

Huella de carbono generada por la producción de grano de cacao (*Theobroma cacao*) en la asociación cacaotera Asoprocavip en Villagarzón, Putumayo.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa: Ingeniería Ambiental

Jesús Sidarta Rosero Cortez

Jhony Ivan Burgos Guerrero

Asesora:

Erika Sierra Ramírez

Institución Universitaria del Putumayo

Mocoa, Putumayo

2026

Agradecimientos

A Dios, por brindarnos salud, fortaleza y sabiduría a lo largo de este proceso de formación profesional y durante el desarrollo de la presente investigación.

A nuestros padres y familias, por su amor incondicional, apoyo económico, paciencia y palabras de aliento en cada etapa de este camino, siendo el pilar fundamental para alcanzar esta meta académica.

A la Bióloga Erika Sierra Ramírez, asesora de este proyecto, por su valiosa orientación técnica, su dedicación, sus enseñanzas y su compromiso.

A la Institución Universitaria del Putumayo (UniPutumayo), en especial a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas y al Programa de Ingeniería Ambiental, por brindarnos las herramientas académicas, los espacios de aprendizaje y el acompañamiento necesario para formar profesionales íntegros y comprometidos con el desarrollo sostenible de la región del Putumayo.

A la asociación cacaotera Asoprocavip de Villagarzón, Putumayo especialmente a sus productores asociados, por abrirnos las puertas de sus fincas, compartir sus conocimientos y experiencias, y colaborar activamente en la recolección de datos. Sin su disposición y confianza, este estudio no habría sido posible.

Finalmente, agradecemos a todos aquellos compañeros, amigos y docentes que, de una u otra manera, contribuyeron con sus comentarios, sugerencias y apoyo moral durante la ejecución de este proyecto de grado.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas, sacrificios y apoyo constante a lo largo de mi vida, siendo el motor que me impulsó a alcanzar esta meta.

A mi familia, quienes siempre creyeron en mis capacidades y me brindaron su respaldo en los momentos más difíciles de este proceso.

Finalmente, dedico este logro a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional, acompañándome durante el desarrollo de esta investigación.

Contenido

Introducción	9
Planteamiento del problema.....	11
Justificación	14
Objetivos.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
Marco Referencial.....	17
Marco Teórico.....	17
Marco conceptual.....	19
Marco contextual	20
Marco Legal	24
Metodología	27
Enfoque de la investigación	27
Resultados	38
Discusión.....	43
Recomendaciones	48
Conclusiones	51
Referencias.....	53
Anexos	64

Resumen

El cambio climático, impulsado por el incremento de gases de efecto invernadero (GEI), representa uno de los mayores desafíos ambientales globales. El sector agropecuario contribuye significativamente a estas emisiones, pero también ofrece oportunidades de mitigación mediante sistemas productivos sostenibles. En Colombia, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) bajo arreglos agroforestales se ha consolidado como una alternativa para la sustitución de cultivos ilícitos, la restauración de paisajes y la generación de ingresos rurales. No obstante, en regiones como Putumayo existe información limitada sobre la huella de carbono asociada a esta actividad. La presente investigación tuvo como objetivo determinar la huella de carbono durante la producción de grano de cacao en la Asociación de Productores de Cacao de Villagarzón Putumayo (AsoprocaVIP). Se utilizó un enfoque cuantitativo, descriptivo y comparativo, aplicando la metodología Tier 1 del IPCC y los lineamientos de la norma ISO 14067. Se seleccionó una muestra representativa de 40 productores (20 con manejo orgánico y 20 con manejo convencional) del total de 177 asociados. Se estimaron las emisiones de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) provenientes de actividades de manejo, fertilización, transporte, consumo eléctrico y generación de residuos, así como la fijación de carbono en biomasa aérea y subterránea mediante modelos alométricos. Los resultados mostraron que las emisiones promedio por área fueron de 525 ± 441 kg CO₂e/ha/año, con las actividades de manejo como principal fuente (≈ 66.000 kg CO₂e totales). La tasa de fijación de carbono alcanzó $8,47 \pm 5,40$ t CO₂e/ha/año, equivalente a 2,3 t C/ha/año, sin diferencias significativas entre sistemas orgánicos (8,00) y convencionales (8,95). La huella de carbono neta resultó negativa ($-7,95 \pm 5,37$ t CO₂e/ha/año), indicando que los sistemas actúan como sumideros netos. Sin embargo, la huella por kilogramo de cacao fue de $6,70 \pm 9,52$ kg CO₂e/kg, valor superior a la mediana global (1,55 kg CO₂e/kg).

