

BALANCE DE ENERGÍA EN SISTEMAS PRODUCTIVOS DE CAFÉ VARIEDAD CASTILLO, EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO (COLOMBIA)*

Energy balance in the production systems of the castillo variety coffee, in the department of Nariño (Colombia)

*Investigación presentada como parte del macroproyecto: "Investigación evaluación del efecto de sombra en diferentes especies arbóreas en el comportamiento agronómico y calidad de café Consacá, Nariño, Occidente", el cual ha sido financiado por el Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación, del Sistema General de Regalías (SGR), y ejecutado por la Universidad de Nariño, durante los años 2013 a 2021.

 **Tulio Cesar Lagos Burbano**¹
E-mail: tlagos3@gmail.com

 **Zulma Natali Cruz Pérez**²
E-mail: zulma.natali@yahoo.com

 **Johana Alixa Muñoz Belalcázar**³
E-mail: mjohannaalixa@gmail.com

 **Danita Andrade Díaz**³
E-mail: danitaan@gmail.com

¹Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, Pasto, Nariño, Colombia.

²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Carretera San José de las Lajas – Tapaste, Mayabeque, Cuba.

³Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos, Universidad de Nariño (UDENAR), Ciudadela Universitaria Torobajo, Pasto, Nariño, Colombia.

Fecha recepción: 5 de febrero de 2021 / Fecha Aprobación: 22 de marzo de 2021 / Fecha Publicación: 30 de junio 2021

RESUMEN

Esta investigación estuvo orientada a estimar el balance energético basado en la fijación de Carbono, en cuatro sistemas productivos de café, de cuatro municipios, pertenecientes a las subregiones Mayo, Centro y Occidente, del departamento de Nariño (Colombia). La obtención de la información fue posible mediante la aplicación de medidas alométricas, para las especies arbóreas utilizadas en los tratamientos y destructivas para el café, mediante la extracción y fragmentación de cada uno de sus componentes. Las evaluaciones fueron realizadas durante el primer y segundo semestre del 2019, en sistemas productivos que contaban con edad de cinco años. Se encontró que el mayor déficit se obtuvo en el municipio de la Unión con el tratamiento 1, mientras que el máximo excedente se obtuvo con el tratamiento 3 en el municipio de Sandoná. En el municipio de La Florida, el tratamiento 2 presentó los mayores valores de emisiones, siendo la fertilización nitrogenada la actividad de mayor emisión. En la interacción entre municipio y altitud se obtuvo promedios de captura de Carbono estadísticamente significativos, siendo los sistemas de mayor altitud del municipio de La Unión, los que obtuvieron promedios superiores. En cuanto a los tratamientos, no se presentó diferencia entre los socios de café con sombrío. Los resultados indican que los sistemas productivos de café, en asocio con especies forestales de sombrío, contribuyen a la mitigación del cambio climático, en tanto son ecosistemas potenciales en la fijación de carbono y resultan útiles para el pago de servicios ambientales.

Palabras claves.

Almacenamiento de carbono, cambio climático, medidas alométricas, biomasa, fijación, emisión.

Cómo citar:

Lagos Burbano, T. C., Cruz Pérez, Z. N., Muñoz Belalcázar, J. A., y Andrade Díaz, D. (2021). Balance de energía en sistemas productivos de café variedad castillo, en el departamento de Nariño (Colombia). *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias -FAGROPEC*. Universidad de la Amazonia. Vol. 13 (1), 44-59. <https://doi.org/10.47847/fagropec.v13n1a5>



ABSTRACT

This research was aimed at estimating the energy balance based on carbon fixation in four coffee production systems, located in four municipalities of mayo's, central and western subregions of the department of Nariño (Colombia). The data collection was implemented through the application of allometric measurements for the tree species used in the treatments and destructive purposes for coffee through the extraction and fragmentation of each of its components. The assessments were carried out during the first and the second semesters of 2019 in five-year-old production systems. It was found that the largest deficit was obtained in the municipality of La Unión with the treatment 1. Meanwhile the maximum surplus was obtained in treatment 3 in the municipality of Sandoná. The highest emission values were presented in the municipality of La Florida with the Treatment 2, where the highest emission activity corresponded to a nitrogen fertilization. The interaction between municipality and altitude obtained statistically significant carbon average capture. La Unión's systems with the higher altitude were of a higher average. And in terms of treatments there is no difference among the coffee and shade alliance. The results indicate that coffee production systems in association with shade forest species contribute to the climate change mitigation. These ecosystems might be crucial in the carbon fixation and as for the payment of environmental services.

