El Retiro	La Argentina	120,6	141,2	20,6	2,9	1,1	1,6	0,4	0,1	4,4	4,9	0,9	Colombia	30
La Ceja-El Retiro	La Marsella	93,8	114,4	20,7	3,0	0,5	0,9	0,4	0,1	3,0	3,9	0,7	Castillo	36
La Ceja-El Retiro	El Mirador	86,9	108,1	21,2	3,0	0,6	0,9	0,3	0,0	3,7	4,1	0,9	Castillo	38
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	137,8	155,9	18,2	2,6	1,3	1,8	0,5	0,1	4,5	5,2	0,6	Caturra	60
Ciudad Bolívar	Santa Ana	123,3	152,1	28,8	4,1	1,1	2,3	1,2	0,2	4,2	5,8	1,0	Catimor	46
Ciudad Bolívar	Aguas Frías	87,2	116,5	29,3	4,2	0,5	1,2	0,7	0,1	3,1	4,6	0,9	Castillo	53
Ciudad Bolívar	Los Naranjos	118,3	139,1	20,8	3,0	0,8	1,1	0,4	0,1	3,5	4,0	0,5	Castillo	49
Ciudad Bolívar	El Privilegio	160,4	173,6	13,3	1,9	0,8	1,3	0,4	0,1	3,5	4,3	0,8	Castillo	43
Ciudad Bolívar	Aguas Claras	132,4	158,5	26,2	3,7	1,1	2,5	1,3	0,2	3,9	5,7	0,9	Castillo	57
Ciudad Bolívar	Vuelta Bonita	140,2	160,0	19,8	2,8	1,6	2,0	0,4	0,1	5,0	5,3	1,0	Caturra	77
Ciudad Bolívar	La María	124,9	174,9	50,1	7,2	0,9	1,9	1,0	0,1	3,6	4,8	1,1	Castillo	36
Ciudad Bolívar	La Palomera	91,4	126,4	35,0	5,0	0,4	1,0	0,6	0,1	2,8	4,1	0,7	Catimor	60
Ciudad Bolívar	El Porvenir	117,7	144,7	27,0	3,9	0,7	1,2	0,5	0,1	3,2	4,1	0,9	Colombia	45
Ciudad Bolívar	La Carolina	136,8	157,6	20,8	3,0	1,1	2,0	0,8	0,1	4,1	5,3	0,8	Castillo	36
Urrao	La Mata de Guadua	68,8	89,5	20,7	3,0	0,4	0,6	0,2	0,0	3,0	3,6	0,8	Catimor	32
Urrao	El Tigre	88,6	110,4	21,8	3,1	0,5	0,8	0,3	0,0	3,2	3,9	0,9	Castillo	34
Urrao	El Cadillal	85,7	104,6	18,9	2,7	0,5	0,7	0,2	0,0	3,3	3,7	0,5	Caturra	30
Urrao	Las Flores	151,1	177,6	26,5	3,8	1,3	2,0	0,7	0,1	4,2	5,0	0,7	Castillo	49
Urrao	Bella Vista	125,4	147,5	22,2	3,2	1,1	1,6	0,4	0,1	4,4	4,8	0,8	Caturra	58
Urrao	La Falda	190,7	212,0	21,4	3,1	3,4	4,6	1,2	0,2	6,6	7,4	0,7	Caturra	63
Urrao	El Placer	90,7	110,8	20,1	2,9	0,8	1,1	0,3	0,0	3,8	4,3	1,1	Castillo	43

Urrao	El Rosal	103,2	129,0	25,8	3,7	0,9	1,5	0,6	0,1	4,1	4,9	1,0	Castillo	43
Urrao	La Esperanza - La Gulunga	171,2	192,1	20,9	3,0	2,1	2,9	0,8	0,1	5,3	6,0	0,5	Caturra	109
Urrao	La Esperanza - La Lorena	115,5	139,9	24,4	3,5	1,3	1,9	0,5	0,1	4,7	5,3	1,3	Castillo	49
Giraldo	La Zunga	86,5	108,3	21,8	3,1	0,8	1,2	0,4	0,1	4,0	4,6	1,1	Colombia	37
Giraldo	La zunga 1	150,1	173,5	23,4	3,3	1,7	2,5	0,8	0,1	4,9	5,6	1,0	Caturra	61
Giraldo	Montero	94,0	117,1	23,1	3,3	0,6	1,0	0,4	0,1	3,1	4,1	1,4	Castillo	25
Giraldo	Durazno	133,8	153,8	20,1	2,9	1,6	2,7	1,1	0,2	5,0	6,3	1,1	Caturra	51
Giraldo	La Falda del Centro	166,6	185,9	19,3	2,8	1,9	2,7	0,8	0,1	4,9	5,6	1,3	Castillo	47
Promedio		120,9	144,3	23,4	3,3	1,1	1,7	0,6	0,1	4,0	4,9	0,9		48