Los sistemas convencionales presentaron mayores emisiones acumuladas que los orgánicos, aunque con menor huella por producto debido a su mayor productividad. Se concluye que los sistemas agroforestales de cacao en Villagarzón contribuyen a la mitigación climática al secuestrar más carbono del que emiten, pero se requieren estrategias para reducir la huella por kilogramo, como optimización del manejo, mejora logística, eficiencia energética y certificación en mercados de carbono. Este estudio aporta la primera línea base cuantitativa de huella de carbono para la cacaocultura en Villa garzon Putumayo , apoyando el cumplimiento de las metas nacionales e internacionales de reducción de GEI.

Palabras clave: Cambio climático, cacao, huella de carbono, Putumayo.

Abstract

Climate change, driven by the increase in greenhouse gas (GHG) emissions, represents one of the greatest global environmental challenges. The agricultural sector significantly contributes to these emissions but also offers mitigation opportunities through sustainable production systems. In Colombia, cocoa (*Theobroma cacao*) cultivation under agroforestry arrangements has consolidated as an alternative for replacing illicit crops, restoring landscapes, and generating rural income. However, in regions such as Putumayo, there is limited information on the carbon footprint associated with this activity. This research aimed to determine the carbon footprint during cocoa bean production in the Association of Cocoa Producers of Villagarzón Putumayo (Asoprocavip). A quantitative, descriptive, and comparative approach was used, applying the IPCC Tier 1 methodology and the guidelines of ISO 14067. A representative sample of 46 producers (23 with organic management and 23 with conventional management) was selected from a total of 177 members. GHG emissions (CO_2 , CH_4 , and N_2O) from management activities, fertilization, transportation, electricity consumption, and waste generation were estimated, as well as carbon sequestration in aboveground and belowground biomass using allometric models. Results showed that average emissions per area were $525 \pm 441 \text{ kg CO}_2\text{e/ha/year}$, with management activities as the main source ($\approx 66,000 \text{ kg CO}_2\text{e}$ total). The carbon sequestration rate reached $8.47 \pm 5.40 \text{ t CO}_2\text{e/ha/year}$, equivalent to 2.3 t C/ha/year , with no significant differences between organic (8.00) and conventional (8.95) systems. The net carbon footprint was negative ($-7.95 \pm 5.37 \text{ t CO}_2\text{e/ha/year}$), indicating that the systems act as net sinks. However, the carbon footprint per kilogram of cocoa was $6.70 \pm 9.52 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$, higher than the global median ($1.55 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$), associated with low yields and high variability among producers. Conventional systems showed higher accumulated emissions than organic

ones, but with a lower product footprint due to their higher productivity. It is concluded that cocoa agroforestry systems in Villagarzón contribute to climate mitigation by sequestering more carbon than they emit, but strategies are required to reduce the per-kilogram footprint, such as management optimization, logistic improvement, energy efficiency, and carbon market certification. This study provides the first quantitative baseline of carbon footprint for cocoa farming in Putumayo, supporting the achievement of national and international GHG reduction targets.

Keywords: Climate change, cocoa, carbon footprint, Putumayo.

Introducción

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI debido al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2023), la influencia humana ha sido inequívocamente responsable del calentamiento global observado desde la era preindustrial, alcanzando aproximadamente 1,1 °C por encima de los niveles históricos y generando alteraciones significativas en los sistemas climáticos a nivel mundial. La agricultura desempeña un papel dual frente al cambio climático. Por una parte, contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero mediante actividades como el uso de fertilizantes, el consumo de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo; por otra, posee la capacidad de capturar y almacenar carbono en la biomasa vegetal y en los suelos. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que los sistemas agrícolas pueden contribuir a la mitigación del cambio climático mediante prácticas que favorezcan el secuestro de carbono y reduzcan las emisiones asociadas a la producción agropecuaria (FAO, 2024). Dentro de estos sistemas productivos, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) representa una alternativa de gran importancia ambiental debido a que frecuentemente se establece bajo arreglos agroforestales, los cuales favorecen el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, la biomasa subterránea y el suelo. Estos sistemas han sido reconocidos por su potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático, al tiempo que generan beneficios económicos y sociales para las comunidades rurales (FAO, 2024). En Colombia, el cacao constituye uno de los cultivos permanentes más relevantes para el desarrollo rural. Según la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao, 2025), durante el año 2024 el país alcanzó una producción histórica

superior a las 73.000 t de cacao, beneficiando a más de 65.000 familias productoras distribuidas en diferentes regiones del territorio nacional. Este crecimiento refleja la importancia económica del sector y la necesidad de promover sistemas productivos cada vez más sostenibles desde el punto de vista ambiental. El departamento del Putumayo se ha consolidado como una región con alto potencial para la producción de cacao, gracias a sus condiciones climáticas y a la implementación de sistemas agroforestales que contribuyen a la conservación de la biodiversidad y al almacenamiento de carbono. En este departamento se han desarrollado investigaciones relacionadas con sistemas agroforestales de cacao y almacenamiento de carbono; sin embargo, se evidencia una limitada información sobre la cuantificación de la huella de carbono asociada a la producción de cacao a nivel de finca. Esta situación dificulta la evaluación del desempeño ambiental de los sistemas productivos y la formulación de estrategias orientadas a la mitigación del cambio climático (Solarte Soto, 2025).