Key words

Carbon storage, climate change, allometric measurements, biomass, fixation, emission.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del sistema productivo de café es una de las principales actividades socioeconómicas del sector agrícola colombiano. A su vez, en el contexto de dicho país, el café es uno de los productos más importantes y representativos, en lo referente al renglón de las exportaciones (Matta, 2017). Sin embargo, pese a los amplios beneficios económicos que provee, la producción a gran escala suele estar centrada en las exportaciones, por lo que su contribución a los suministros locales de alimentos y a la conservación ambiental es relativamente baja (FAO, 2016). Por esto último, para los sistemas productivos de café se han propuesto y también se han incrementado los usos de especies arbóreas para sombrero, como una estrategia de conservación de la biodiversidad, de adaptación al cambio climático y de seguridad alimentaria, entre otros servicios a los ecosistemas (FAO, 2016) (De Beenhouwer *et al.*, 2016).

Acorde con lo anterior, se evidencia la importancia del uso e implementación de buenas prácticas agrícolas, dentro del cultivo de café, tales como la asociación con especies arbóreas. Esto, en tanto dicha práctica contribuye al aseguramiento de la calidad y al desarrollo de actividades que impulsen el cuidado del medio ambiente y que garanticen el conjunto de principios y requisitos, que deben seguirse durante los procesos de producción, tanto agronómicos, como de beneficio; lo anterior, con el fin de asegurar además, que el producto obtenido sea inocuo para el consumidor (Puerta *et al.*, 2016).

Adicionalmente, el Sistema de Información sobre Biodiversidad reporta que en Colombia existen 58.312 especies diferentes registradas, ubicándose dicho país en los primeros lugares

con mayor diversidad a nivel mundial (SIB, 2020). Teniendo en cuenta esa información, se entiende la importancia de promover prácticas que contribuyan a detener la pérdida de los bosques, considerando que éstos benefician a cientos de millones de personas, incluidas muchas de las más pobres del mundo; además, teniendo en cuenta que éstos ecosistemas contribuyen, en gran medida, a mejorar el nivel de vida de cientos de comunidades de escasos recursos, cuya economía depende de los bienes y los servicios ambientales que proveen los bosques y las especies arbóreas. Así mismo, dichas prácticas permiten combatir el cambio climático, proteger los hábitats del 75% de la biodiversidad terrestre a nivel mundial y mantener la resiliencia de los ecosistemas, respaldando de esta manera la agricultura sostenible (FAO, 2016).

Dicho lo anterior, los sistemas de producción agrícola, manejados de forma amigable con el medio ambiente y en asocio con árboles nativos, son considerados como una buena estrategia para implementar programas de mitigación y de adaptación al cambio climático. Incluir árboles nativos favorece económicamente a los productores e incrementa los lugares de refugio y las condiciones mínimas de sobrevivencia, en ambientes que sean semejantes a los ecosistemas naturales, para que los diferentes grupos de animales logren adaptarse a los cambios (Canal y Andrade, 2019). Además, estas son medidas voluntarias adoptadas por los productores y por el sector privado, las cuales contribuyen con los sistemas de certificación, que sirven a su vez como salvaguardias económicos, sociales y ambientales (FAO, 2016).

Por su parte, actualmente existen pocos estudios que traten temas relacionados con el almacenamiento y con la fijación de carbono de los sistemas productivos cafeteros, en el departamento de Nariño; ello, aun cuando esto representa un aporte a la mitigación de los efectos del cambio climático, lo cual a su vez implica una ventaja económica para los productores, dada su contribución a la calidad del café. Igualmente, teniendo en cuenta que, entre los servicios ambientales más relevantes para los ecosistemas forestales y agroforestales, se encuentra la fijación de carbono durante el proceso de fotosíntesis, que captura el CO₂. En Nariño, la estimación de la biomasa en los sistemas productivos de café ha de considerarse como un tema relevante, en relación con el calentamiento global, debido a que cada vez se da mayor importancia al papel de los cultivos y de los bosques, en relación con los gases de efecto invernadero. En este caso, la determinación de la fijación y del almacenamiento de carbono en sistemas productivos de café, contribuiría al mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales, de uno de los agroecosistemas más representativos del departamento, a través de la estimación de un valor agregado a la producción, el cual podría tener gran potencial e importancia para los productores, debido al pago de servicios ambientales.

Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo principal determinar el balance energético basado en la fijación y en la emisión de carbono en sistemas productivos de café, en el sur occidente colombiano, como estrategia para promover su manejo y conservación, en el departamento de Nariño (Colombia).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se llevó a cabo a partir del segundo semestre del año 2014 - hasta el año 2019, en los municipios de La Unión de la subregión Mayo; Sandoná y Consacá de la subregión Occidente y en La Florida de la subregión Centro, ubicados estos en el departamento de Nariño, el cual se sitúa al sur occidente de Colombia. Los lugares de evaluación se encuentran distribuidos en la región Andina del departamento: La Unión perteneciente al ecotopo 220A; Consacá, Sandoná y La Florida al ecotopo 221A (Gómez *et al.*, 1991) (Tabla 1).