Anexo E: Balance de fijación y emisión en la cosecha cafetera en kg CO₂e/ kg de café cereza.

Núcleo	Finca	Emisión		Fijación	Balance
		Perdida de C de la MO del suelo	Fertilización con N		
La Ceja-El Retiro	El Danubio	0,159	0,025	0,373	0,190
La Ceja-El Retiro	La Argentina	0,443	0,100	0,758	0,214
La Ceja-El Retiro	La Marsella	0,406	0,181	0,512	-0,075
La Ceja-El Retiro	El Mirador	0,468	0,244	0,700	-0,011
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	0,883	0,089	1,071	0,099
Ciudad Bolívar	Santa Ana	0,442	0,060	1,485	0,983
Ciudad Bolívar	Aguas Frías	0,344	0,037	0,745	0,364
Ciudad Bolívar	Los Naranjos	1,268	0,019	1,146	-0,141
Ciudad Bolívar	El Privilegio	0,210	0,048	0,446	0,188
Ciudad Bolívar	Aguas Claras	0,170	0,043	1,050	0,837
Ciudad Bolívar	Vuelta Bonita	1,190	0,083	1,117	-0,156
Ciudad Bolívar	La María	0,219	0,073	0,815	0,523
Ciudad Bolívar	La Palomera	0,468	0,052	0,684	0,164
Ciudad Bolívar	El Porvenir	0,192	0,076	0,366	0,099
Ciudad Bolívar	La Carolina	0,405	0,064	0,865	0,396
Urrao	La Mata de Guadua	0,547	0,135	0,434	-0,248
Urrao	El Tigre	1,975	0,336	1,778	-0,533
Urrao	El Cadillal	1,825	0,345	0,777	-1,393
Urrao	Las Flores	0,367	0,078	0,743	0,298
Urrao	Bella Vista	0,765	0,164	0,743	-0,187
Urrao	La Falda	1,066	0,149	3,113	1,898
Urrao	El Placer	0,949	0,197	0,665	-0,480
Urrao	El Rosal	1,128	0,258	1,343	-0,043
Urrao	La Esperanza/La Gulunga	1,420	0,241	3,372	1,711
Urrao	La Esperanza/La Lorena	1,035	0,248	1,622	0,339
Giraldo	La Zunga	0,461	0,122	0,739	0,156
Giraldo	La zunga 2	0,545	0,057	1,607	1,005
Giraldo	Montero	0,393	0,069	0,660	0,198
Giraldo	Durazno	0,247	0,115	1,325	0,963
Giraldo	La Falda del Centro	0,245	0,053	1,000	0,702
Promedio General		0,674	0,125	1,068	0,269