La huella de carbono constituye una herramienta ampliamente utilizada para cuantificar el balance entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por una actividad y la capacidad de captura o remoción de carbono asociada a la misma. Su estimación permite identificar las principales fuentes de emisión y establecer estrategias orientadas a reducir el impacto ambiental de los sistemas productivos (FAO, 2024). En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo determinar la huella de carbono durante la producción de grano de cacao (*Theobroma cacao*) en la Asociación de Productores de Cacao de Villagarzón Putumayo (Asoprocaavid). Para ello, se estimó la cantidad de carbono retenida en la biomasa aérea y subterránea de los sistemas productivos, se cuantificaron las emisiones de CO₂ equivalente generadas durante la producción del cultivo y se propusieron estrategias orientadas a la neutralización de la huella de carbono en los cacaotales evaluados.

Planteamiento del problema

La temperatura media de la Tierra es ahora 1,1 °C más elevada que a finales del siglo XIX, antes de la revolución industrial, y más elevada en términos absolutos que en los últimos 100.000 años (United Nations, 2025). Esto en gran parte se debe al incremento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2001; 2023). En el 2023, las cifras de las emisiones provenientes de fuentes humanas mostraron que las emisiones globales de GEI alcanzaron 57,1 Gt CO₂e. La generación de energía fue el principal sector emisor con una participación del 26 %, seguida por el transporte (15 %), la agricultura (11 %), la industria (11 %), la producción de combustibles (10 %), los procesos industriales (9 %), el uso de la tierra y la silvicultura (7 %), las edificaciones (6 %) y los residuos y otros sectores (4 %) (UNEP, 2024).

Este aumento de las temperaturas ha generado un cambio climático a nivel mundial, el cual ha causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todo el mundo. En particular, este afecta de forma negativa la producción agropecuaria y los medios de vida de agricultores, silvicultores y pescadores (FAO, 2016). Además, este sector ha tenido que intensificar su producción debido al aumento de la demanda mundial de alimentos provocada por el crecimiento poblacional y los hábitos nutricionales modernos (Litskas et al., 2020).

En Colombia, de acuerdo con el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales [IDEAM] et al. (2024), las actividades de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra producen el 58,56% del total de emisiones que genera el país. Esto se debe principalmente a la deforestación y degradación de bosques para la expansión agrícola y ganadera. Junto con el uso de fuego, maquinaria con combustibles fósiles y fertilizantes nitrogenados, estas actividades generan un alto impacto en la emisión de GEI. Esto contribuye significativamente al

calentamiento global, especialmente por el metano y el óxido nitroso, que intensifican el efecto invernadero más que otros sectores. Por esta razón, es importante analizar el sector agrícola ya que podría disminuir el crecimiento total de las emisiones de GEI (Agencia UNAL, 2019; UNEP, 2021).

Analizando el sector agrícola en el departamento del Putumayo; el cual aportó para 2018 el 2.26% del total de GEI del país, quedando en un decimoquinto puesto (Fundación Barranquilla Sostenible +20, 2021); las emisiones en su mayoría están asociadas a la pérdida del bosque natural que se convierte a pastizales y a otras tierras forestales (67%) (IDEAM et.al, 2016). A esto se le suma la problemática que sufre el departamento con respecto a los cultivos ilícitos con hoja de coca, los cuales, según CORPOAMAZONIA et al. (2020), en el 2020 fueron los principales responsables de las emisiones aportadas por cambio de bosques a actividades agrícolas y pecuarias en el departamento (35,1%), seguido de cultivos de Maíz (24,3%), Pasturas (17,4%), Otras actividades no diferenciadas (12,4) y Cultivos de yuca- yota- arroz (10,8%).

Frente a esta problemática, Colombia, dentro de las diferentes alternativas diseñadas y ejecutadas para encontrar una opción sustentable a los cultivos de uso ilícito, ha promovido el cultivo de cacao como una estrategia de desarrollo rural y de construcción de paz, así mismo, este cultivo se identifica como una alternativa productiva a los procesos de deforestación o como opción rentable para la restauración de paisajes (Charry et al, 2019). Sin embargo, no existe información que cuantifique el aporte de GEI en la producción de cacao en el Putumayo. En este contexto, es necesario conocer de qué manera los productores de cacao de la región impactan en la salud del ambiente y el cambio climático a través de la generación de CO₂, lo que se conoce como huella de carbono (HC), la cual mediante su estimación permite mejoras en la sustentabilidad de la producción (Litskas et al., 2020), corrección de las ineficiencias de los

procesos productivos y generación de un valor agregado que permitirá al productor de cacao competir en nuevos mercados (Frohman y Olmos, 2013; Ordoñez, 2012; Pandey et al., 2010).