Tabla 1.
Ubicación geográfica de los lotes evaluativos de la investigación.

Municipio	Lote experimental	Altitud (m.s.n.m)	Longitud	Latitud
Sandoná	Las delicias	1.536	77°44' 54"	1°13' 36"
	Mana I	1.700	77°48' 32"	1°10' 25"
	La Cruz	2.015	77°46' 45"	1°12' 27"
La Unión	La Playa	1.430	77°09' 00"	1°38' 28"
	El Sauce	1.620	77°07' 38"	1°34' 23"
	Buenos Aires	2.030	77°07' 38"	1°34' 23"
Consacá	Cariaco Bajo	1.577	77°28' 07"	1°10' 30"
	Bomboná	1.668	77°27' 31"	1°11' 26"
	San Antonio	1.989	77°25' 56"	1°12' 50"
La Florida	La Joya	1.677	77°17' 56"	1°22' 06"
	Santa Ana	1.877	77°18' 53"	1°23' 56"
	San Francisco	2.030	77°20' 43"	1°22' 20"

La evaluación de la biomasa, como base para la determinación del porcentaje de carbono orgánico y de carbono equivalente (CO₂eq), se realizó en los laboratorios especializados en suelos, de la Universidad de Nariño, los cuales se encuentran ubicados en la Ciudadela Universitaria, sede Torobajo del municipio de Pasto.

Material vegetal y diseño experimental. Se seleccionaron 12 lotes experimentales, tres por municipio de estudio; en los cuatro municipios se sembró café variedad Castillo, regional Tambo, bajo un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA). Se establecieron cuatro repeticiones, que correspondieron a los bloques y fueron definidos por los cuatro municipios a evaluar y dos unidades experimentales por tratamiento, que fueron tomadas respectivamente en el primer y en el segundo semestre del 2019, desde las cuales se realizaron las evaluaciones. A su vez, se utilizó un arreglo en parcelas divididas, a partir del cual, la parcela principal fue la altitud sobre el nivel del mar y las subparcelas fueron los tratamientos correspondientes a los sistemas productivos de café (Tabla 2); allí, se usaron diferentes especies para el sombrío, tales como: aguacate (*Persea americana* Mill.), limón tahití (*Citrus limon* (L.) Burm), guamo (*Inga* sp) y carbonero (*Albizia carbonaria* Britton).

Tabla 2.
Sistemas productivos de café evaluados en los cuatro municipios de estudio.

Tratamiento	Componentes	Distancia siembra (m)	Sistema siembra	Plantas (ha)
T1	Café sin sombrío	Café: 1,3 x 1,3	Triángulo	6.800
T2	Café con sombrío más limón y aguacate	Café: 1,3 x 1,3 Limón: 8 x 16 Aguacate: 8 x 16	Triángulo Cuadro Cuadro	6.800 78 78
T3	Café con sombrío de guamo	Café: 1,3 x 1,3 Guamo: 9 x 9	Triángulo Cuadro	6.800 123
T4	Café con sombrío de carbonero	Café: 1,3 x 1,3 Carbonero: 12 x 12	Triángulo Cuadrado	6.800 69

Así mismo, cada lote experimental contaba con un área de 10.000m², en la cual se establecieron los cuatro tratamientos (Tabla 2), con un área de 2.500m², siendo esta la parcela experimental.

Muestreo, para evaluación de captura de carbono. El cálculo de la biomasa seca total del componente café, en cada uno de los cuatro sistemas o tratamientos, se realizó mediante métodos directos o destructivos. Para ello, se extrajo una planta completa y se hizo la separación de los componentes de la biomasa aérea, es decir, de hojas, tallos, ramas y frutos. Para la biomasa radical, el suelo fue removido por completo en los primeros 50cm de profundidad, y se extrajo, minuciosamente, la mayor cantidad de raíces finas y gruesas. Los dos componentes se pesaron en fresco; luego fueron puestos a secar a 70°C, en una estufa con circulación de aire, hasta llegar al peso seco constante (Jiménez *et al.*, 2019).

Por cada tratamiento, para el componente árboles de sombrío, se seleccionaron tres parcelas de 250 m² y se registró el valor del diámetro (cm) de cada árbol, a 1,30m (DAP). Para estimar el carbono almacenado, se aplicaron ecuaciones alométricas (Tabla 3).

La ecuación utilizada para limón y aguacate fue la establecida de manera general para frutales y para el carbonero fue la utilizada en especies arbóreas de bosque húmedo premontano (Álvarez *et al.*, 2011).

Para la determinación de carbono en la raíz, primero se calculó la biomasa aérea del árbol, a través de las ecuaciones alométricas de cada especie; el valor obtenido se reemplazó en la ecuación alométrica para la biomasa de raíces, dada de manera general por Penman *et al.* (2003). Finalmente, para la obtención de la biomasa total se sumaron tanto, la biomasa aérea, como la biomasa de raíz.