Anexo F: Balance de fijación y emisión en la cosecha cafetera en kg CO₂e/ha-mes

Núcleo/Municipio	Finca	Emisión		Fijación	Balance	Emisión total
		Por pérdida de C de la M.O del suelo	Por fertilización con N			
La Ceja-El Retiro	El Danubio	331	51	778	395	383
La Ceja-El Retiro	La Argentina	331	75	566	160	406
La Ceja-El Retiro	La Marsella	363	161	457	-67	524
La Ceja-El Retiro	El Mirador	292	153	438	-7	445
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	563	57	683	63	620
Ciudad Bolívar	Santa Ana	414	56	1049	580	469
Ciudad Bolívar	Aguas Frías	321	35	695	340	355
Ciudad Bolívar	Los Naranjos	483	7	437	-54	491
Ciudad Bolívar	El Privilegio	330	75	702	297	406
Ciudad Bolívar	Aguas Claras	234	60	1445	1152	293
Ciudad Bolívar	Vuelta Bonita	688	48	645	-90	736
Ciudad Bolívar	La María	390	131	1455	934	521
Ciudad Bolívar	La Palomera	563	62	824	198	626
Ciudad Bolívar	El Porvenir	338	134	647	174	473
Ciudad Bolívar	La Carolina	521	83	1113	509	604
Urrao	La Mata de Guadua	322	79	255	-146	402
Urrao	El Tigre	446	41	219	-268	488
Urrao	El Cadillal	591	112	251	-451	702
Urrao	Las Flores	379	80	767	308	459
Urrao	Bella Vista	382	82	371	-93	464
Urrao	La Falda	415	58	1212	739	473
Urrao	El Placer	450	94	316	-228	544
Urrao	El Rosal	593	135	706	-23	728
Urrao	La Esperanza/La Gulunga	377	64	896	455	441
Urrao	La Esperanza/La Lorena	368	88	576	120	456
Giraldo	La Zunga	360	95	577	122	456
Giraldo	La zunga 2	265	28	780	488	292
Giraldo	Montero	385	68	648	194	453
Giraldo	Durazno	354	164	1685	1167	518
Giraldo	La Falda del Centro	284	62	1159	814	346
Promedio General		404	81	745	259	486

6. Bibliografía

1. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. *Comportamiento de la industria cafetera colombiana 2010*. 2010.
2. ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL CAFÉ. Comercio mundial del café (1963—2013): Reseña de los mercados, retos y oportunidades con que se enfrenta el sector | Junta del Cafe. ICC [online]. 2014 [accessed. 25. May 2015]. Retrieved z: <http://juntadelcafe.org.pe/documentos/comercio-mundial-del-cafe-1963-2013-resena-de-los-mercados-retos-y-oportunidades-con-que>
3. ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL CAFÉ. Comercio mundial del café (1963-2013) reseña de los mercados, retos y oportunidades con que se enfrenta el sector. *Oganización Internacionl del Café*. 2014, vol. ICC 111-5, p. 29.
4. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. *El comportamiento de la industria cafetera colombiana 2012*. Manizales: FNC, 2013.
5. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Algrano - Huella de carbono, prioridad para la Federación de Cafeteros de Colombia. *Al Grano* [online]. 2013, no. 24 [accessed. 25. May 2015]. Retrieved z: http://www.federaciondecafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/medicion_y_gestion_de_la_huella_de_carbono_prioridad_para_la_federacion_de/
6. FONSECA, Luz Amparo. *Colombia: Escenario social, económico e institucional de la actual crisis cafetera* [online]. Santiago de Chile: CEPAL, 2002 [accessed. 25. May 2015]. Retrieved z: <http://www.cepal.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/ddpe/noticias/noticias/9/9719/P9719.xml&xsl=/ddpe/tpl/p1f.xsl&base=/ddpe/tpl/top-bottom.xsl>
7. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Huila, región pionera y a la vanguardia en producción de microlotes en Colombia. *Detras del café de colombia: perspectiva desde el origen* [online]. 2013, no. 9 [accessed. 25. May 2015]. Retrieved z: http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/huila_region_pionera_y_a_la_vanguardia_en_produccion_de_microlotes_en_colom
8. PONTE, Stefano. Estándares y sostenibilidad en el sector cafetero: una aproximación global a la cadena de valor. *Revista Federación Nacional de Cafeteros* [online]. 2004, no. 20, pp. 1–79. Retrieved z: <http://www.federaciondecafeteros.org/static/files/2.EstandaresySostenibilidadenElSectorCafetero.pdf>
9. FROHMANN, Alicia. and Ximena. OLMOS. *Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático* [online]. 2013 [accessed. 28. May 2014]. Retrieved z: <http://www.cepal.org/cgi->

- bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/5/51365/P51365.xml&xsl=/publicaciones/ficha.xsl&base=/publicaciones/top_publicaciones.xsl#
10. CÁMARA DE COMERCIO DE MEDELLÍN PARA ANTIOQUIA. *Cluster café Antioquia* [online]. 2014. Retrieved z: <http://www.camaramedellin.com.co/site/Cluster-y-Competitividad/Gestion-proyectos-regionales/Cluster-del-cafe.aspx>
 11. JARAMILLO R., A. *Clima andino y café en Colombia*. Cenicafé. 2005.
 12. DAVIS, A. P., R. GOVAERTS, D. M. BRIDSON and P. STOFFELEN. An annotated taxonomic of the genus coffee (Rubiaceae). *BotJorurLinneanSociety* [online]. 2006, vol. 152, pp. 465–512 [accessed. 27. May 2014]. Retrieved z: <http://ageconsearch.umn.edu/handle/168448>
 13. HERRERA, J.C, H.A CORTINA, F ANTONHONY, N.S PRAKASH, P LASHERME, A.L GAITAN, M.A CRISTANCHO A, J.R ACUÑA Z and D.R LIMA. Coffee. In: *Medicinal plants: Genetic resources chromosome engineering and crop improvement*. [online]. 2012 [accessed. 27. May 2014], p. 589–640. Retrieved z: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail?vid=3&sid=1e697f43-d793-4d0b-a5c8-bcb4ba55dd63@sessionmgr4002&hid=4106&bdata=Jmxhbm9ZXMmc210ZT1laG9zdC1saXZl#db=a9h&AN=27055594>
 14. OROZCO C, F.J. Descripción de especies y variedades de café. *Boletín Técnico CENICAFE*. 1986, no. 1, pp. 1–29.
 15. FNC-CENICAFÉ. *Manual del cafetero colombiano*. Primera ed. 2013.
 16. PÉREZ AKAKI, Pablo. Pablo Pérez Akaki. *Las transformaciones institucionales en la producción y comercialización internacional del café en el siglo XX e inicios del XXI* [online]. 2007 [accessed. 27. May 2014]. Retrieved z: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=1e697f43-d793-4d0b-a5c8-bcb4ba55dd63@sessionmgr4002&vid=4&hid=4106>
 17. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. *Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2012*. 2013.
 18. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. *Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2010*. 2010.
 19. FARFAN, Valencia Fernando. Cafés especiales. In: FNC, ed. *Libro Sistemas Producción de café en Colombia*. Cenicafé. 2011, p. 234–254.
 20. FNC. Café de Colombia, en línea con la mega-tendencia de ética y sostenibilidad. *Al Grano; edición No 27* [online]. 2014. Retrieved z: http://www.federaciondefcafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/cafe_de_colombia_en_linea_con_mega-tendencias_de_etica_y_sostenibilidad/

21. COMPANY, Starbucks Coffee. *Tarjeta de puntuación genérica V3.3, C.A.F.E. Practices* [online]. 2014. Retrieved z: www.scsglobal.services.com/starbucks-cafe-practices
22. UTZ CERTIFIED. *Código de Conducta General, Versión 1.0, para certificaciones de grupos y multi-grupos* [online]. 2014. Retrieved z: www.utzcertified.org
23. RED DE AGRICULTURA SOSTENIBLE. *Guía de Interpretación General Norma para Agricultura Sostenible* [online]. 2014. Retrieved z: <http://san.ag/web/es/documentos-actualizados-de-la-ras/>
24. RAMIREZ, . B. V. La fenología del café una herramienta para apoyar la toma de decisiones. *Avance Técnico No. 441 CENICAFE*. 2014, no. 0120-0178.
25. AALDE, Harald., Patrick. GONZALEZ, Michael. GYTARSKY, Thelma. KRUG, Werner A. KURZ, Stephen. OGLE, John. RAISON, Dieter. SCHOENE and N.H. RAVINDRANATH. TIERRAS FORESTALES. In: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. 2006, p. 1–93.
26. MENA, E. Victor, Hernán J. ANDRADE and Carlos M. NAVARRO. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforestería neotropical*. 2011, vol. 1, no. 2248-7433.
27. RAMIREZ, . B. V. and P. J. ARCILA. Criterios para definir la densidad de siembra de café. *Avance Técnico No. 450 CENICAFE*. 2014, no. 0120-0178.
28. FARFAN, . V. F and S. J RENDON. Producción de madera por la variedad Castillo y Tabien sistemas agroforestales. *Avances técnicos Cenicafe*. 2014, vol. 448.
29. ROJA. R, P. Madera de Café : Ingenio con Aroma Propio. *Revista el Mueble y la Madera* [online]. 2007, vol. 55, pp. 48–53. Retrieved z: www.revista-MM.com
30. IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Volumen 4 Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra* [online]. 2006 [accessed. 28. May 2014]. Retrieved z: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>
31. SEGURA, Milena, Markku KANNINEN and Damaris SUAREZ. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*. 2006, vol. 68, no. 2, pp. 143–150. ISSN 0167-4366.
32. SANDEGHIAON, S. K. Boletín Técnico No. 32 CENICAFE. *Fertilización del suelo y nutrición del café en Colombia*. 2008.
33. VALENCIA A., G. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. *Agroinsumos del Café S.A-Cenicafe*. 1999, vol. 14, no. 958-96554-4-0, p. 94.