Pregunta de Investigación

¿Cuál es la huella de carbono generada durante la producción de grano de cacao (*Theobroma cacao*) en la asociación cacaotera Asoprocavip en Villagarzón, Putumayo?

Justificación

La estimación de la huella de carbono (HC) surge ante la necesidad de evaluar el impacto ambiental de las actividades agropecuarias, debido al deterioro de la calidad ambiental, la pérdida de servicios ecosistémicos y la amenaza a la seguridad alimentaria de las generaciones presentes y futuras (FAO, 2019; Litskas et al., 2020). En Colombia, las emisiones nacionales de GEI han presentado una tendencia creciente durante las últimas décadas. El inventario actualizado para el período 1990–2021 muestra que las actividades humanas continúan generando un aumento de las emisiones, principalmente por los sectores de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) y Energía, que en conjunto representan cerca del 88 % de las emisiones nacionales (UPME, 2026). Esta situación se agrava por la baja capacidad de adaptación y gobernanza frente al cambio climático (Basher, 2006; Wiebe et al., 2019)

El Putumayo se ubica en el puesto 8 entre los departamentos más vulnerables, con municipios altamente sensibles y de baja capacidad adaptativa. Villagarzón, en particular, presenta una amenaza muy alta ante el cambio climático (ASOREDESOCIAL, 2020). Frente a ello, el cultivo de cacao se ha promovido como alternativa sostenible frente a la deforestación y a los cultivos ilícitos, al integrarse en sistemas agroforestales que restauran suelos degradados y contribuyen a la conservación de servicios ecosistémicos (Charry et al., 2019; Suárez et al., 2021).

No obstante, en la región no existe información sobre la HC asociada a la producción de cacao, lo cual limita la toma de decisiones ambientales y productivas. La investigación permitirá a productores y asociaciones identificar su grado de afectación, registrar y analizar su HC, aprovechar incentivos de mercados de carbono, mejorar la competitividad y promover el consumo responsable (Zerón y Arias, 2019). Además, contribuirá al cumplimiento

de metas nacionales e internacionales de reducción de emisiones, como el Acuerdo de París y la meta colombiana de reducción del 51% de GEI al 2030 (CMNUCC, 2015; Ramos, 2021).

Objetivos

Objetivo general

Determinar la huella de carbono durante la producción de grano de cacao (*Theobroma cacao*) en la asociación cacaotera Asoprocavip en Villagarzón, Putumayo.

Objetivos específicos

- Estimar la cantidad de carbono retenida en la biomasa arriba y abajo del suelo en los cacaotales pertenecientes a la asociación Asoprocavid, Villagarzón-Putumayo.
- Cuantificar las emisiones de CO₂e generadas en la producción del grano de cacao en la asociación Asoprocavid, Villagarzón-Putumayo.
- Proponer estrategias que permitan neutralizar la huella de carbono en los cacaotales de la asociación Asoprocavid, Villagarzón-Putumayo.

Marco Referencial

Marco Teórico

La HC es un indicador de las emisiones directas e indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), acumuladas durante el ciclo de vida de un proceso, producto o servicio (Bajan y Mrówczyńska-Kamińska, 2020; Plassmann y Edwards-Jones, 2010). La medición de HC es fundamental para evaluar ciertos impactos ambientales de las actividades humanas, lo que indica que el sector agropecuario representa alrededor del 21,3% de las emisiones globales antropogénicas (FAO, 2016b; Lamb et al., 2021; Litskas et al., 2020).

Huella de carbono en la producción agropecuaria y producción de *Theobroma cacao*

La producción agropecuaria, específicamente en cultivos como el cacao (*Theobroma cacao* L.), tiene un impacto significativo en la generación de GEI, siendo una fuente tanto de emisiones como de secuestro de carbono mediante el almacenamiento en biomasa y suelo (Andrade et al., 2014b; Marín, 2016). Estudios realizados en el departamento del Tolima, Colombia, han evidenciado que la huella de carbono del cultivo de cacao puede variar dependiendo del sistema de producción, con resultados que indican balances positivos en monocultivos y sistemas asociados con otras especies (Umaña, 2012; Marín, 2016). Estos estudios demuestran que la incorporación de árboles maderables en sistemas agroforestales incrementa la fijación de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Marín et al., 2016).