Posterior a ello, para la estimación del carbono equivalente para el café y los árboles de sombrío, se tuvo en cuenta que el carbono equivalente (CO₂eq), corresponde a la cantidad extraída de CO₂ de la atmósfera, la cual es convertida en carbono, a través del proceso fotosintético, al interior de la planta. Por lo anterior, se aplicó la siguiente ecuación:

Tabla 3.
Ecuaciones alométricas utilizadas por especie para la estimación de biomasa.

Ecuación alométrica	r ²	Especie	Observación	Fuente
$BA = (0,1955 * DT^{1,648}) * 1,266$	0,9	Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	BA= Biomasa aérea (kg/árbol) medido a 15 cm del suelo.	(Quilio <i>et al.</i> , 2010)
$BA = 0,01513 * D^{3,0054}$	0,9	Guamo (<i>Inga sp.</i>)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Quilio <i>et al.</i> , 2010)
$BA = EXP(-1,8656 + (2,3733 * LN(D)))$	0,9	Carbonero (<i>Albizia caribaea</i> Britton.)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Alvarez <i>et al.</i> , 2011)
$BA = 10^{-1,11 + (2,64 * LOG(D))}$	1,0	Limón (<i>Citrus limon</i> (L) Burm) y aguacate (<i>Persea Americana</i>)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Segura y Andrade, 2008)
$Raíces = e^{-(-1,06 + 0,88 * LN(BA))}$	0,8	Biomasa de raíces a partir de biomasa arriba del suelo.	BA= Biomasa aérea (kg/árbol)	(Penman <i>et al.</i> , 2003)

$$\text{Dióxido de carbono equivalente (CO}_2\text{eq)} = \text{BM} \times 0,50 \times 3,66$$

Donde:

BM = peso seco (gr)

0,50 = 50%, porcentaje de carbono

3,66 = Constante para convertir carbono en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), factor de conversión a dióxido de carbono equivalente y que resulta de la siguiente ecuación:

$$\text{Peso molecular del CO}_2 / \text{Peso molecular del carbono} = 44/12 = 3,66$$

Por su parte, para el cultivo de café, cada seis meses se evaluó una planta por tratamiento, mientras que las especies arbóreas fueron evaluadas cada dos meses. La biomasa total se obtuvo sumando la biomasa del café y de las especies arbóreas asociadas en cada tratamiento, la cual finalmente fue transformada, acorde con la descripción anterior.

Cuantificación y balance de carbono en sistemas productivos

Para esta actividad se utilizó la metodología desarrollada por Arias *et al.* (2013), a partir de la cual, con la información generada para cada uno de los cultivos, se cuantificaron las fijaciones y las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI); además, se determinó el balance por sistema de cultivo. Por lo tanto, se determinó la información de los diferentes procesos, etapas y fases asociadas, que tienen relación con los procesos de fijación y emisiones de CO₂ atmosférico, y se cuantificó el balance de carbono mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Balance de carbono} = \text{Fijaciones} - \text{Emisiones}$$

Dentro de esta metodología se tuvo en cuenta las emisiones de CO₂ dirigidas hacia la atmósfera, las cuales fueron generadas por el transporte con automotores, debido a que allí hay un uso de

combustibles como la gasolina, derivado de las diferentes etapas del proceso, el cual implica actividades como el transporte de plántulas, árboles, material vegetal para la resiembra fertilizantes, agroquímicos, entre otros insumos. Estas emisiones se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión de CO}_2\text{eq transporte} = \text{Consumo combustible} \times \text{Factor de emisión del combustible}$$

De igual forma, para el cálculo de emisiones de CO₂eq, asociado con el control de arvenses con guadaña, discriminando su funcionamiento con gasolina, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión de CO}_2\text{eq guadaña} = \text{Consumo gasolina} \times \text{Factor de emisión de la gasolina}$$

Además, las emisiones de CO₂eq asociadas con la fertilización nitrogenada fueron calculadas en relación con el grado del fertilizante y la cantidad de nitrógeno que contenga, puesto que se genera la emisión de óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera; en los cálculos, el óxido nitroso fue convertido a dióxido de carbono equivalente, con el fin de facilitar la contabilidad del carbono, en términos de CO₂eq, teniendo en cuenta, además, que 1 g de nitrógeno aplicado emite 2,19g de CO₂eq; el cálculo se realizó acorde con las siguientes ecuaciones:

1. Emisión de CO₂eq fertilización nitrogenada = Consumo fertilizante x Factor de emisión de fertilizante
2. Factor de emisión del fertilizante = Grado de nitrógeno del fertilizante x 100 x 2,19

La estimación del total de emisión por tratamiento se realizó mediante la sumatoria de cada una de las emisiones determinadas.