34. LEAL-VARÓN, Luis Alfredo, Alveiro SALAMANCA-JIMÉNEZ and Siavosh SADEGHIAN-KHALAJABADI. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva 1. *Avance Técnico CENICAFE*. 2007, vol. 58, no. 3, pp. 216–226.
35. SADEHIAN KH., S. Determinación de los niveles críticos de los nutrientes para el cultivo de café en suelos de la zona cafetera. *Avances técnicos Cenicafé. Cenicafé. Informe anual de actividades 2003-2004*. 2004, p. 23.
36. ORDOÑEZ, S., R. QUINTERO, E. LARRAHONDO and A. JARAMILLO. Evaluación de dos métodos analíticos para cuantificar las pérdidas de nitrógeno por volatilización en suelos del valle del río Cauca. *Carta Trimestral Cenicafé*. 2005, vol. 27(2), pp. 4–9.
37. LEAL V., L.A, A SALAMANCA J. and S S ADEGHIAN KH. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Avances técnicos Cenicafé*. 2007, vol. 58(3), pp. 216–226.
38. SEGURA, Milena A and Hernan J ANDRADE. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul* [online]. 2012, no. 35, p. 60. ISSN 1909-2474. Retrieved z: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsgao&AN=edsgcl.346140829&lang=es&site=eds-live>
39. BURBANO, H. La materia orgánica del suelo en el contexto de una agricultura sostenible. Fertilidad de suelos. *Diagnostico y Control. SCCS Bogotá*. 1994, pp. 187–217.
40. KATHRYN, Bickel., Richards. GARY, KÖHL MICHAEL and Ricardo Leonardo VIANNA. REPRESENTACIÓN COHERENTE DE. In: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. 2006, p. 1–46.
41. MERCEDES, Eyherabide, Saínez Rozas HERNÁN, Barbieri PABLO and Echeverría HERNÁN EDUARDO. Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo / COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING SOIL ORGANIC CARBON. *Ciencia del suelo VO - 32* [online]. 2014, no. 1, p. 13. ISSN 1850-2067. Retrieved z: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S1850.20672014000100002&lang=es&site=eds-live>
42. GALANTINI, J .A, R. A ROSELL and J. O IGLESIAS. Determinación de materia orgánica en fracciones granulométricas de suelos de la región semiárida bonaerense. *Ciencia del Suelo* [online]. 1972, vol. 12, pp. 81–83. Retrieved z: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02704a&AN=unc.000256822&lang=es&site=eds-live>
43. ZHANG, H. and J. J. WANG. *Loss on Ignition Method. Soil Test Methods From the Southeastern United States* [online]. Southern C. 2014. ISBN 1581614195. Retrieved z: <http://www.clemson.edu/sera6>