Metodologías para la estimación de huella de carbono

La estimación de la huella de carbono en el sector agropecuario sigue directrices internacionales, principalmente las establecidas por el IPCC (2006) y normas como la ISO 14067 (Organización Internacional de Normalización, 2018). Estas metodologías incluyen el cálculo de

emisiones derivadas del consumo de combustibles fósiles, uso de fertilizantes, manejo de residuos agrícolas, y actividades de transporte y procesamiento (Espíndola y Valderrama, 2018; Andrade et al., 2014b). La estimación también considera el almacenamiento y fijación de carbono en biomasa y suelo, utilizando modelos alométricos y métodos de muestreo (Andrade et al., 2014c; Mäkelä y Valentine, 2020).

Importancia de la producción sostenible de cacao en regiones como Putumayo

La producción sostenible de cacao es crucial para la mitigación del cambio climático y para preservar la biodiversidad local. La región de Putumayo, con condiciones climáticas y ecológicas particulares, presenta una oportunidad importante para implementar prácticas agroforestales que reduzcan la huella de carbono de la producción (FAO, 2019b). La adopción de sistemas de producción que integran árboles maderables y prácticas de manejo sostenibles puede mejorar la captura de carbono y reducir las emisiones de GEI asociadas a la producción de cacao (Arias et al., 2018; Canal y Andrade, 2019).

Retos y perspectivas en la gestión de la huella de carbono en la agricultura

Aunque existen avances en la estimación de la huella de carbono en cultivos como el cacao, persisten retos en cuanto a la rigurosidad de los estudios, la aplicación local de metodologías y la implementación de políticas efectivas para la mitigación (IDEAM et al., 2022). En regiones como Villagarzón, Putumayo, es necesario fortalecer el conocimiento técnico, la capacitación de los productores y el apoyo institucional para promover sistemas agropecuarios con baja huella de carbono (Rinaudo, 2019; Osorio, 2019). La articulación de esfuerzos entre academia, productores y gobierno es fundamental para alcanzar metas de sostenibilidad y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

Marco conceptual

Emisiones de carbono: otros gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera como consecuencia de actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, la deforestación y procesos industriales. Estos gases atrapan el calor en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global y al cambio climático (González-Vergel, Carvajal Rodríguez, & Núñez-Rodríguez, 2022).

Absorción de carbono: es el proceso mediante el cual el dióxido de carbono (CO_2) es capturado y almacenado en sumideros naturales o tecnológicos para reducir su concentración en la atmósfera y mitigar el cambio climático. Un ejemplo importante de este proceso es la producción de biochar a partir de residuos agrícolas, que permite la secuestación estable del carbono en el suelo, contribuyendo así a la reducción de gases de efecto invernadero (Karan et al., 2023).

Huella de carbono: se define como la cantidad total de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO_2), que son emitidos directa o indirectamente por actividades humanas a lo largo de un ciclo de vida o proceso específico. Esta medida es fundamental para evaluar el impacto ambiental de productos, servicios o individuos, y para diseñar estrategias de reducción de emisiones (Wiedmann & Minx, 2008).

Gases de efecto invernadero (GEI): Son compuestos atmosféricos que, de forma natural, retienen el calor solar para mantener una temperatura habitable en la Tierra, pero cuyo exceso, provocado por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, intensifica este efecto, provocando el calentamiento global. Los principales GEI son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3) (Guerra García, Osorio Saraz, & Barahona Rosales, 2016).

Sistema Agroforestales: Son modalidades de uso y manejo de la tierra en las que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o animales, buscando beneficios económicos, sociales y ambientales sostenibles" (Nair, 1993).

Theobroma Cacao: Es un árbol de la familia Malvaceae (*Theobroma cacao*). Su nombre fue dado por el botánico Carl Linnaeus en 1753, quien propuso el género. Los árboles de cacao crecen en las selvas tropicales de tierras bajas en latitudes aproximadas de 20°N y 20°S del Ecuador (Bartley, 2005; Motamayor et al., 2008; Umaharan, 2018), con temperaturas entre 18°C y 32°C. La precipitación ideal varía de 1500 mm/año a 2500 mm/año con una humedad óptima cercana al 70%–80% durante el día y al 90%–100% durante la noche (Smith, 2020).