Análisis de la información

Los datos obtenidos en campo fueron registrados en una base de datos, en hoja de cálculo Excel. Mediante el análisis de varianza (ANDEVA), con una probabilidad del 95%, se determinaron los efectos entre las fuentes de variación y los tratamientos, de acuerdo con el modelo lineal general (gml); además, se realizó una comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0,05$), utilizando el paquete estadístico SAS 9,4 (SAS Institute, Inc, Cary, NC).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 4, 5, 6 y 7 se observan los resultados obtenidos, de acuerdo con la aplicación de la metodología descrita. En dichas tablas, también se refleja el estimado del balance de carbono, para los cuatro sistemas productivos, de los cuatro municipios. La Unión fue el municipio que presentó la máxima deficiencia de carbono en el tratamiento 1, con un valor de -2,470.19 gramos de CO₂ eq/ha. Resultados similares fueron obtenidos por Canal y Andrade (2019), quienes encontraron que los sistemas agroforestales con *Cordia alliodora* fueron los más amigables con el ambiente, en términos de huella de carbono, dado que la fijación de carbono

en su biomasa fue mayor, a las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la producción y el procesamiento de café; ello, en contraste con los sistemas con plátano y monocultivo, siendo el monocultivo el de mayor déficit, con valores de $-6,4 \pm 2,1$ Mg CO₂eq/ha/año.

El municipio con mayor excedente de carbono en el tratamiento 3 fue Sandoná, el cual obtuvo un valor de 18.295,9 gramos de CO₂ eq/ha. Al respecto de este tipo de resultados, Hergoualch *et al.* (2012) encontraron, al séptimo año de evaluar la captura en un sistema de monocultivo de café y un sistema agroforestal establecido con Inga densiflora, que las existencias de carbono sobre el suelo en monocultivo de café fueron de $9,8 \pm 0,4$ Mg C/ha, mientras que en el sistema agroforestal ascendieron a $25,2 \pm 0,6$ Mg C/ha; con ello, a su vez demostraron que la implementación de sistemas agroforestales aumentaría las remociones netas de GEI atmosférico y que, por tanto, estos eran una alternativa importante para la incorporación de mecanismos y de estrategias que contribuyeran a la reducción de las emisiones de carbono (Cabrera *et al.*, 2016).

Por su parte, el municipio de La Florida alcanzó el mayor valor de emisión correspondiente al tratamiento 2, y a su vez mostró la menor emisión en el tratamiento 1. Este resultado es acorde con lo propuesto por Arias *et al.* (2013), quienes afirman que la cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono atmosférico, en un cultivo, están dadas por las diferentes prácticas culturales que se suscitan durante el ciclo productivo del mismo; entre ellas se encuentran, por ejemplo, el transporte de insumos; las aspersiones para control fitosanitario con la utilización de equipos motorizados; la fertilización nitrogenada; el control de arvenses con el uso de guadaña; los gastos de energía eléctrica consumida por motores; los gastos de energía eléctrica consumida por bombillos, entre otras fuentes de energía. De igual forma, la actividad con mayor emisión fue la fertilización nitrogenada, encontrándose con ello, resultados similares a los reportados por Hernández *et al.* (2018).

Los anteriores resultados muestran la importancia que, en términos ambientales, tienen los sistemas agroforestales de café, para la mitigación del cambio climático. Ello, en tanto los sistemas productivos, con mayor diversidad de especies vegetales, almacenan mayor cantidad de carbono total, debido a que presentan mayor presencia de biomasa viva, a diferencia de los sistemas de café establecidos en monocultivos a libre exposición. En tal sentido, estos sistemas agroforestales o sistemas en asocio tienen un alto potencial, como sumideros de carbono o de fijación y almacenamiento de carbono, los que a su vez permiten la producción agropecuaria y el mejoramiento o el incremento de los ingresos de los productores (Díaz *et al.*, 2016) (Cabrera *et al.*, 2016) (Patiño *et al.*, 2018).

Por otra parte, el análisis de varianza para la cuantificación de Carbono presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$), para el modelo analizado, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,53 y un coeficiente de variación del 33,95%. De las fuentes de variación determinadas se tiene que la interacción, entre bloque (Municipio) y altitud, es altamente significativa, mientras que el efecto de los tratamientos solo es significativo (Tabla 8).

Tabla 4. Balance de carbono en un cultivo de café variedad Castillo de cinco años, en cuatro sistemas productivos, del municipio de Sandoná.