44. SALEHI, M H, O HASHEMI BENI, H BEIGI HARCHEGANI, I ESFANDIARPOUR BORUJENI and H R MOTAGHIAN. Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere* [online]. 2011, vol. 21, pp. 473–482. ISSN 1002-0160. Retrieved z: 10.1016/S1002-0160(11)60149-5
45. FARFAN, . V. F and URREGO J B. Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé*. 2007, vol. 58(1), pp. 20–39. ISSN 00154040.
46. BABBAR, Liana I. and Donald R. ZAK. Nitrogen cycling in coffee agroecosystems: net N mineralization and nitrification in the presence and absence of shade trees. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [online]. 1994, vol. 48, no. 2, pp. 107–113 [accessed. 29. May 2014]. ISSN 01678809. Retrieved z: doi:10.1016/0167-8809(94)90081-7
47. 2DO CONGRESO INTERNACIONAL Y 8VO CONGRESO REGIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. *Cálculo Huella de Carbono ¿ Qué es la Huella de Carbono ?* Rosario, Argentina: Secretaria de Servicios Públicos y Medio Ambiente, 2013.
48. PAUSTIAN, Keith., N.H. RAVINDRANATH, Andre van. AMSTEL, Michael. GYTARSKY, Werner A. KURZ, Stephen. OGLE, Gary. RICHARDS and Zoltan. SOMOGYI. INTRODUCCIÓN. In: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. 2006, p. 1–25.
49. GONZÁLEZ, A. D and A. C KANYAMA. CALENTAMIENTO GLOBAL : EL SECTOR AGROPECUARIO. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2007, vol. 11, no. 0329-5184, pp. 7–14.
50. ELADYS, Córcega Pitta and Martelo Pena MARÍA TERESA. Consecuencias agrícolas y ambientales del cambio climático, en las condiciones de confort humano y animal, de las estaciones experimentales de la Facultad de Agronomía, UCV / Agricultural and environmental consequences of climate change in human and anima. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia VO - 30* [online]. 2007, no. Especial, p. 1. ISSN 0254-0770. Retrieved z: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S0254.07702007000400002&lang=es&site=eds-live>
51. OVALLE-RIVERA, Oriana, Peter LÄDERACH, Christian BUNN, Michael OBERSTEINER and Götz SCHROTH. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS ONE* [online]. 2015, vol. 10, no. 4, pp. 1–13. ISSN 19326203. Retrieved z: 10.1371/journal.pone.0124155
52. TANZI, C., T. DIETSCH, C. URENA, L. VINDAS and M. CHANDLER. Analysis of management and site factors to improve the sustainability of smallholder coffee production in Tarrazú, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [online]. 2012, vol. 155, pp. 172–181 [accessed. 29. May 2014]. ISSN 01678809. Retrieved z: doi:10.1016/j.agee.2012.04.013

53. AGRO ENFOQUE. Agroenfoques. *Problemáticas del Café* [online]. 2007, vol. 21, pp. 14–15 [accessed. 27. May 2014]. Retrieved z: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail?vid=15&sid=1e697f43-d793-4d0b-a5c8-bcb4ba55dd63@sessionmgr4002&hid=4106&bdata=Jmxhbmc9ZXMMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZI#db=a9h&AN=31234461>
54. STARR, Katherine, Xavier GABARRELL., Gara VILLALBA, PEIRO., TALENS, LAURA and Lidia LOMBARDI. Potential CO2 savings through biomethane generation from municipal waste biogas. *Biomass & Bioenergy* [online]. 2014, vol. 62, pp. 8–16. ISSN 09619534. Retrieved z: 10.1016/j.biombioe.2014.01.023
55. KLEIN, Cecile De., Rafael S.A. NOVOA, Stephen. OGLE, Keith A. SMITH, Philippe ROCHETTE., Thomas C WIRTH., Brian G MCCONKEY., Arvin MOSIER. and Kristin RYPDAL. EMISIONES DE N2O DE LOS SUELOS GESTIONADOS Y EMISIONES DE CO2 DERIVADAS DE LA APLICACIÓN DE. In: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. 2006, p. 1–56.
56. SIKORA, FJ and KP MOORE. Soil test methods from the southeastern United States. *Southern Cooperative Series Bulletin* [online]. 2014, no. 419 [accessed. 27. May 2015]. Retrieved z: <http://www.clemson.edu/agrsrvlb/sera6/MethodsManualFinalSERA6.pdf>
57. CARDONA C., D.A and S SADEGHIAN KH. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar con sombriero de *Inga* spp. *Cenicafé* 56(2): 2005, pp. 127–141.
58. LASCO, Rodel D., Stephen. OGLE, John. RAISON, Louis. VERCHOT, Reiner. WASSMANN, Kazuyuki. YAGI, Sumana BHATTACHARYA., John S. BRENNER., Julius Partson Daka. P., Sergio GONZÁLEZ., Thelma KRUG, Yue LI., Daniel L. MARTINO., Brian G. MCCONKEY. and Pete. SMITH. Capítulo 5 tierras de cultivo. In: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. 2006, p. 1–74.
59. ANDRADE. J, H, L MARIN. M and D PACHÓN. P. FIJACIÓN DE CARBONO Y PORCENTAJE DE SOMBRA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ (*Coffea arabica* L .). *Bioagro*. 2014, vol. 26, no. 2, pp. 127–132.