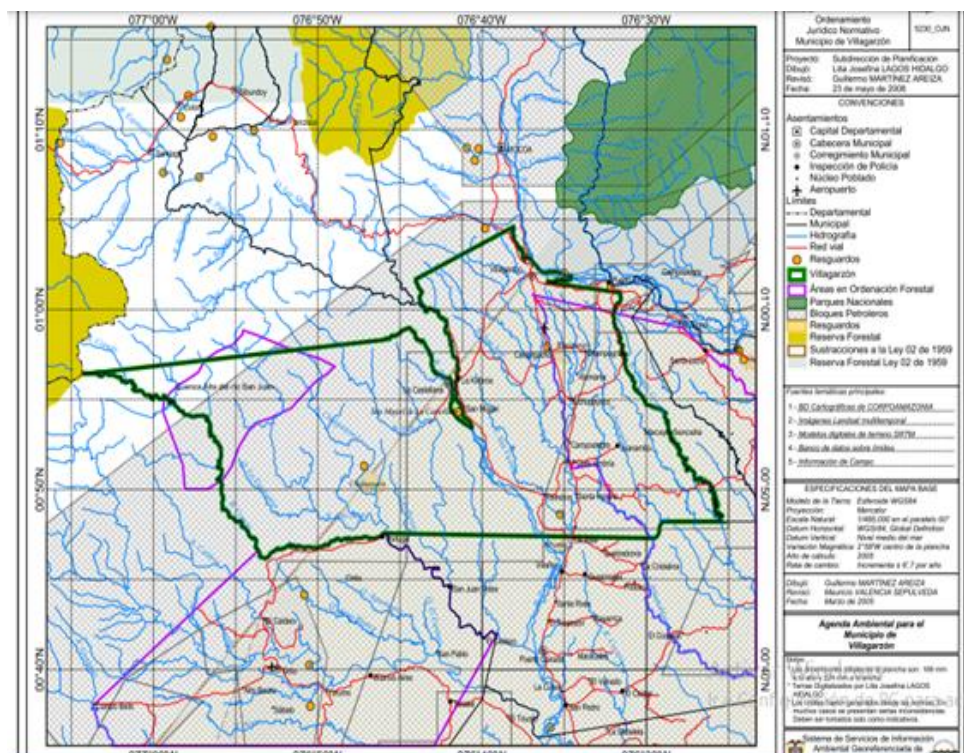
Sostenibilidad: “El desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987).

Marco contextual

El municipio de Villagarzón se encuentra ubicado en el departamento del Putumayo, al suroccidente de Colombia. Esta región hace parte de la Amazonía colombiana, caracterizada por una alta biodiversidad, abundancia hídrica y condiciones climáticas favorables para la producción agrícola. El clima predominante es cálido húmedo, con temperaturas promedio entre 24 °C y 28 °C y una precipitación anual que oscila entre los 3.500 y 4.500 mm, lo cual genera condiciones óptimas para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) bajo sistemas agroforestales (Salazar, 2018).

Figura 1

Ordenamiento jurídico normativo municipio de Villagarzón



Fuente: Corpoamazonia (2022).

Clima: El municipio de Villagarzón tiene el clima oceánico. Temperatura media y precipitación promedio o los períodos cuando cae más lluvia. El promedio de la cifra climática de Villagarzón es de 7,0. Esto se basa en varios factores, como las temperaturas medias, las posibilidades de precipitación y las experiencias climáticas de otros.

Geografía: El territorio del municipio de Villagarzón hace parte de la región del Piedemonte Amazónico, regado por los ríos San Juan, Conejo, San Vicente y Guineo.

La cabecera municipal se encuentra en los 01° de latitud norte 76° 37' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich.

Tabla 1*Descripción física municipio Villagarzón*

<i>Extensión total</i>	<i>139.224,7 Km2</i>
Extensión área urbana	152,8 Km2
Extensión área rural	137696,7 Km2
Altitud de la cabecera municipal	426 m.s.n.m
Área de bosques	820,12 Km2
Temperatura media	25°C

En el Putumayo, la producción agrícola ha estado históricamente marcada por la presencia de cultivos ilícitos de coca, los cuales han generado impactos negativos en la cobertura boscosa y en la sostenibilidad ambiental del territorio (Corpoamazonia, PNUD & Gobernación del Putumayo, 2020). Frente a esta problemática, el cacao se ha consolidado como una alternativa productiva lícita, promovida por el Estado y organismos de cooperación internacional, tanto para sustituir cultivos ilícitos como para impulsar procesos de desarrollo rural sostenible y construcción de paz (Charry, 2019).

En este contexto, la Asociación Cacaotera Asoprocavip, con sede en Villagarzón, desempeña un papel clave en la consolidación de la cadena productiva del cacao en el Putumayo. Hasta el 30 de mayo de 2025, la asociación cuenta con 177 productores vinculados, de los cuales 47 trabajan bajo esquemas de producción orgánica. Los asociados realizan el transporte del grano seco desde sus fincas hasta la Casa Campesina, ubicada en la zona urbana del municipio de Villagarzón, donde se lleva a cabo el acopio, comercialización y fortalecimiento de la cadena de valor. La medición de la huella de carbono en este grupo de productores resulta de gran relevancia, pues permitirá:

- Identificar las diferencias en emisiones y capturas de carbono entre cultivos orgánicos y convencionales.
- Optimizar los procesos productivos y de transporte para reducir emisiones asociadas al traslado del grano desde las fincas hasta el centro de acopio.
- Consolidar un modelo de cacao sostenible en la región amazónica, con potencial de certificación y acceso a mercados verdes.