Etapas y prácticas	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3		Tratamiento 4	
	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación
Almacenamiento de carbono en el cultivo	-	458,24	-	1.453,81	-	21.201,55	-	17.889,47
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de plántulas	0,478	-	0,478	-	0,478	-	0,478	-
Especies arbóreas	0	-	39,48	-	29,62	-	17,77	-
Material vegetal para resiembra	7,5	-	7,67	-	7,63	-	7,58	-
Insumos	104,96	-	107,43	-	106,79	-	106,07	-
Emisiones de CO ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	28,68	-	29,35	-	29,18	-	28,98	-
Emisiones de CO ₂ por fertilización nitrogenada	2.685,16	-	2.748,27	-	2.731,95	-	2.713,45	-
Total	2.827,18	458,24	2.932,68	1.453,81	2.905,65	21.201,55	2.874,32	17.889,47
Balance (fijaciones –emisiones)	-2.368,94		-1.478,87		18.295,90		15.015,15	

Nota: Emisión (g Co₂eq) Fijación (g Co₂eq)

Tabla 5. Balance de carbono en un cultivo de café variedad Castillo de cinco años, en cuatro sistemas productivos, en el municipio de Consacá

Etapas y prácticas	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3		Tratamiento 4	
	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación
Almacenamiento de carbono en el cultivo	-	416,85		741,23		13.021,29		1.292,07
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de plántulas	0,86	-	0,86	-	0,86	-	0,86	-
Especies arbóreas	0	-	194,79	-	146,11	-	87,65	-
Material vegetal para resiembra	6,57	-	6,73	-	6,69	-	6,64	-
Insumos	91,99	-	94,15	-	93,6	-	92,96	-
Emisiones de Co ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	28,68	-	29,35	-	29,18	-	28,98	-
Emisiones de Co ₂ por fertilización nitrogenada	2.685,16	-	2.748,27	-	2.731,95	-	2.713,45	-
Total	2.813,26	416,85	3.074,15	741,23	3.008,39	13.021,29	2.930,54	16.292,07
Balance (fijaciones –emisiones)	-2.396,41	-2.332,92	10.012,90	13.361,53				

Nota: Emisión (g Co₂eq) Fijación (g Co₂eq)

Tabla 6. Balance de carbono en un cultivo de café variedad Castillo de cinco años, en cuatro sistemas productivos, en el municipio de La Florida.

Etapas y prácticas	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3		Tratamiento 4	
	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación
Almacenamiento de carbono en el cultivo	-	414,09	-	818,77	-	11.962,84	-	9.636,78
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de plántulas	0,866	-	0,866	-	0,866	-	0,866	-
Especies arbóreas	0	-	192,81	-	144,61	-	86,75	-
Material vegetal para resiembra	6,49	-	6,65	-	6,61	-	6,56	-
Insumos	90,91	-	93,05	-	92,5	-	91,87	-
Emisiones de CO ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	28,68	-	29,35	-	29,18	-	28,98	-
Emisiones de CO ₂ por fertilización nitrogenada	2.685,16	-	2.748,27	-	2.731,95	-	2.713,45	-
Total	2.812,11	414,09	3.070,99	818,77	3.005,72	11.962,84	2.928,48	9.636,78
Balance (fijaciones –emisiones)	-2.398,02		-2.252,23		8.957,12		6.708,30	

Nota: Emisión (g Co₂eq) Fijación (g Co₂eq)

Tabla 7. Balance de carbono en un cultivo de café variedad Castillo de cinco años, en cuatro sistemas productivos, en el municipio de La Unión.

Etapas y prácticas	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3		Tratamiento 4	
	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación	Emisión	Fijación
Almacenamiento de carbono en el cultivo	-	444,77	-	1.289,60	-	8.147,61	-	7.188,16
Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte de plántulas	1.109	-	1.109	-	1.109	-	1.109	-
Especies arbóreas	0	-	2,02	-	1,51	-	0,91	-
Material vegetal para resiembra	13,33	-	13,65	-	13,57	-	13,47	-
Insumos	186,68	-	191,07	-	189,94	-	188,65	-
Emisiones de Co ₂ por equipos utilizados en el control de arvenses	28,68	-	29,35	-	29,18	-	28,98	-
Emisiones de Co ₂ por fertilización nitrogenada	2.685,16	-	2.748,27	-	2.731,95	-	2.713,45	-
Total	2.914,96	444,77	2.985,46	1.289,60	2.967,26	8.147,61	2.946,57	7.188,16
Balance (fijaciones –emisiones)	-2.470,19		-1.695,86		5.180,35		4.241,59	

Nota: Emisión (g Co₂eq) Fijación (g Co₂eq)

Tabla 8.

Significancias obtenidas a través del análisis de varianza, para la cuantificación de carbono en las fuentes de variación, definidas en el diseño experimental.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F-Valor	Pr>F	Sign.
Modelo	23	85302836,6	3708819	3,67	<0,0001	**
Bloque	3	1348430,05	449476,68	0,44	0,7221	n.s
Altitud	3	45344833,03	15114944,34	14,94	<0,0001	**
Bloque*Altitud	5	25177744,23	5035548,85	4,98	0,0006	**
Tratamiento	3	9831266,79	3277088,93	3,24	0,027	*
Tratamiento*Altitud	9	3600562,46	400062,5	0,4	0,9335	n.s
Error	72	72845481,2	1011742,8	–	–	–
Total	95	158148317,8	–	–	–	–

En cuanto a la interacción entre los municipios que corresponden a los bloques y a la altitud se tiene que, los promedios que presentaron diferencias estadísticas, son los que superaron a la media general, más una vez ($\mu + \sigma$) o dos veces ($\mu + 2\sigma$), su correspondiente error estándar. Por su parte, solo presentaron diferencia significativa los sistemas establecidos en altitud del rango alto, sobre los 1900 m.s.n.m, en el municipio de La Unión, con un promedio de 4,866,96 g CO₂eq (Tabla 9).