Adicionalmente, Villagarzón se encuentra clasificado con una muy alta amenaza por cambio climático, según el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial (PIGCCT) del Putumayo. Esto hace aún más relevante implementar prácticas agrícolas resilientes y bajas en carbono, donde el cacao bajo sistemas agroforestales representa una estrategia clave para la mitigación de emisiones y la conservación de los servicios ecosistémicos (Corpoamazonia, Gobernación del Putumayo & PNUD, 2020).

De esta manera, el proyecto no solo busca cuantificar la huella de carbono de la producción de cacao en Asoprocavip, sino también generar información útil para los productores, instituciones y entidades ambientales, aportando a la sostenibilidad regional y al cumplimiento de las metas nacionales de reducción del 51 % de las emisiones de GEI al 2030 (Ramos, 2021) y a los compromisos internacionales del Acuerdo de París (CMNUCC, 2015).

Marco Legal

NORMATIVIDAD	CONCEPTO
Constitución Política de Colombia (1991)	Reconoce el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano (art. 79) y establece la obligación del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente, planificando el aprovechamiento de los recursos naturales para un desarrollo sostenible (art. 80), (Constitución Política de Colombia, 1991).
Ley 1931 de 2018 Ley 1931 de 2018	Regula la gestión del cambio climático en el país, promueve la adaptación de los territorios y fomenta la reducción de emisiones de GEI en los sectores productivos, incluida la agricultura (Ley 1931, 2018).
Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022)	Incluye lineamientos para la producción sostenible, la implementación de sistemas agroforestales y la transición hacia una economía baja en carbono, fomentando prácticas agrícolas amigables con el ambiente (Ley 1955, 2019).
Decreto 1299 de 2008	Reglamenta el sistema de gestión ambiental en las empresas del sector privado, promoviendo la implementación de prácticas de producción más limpias y sostenibles (Decreto 1299, 2008).

Resolución 1447 de 2018	Establece el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de GEI (RENARE), en el cual se inscriben los proyectos de mitigación, como los relacionados con la reducción de la huella de carbono en sistemas productivos (Resolución 1447, 2018).
Política Nacional de Cambio Climático (PNCC, 2017)	Define los lineamientos para articular a los sectores productivos y a los territorios en la gestión del cambio climático, promoviendo sistemas agropecuarios resilientes y de bajas emisiones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).
Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Putumayo 2020–2049 (PIGCCT)	Orienta las estrategias departamentales frente al cambio climático, con énfasis en la reducción de emisiones provenientes de la agricultura y en la promoción de cultivos sostenibles como el cacao bajo sistemas agroforestales (Corpoamazonia, Gobernación del Putumayo & PNUD, 2020).
Norma Técnica ISO 14067:2018	Establece requisitos y directrices para la cuantificación de la huella de carbono de productos, incluyendo bienes agrícolas como el cacao, lo cual permite medir y reducir las emisiones a lo largo de su ciclo productivo (ISO, 2018).

Acuerdo de París (2015)	Tratado internacional que compromete a los países firmantes a limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C, preferiblemente a 1,5 °C, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y bajas en carbono (CMNUCC, 2015).

Metodología

Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamentó en la recolección, medición y análisis de datos numéricos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el almacenamiento de carbono en los sistemas de producción de cacao de los productores pertenecientes a la asociación cacaotera Asoprocavip en Villagarzón, Putumayo (ASOPROCAVIP). Este enfoque permitió cuantificar las emisiones generadas por diferentes fuentes asociadas al proceso productivo, tales como fertilización, consumo de combustibles fósiles, energía eléctrica, generación de residuos y cambio de uso del suelo, así como estimar la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa vegetal.

Tipo y diseño de investigación

La investigación corresponde a un estudio de tipo descriptivo y comparativo. Fue descriptiva porque permitió identificar, caracterizar y cuantificar las principales fuentes de emisión de GEI y los sumideros de carbono presentes en los sistemas productivos de cacao evaluados. Asimismo, fue comparativa debido a que se analizaron las diferencias en la huella de carbono entre productores con manejo convencional y productores con manejo orgánico, así como entre las distintas tipologías de sistemas agroforestales de cacao presentes en la zona de estudio.