La cantidad de carbono almacenado en sistemas agroforestales se ve influenciado por factores físicos (nutrientes de suelos, drenaje, luminosidad, precipitación, temperatura, entre otros) y por factores biológicos; en tanto mayor biomasa exista en el sistema, el almacenamiento de carbono también se incrementará (Cabrera *et al.*, 2016). Vásquez *et al.* (2012), respecto de la evaluación del potencial de captura de carbono en la biomasa de *Inga junicuil*, en sistemas agroforestales, encontró que el contenido de carbono está relacionado con las variables fisiográficas pendiente y altitud del sitio, siendo las zonas con pendientes menores al 40% y de mayor altitud, las que resultan más potenciales, en cuanto al almacenamiento y al contenido de carbono.

Tabla 9.

Comparación de medias del contenido de carbono, entre la interacción de municipio y altitud evaluados.

Bloque (municipio)	Altitud	Promedio g CO ₂ eq	Sign.
Sandoná	Alto	3.737,82	Ns
Sandoná	Medio	2.382,66	Ns
Sandoná	Bajo	2.754,69	Ns
Consacá	Alto	3.547,72	Ns
Consacá	Medio	2.783,41	Ns
Consacá	Bajo	2.451,13	Ns
La Florida	Alto	3.369,36	Ns
La Florida	Medio	2.926,07	Ns
La Florida	Bajo	2.155,91	Ns
La Unión	Alto	4.866,96	**
La Unión	Medio	1.284,12	Ns
La Unión	Bajo	3.287,96	Ns
	μ	2.962,32	
	Σ	903,72	
	$\mu + \sigma$	3.866,04	
	$\mu + 2\sigma$	4.769,76	

Nota: μ = media general; σ = desviación estándar; * =diferencias significativas; ** =diferencias altamente significativas.

Respecto de la comparación de medias del contenido de carbono, obtenidas a partir de los tratamientos, se indica que entre los tratamientos dos, tres y cuatro, no hay diferencia significativa y se obtuvieron los mayores promedios (Tabla 10). Resultados similares fueron obtenidos por Díaz *et al.* (2016), quienes encontraron que el contenido de carbono, en cuatro sistemas disímiles de uso de tierra, presentaron diferencias altamente significativas; sus comparaciones de medias también indicaron que, los bosques primario y secundario, tuvieron los mayores promedios (300,27 y 275,73 tC ha⁻¹, respectivamente), superando a los demás sistemas de uso de tierra a libre exposición, como el cafeto, el cacao y el pijuayo, los que obtuvieron promedios de carbono de 2,35; 11,92 y 13,90 tC ha⁻¹, respetivamente.

No obstante, Hernández *et al.* (2018) afirman que las tasas de fijación, para las variedades de café Castillo y Caturra, con edades de 8 años, se encuentran entre 45,7 y 61 toneladas por hectárea, con densidades de siembra de 5.000 plantas/ha. Adicionalmente, Vásquez *et al.* (2012) determinaron que, en general, al evaluar arboles de *Inga* sp., mediante relaciones alométricas en ejemplares de alrededor de 5 a 80 cm de diámetro basal, y de 1 a 27 m de altura, se tienen capturas de carbono de 64,3 Mg C/ha. Esto refleja que los sistemas de producción de café, en asocio con especies arbóreas, podrían llegar a convertirse en proyectos de pago por servicios ambientales, generando ingresos extra a los caficultores y contribuyendo a mitigar el cambio climático (Vásquez *et al.*, 2012) (Díaz *et al.*, 2016) (Hernández *et al.*, 2018).

Tabla 10.

Comparación de medias del contenido de carbono, entre los cuatro tratamientos evaluados ($p < 0,05$).

Tratamiento	Componentes	Distancia siembra (m)	Media	Grupo
T1	Café sin sombrío	Café: 1,3 x 1,3	2.587,10	B
T2	Café con sombrío más limón y aguacate	Café: 1,3 x 1,3 Limón: 8 x 16 Aguacate: 8 x 16	2.702,90	B A
T3	Café con sombrío de guamo	Café: 1,3 x 1,3 Guamo: 9 x 9	3.272,20	A
T4	Café con sombrío de carbonero	Café: 1,3 x 1,3 Carbonero: 12 x 12	3.287,10	A

CONCLUSIONES

Los sistemas agroforestales de guamo y carbonero (9 x 9), ubicados en los municipios de Sandoná, La Florida y La Unión, resultan ser más eficientes, al afrontar el cambio climático en términos de fijación de CO₂eq, respecto del sistema de guamos y carbonero (12 x 12), localizado en el municipio de Consacá. No obstante, los sistemas de café, en asocio con especies arbóreas, tienen mayor capacidad de eliminar carbono, respecto del café que se encuentra a libre exposición, constituyéndose este como uno de los mayores reservorios de CO₂, el que, a su vez, se considera como uno de los principales gases responsables del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Gobernación de Nariño por la financiación del proyecto, a través de los recursos que fueron destinados para este, desde el Fondo Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de

Regalías (SGR) del departamento. También, al Departamento Académico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Ministerio de CTeI y a la Universidad de Nariño, por la ejecución y la administración. Igualmente, agradecemos a los investigadores y a los docentes que integran el Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, E., Saldarriaga, J., Duque, A., Cabrera, K., Yepes, A., Navarrete., D. & Phillips, J. (2011). Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Arias, J., Riaño, N. y Aristizábal, M. (2013). Balance de energía basado en la contabilidad del carbono en tres sistemas productivos cafeteros. *Cenicafe*, 64 (2), 7-16.

Cabrera, M., Vaca, S., Aguirre, F. y Aguirre, H. (2016). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros en las provincias de Jaén y San Ignacio, Cajamarca. *Pakanuros*, 4(1), 43-54.

Canal, D. y Andrade, H. (2019). Sinergias mitigación - adaptación al cambio climático en sistemas de producción de café (*Coffea arabica*), de Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(1), 36-46.

De Beenhouwer, M., Geeraert, L., Mertens, J., Maarten, Van., Aerts, R., Vanderhaegen, K. y Honnay, O. (2016). Biodiversity and carbon storage co-benefits of coffee agroforestry across a gradient of increasing management intensity in the SW Ethiopian highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 222, 193-199.

Díaz, P., Fachin, G., Tello, Ch. y Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1(2), 57-67.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. FAO.

Fernández, M. (2013). El Sector del Café y el cambio climático. Centro de Comercio Internacional. <https://www.intracen.org/guia-del-cafe/el-cambio-climatico/El-Sector-del-Cafe-y-el-cambio-climatico/>

Gómez, L., Cabellero, A. y Baldión, J. (1991). Ecotopos cafeteros. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, CENICAFE – Agroclimatología, División de Desarrollo Social..

Hergoualch, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., & Harmand, J. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 102-110.

Hernández, J., Riaño, N., Riaño, A., Ariza, W., Posada, H., Valenzuela, J., Vega, M., Murgueitio, Y. y Castro J. (2018). Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco de cuatro municipios del sur del departamento del Huila (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9 (2), 109-120.

SAS Institute Inc., S. I. (2009). SAS 9.2 Macro Language: Reference. Cary, NC [Paquete estadístico]. SAS Institute Inc.

Jiménez, A., Guerrero, A., García, E. y Carrillo, E. (2019). Producción de biomasa total, rendimiento y composición de la semilla de *Jatropha curcas* L. con diferentes dosis de fertilización. *Interciencia*, 44, (9), 529-534.

Matta, Y. (2017). Exportaciones de Colombia. *Expresiones*, Revista Estudiantil de Investigación, 4 (8), 74 .

Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H. y Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2, (2), 121-133.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R. , Buendia, L. , Miwa, K. , Ngara, T. , Tanabe, K. & Wagner, F. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Prefecture: Institute for Global Environmental Strategies.

Puerta, G., González, F., Correa, A., Álvarez, I., Ardila, J., Girón, O., Ramírez, C., Baute, J., Sánchez, P., Santamaria, M. y Montoya, D. (2016). Diagnóstico de la calidad del café según altitud, suelos y beneficio en varias regiones de Colombia. *Cenicafé* 67 (2), 15-51.

Quilio, A., Castellanos, E. & Pons, D. (2010). Estudio de línea base de carbono en cafetales. Universidad del Valle de Guatemala UVG..

Segura M. & Andrade, H. (2008). Cómo Construir Modelos Alométricos de Volumen, Biomasa o Carbono de Especies Leñosas Perennes. *Rev. Agroforesteria en las Américas (CATIE)*, 46, 89-96. <http://hdl.handle.net/11554/6935>

Sistema de Información sobre la Biodiversidad en Colombia. (2020) Biodiversidad en cifras. SIB.. <https://sibcolombia.net/biodiversidad-en-cifras-2020/>.

Vásquez, E., Campos, G., Enríque, J., Rodríguez, G. y Velasco, V. (2012). Captura de carbono por Inga jinicuil Schltdl: en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3, (9), 11-21.