Límites del inventario de emisiones

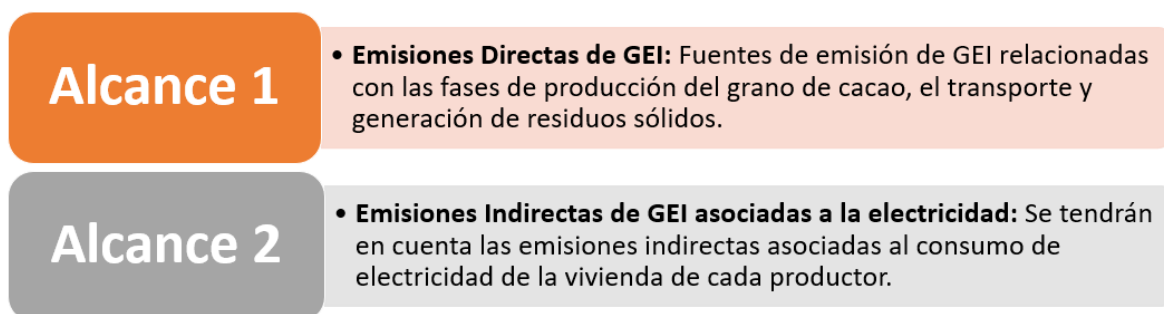
Alcance

El alcance de este estudio está delimitado por las fuentes de emisión de GEI, tanto directas como indirectas, asociadas a las fases de producción del grano de cacao, la generación de residuos sólidos y el consumo de energía eléctrica. Estas fuentes se clasificaron dentro de los alcances 1 y 2 según el protocolo GHG y se utilizaron para estimar las emisiones de CO₂e

anuales acumuladas en el ciclo de producción del grano de cacao de cada productor muestreado de Asoprocavid.

Figura 2

Alcance del estudio

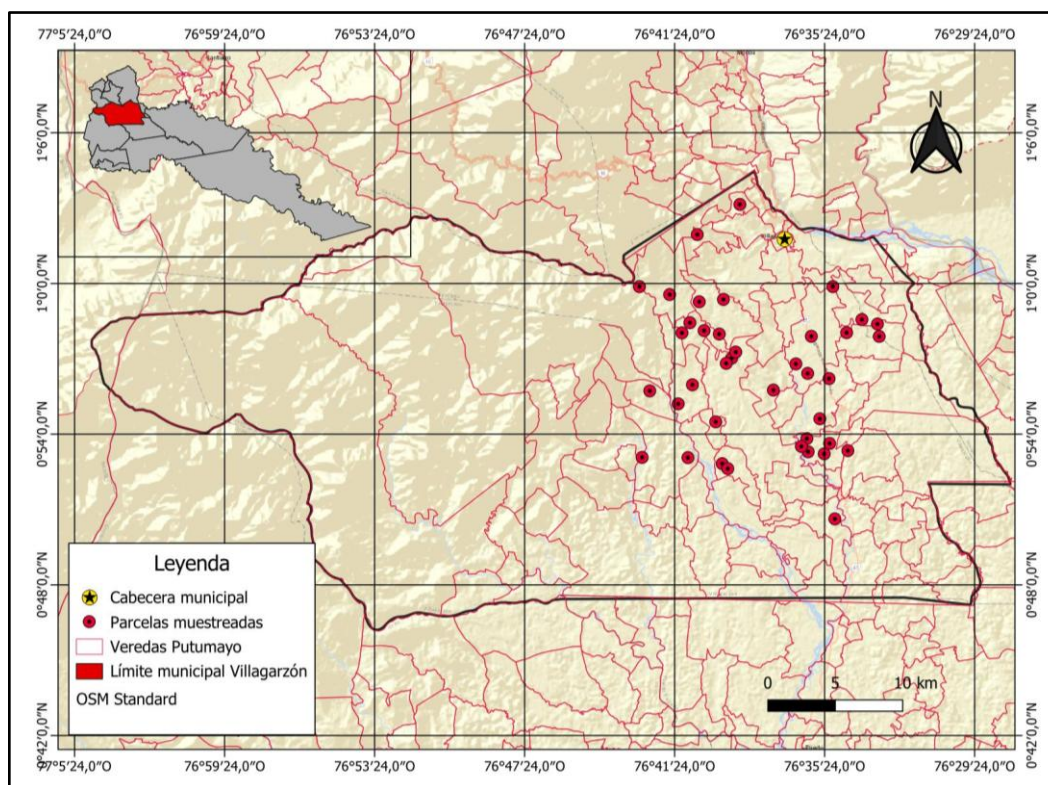


Fuente: Propia

Límite geográfico

Este estudio se llevó a cabo en el municipio de Villagarzón, departamento del Putumayo, donde la Asociación de Productores de Cacao de Villagarzón (ASOPROCAVIP) cuenta con sus oficinas administrativas y su principal punto de compra, acopio y comercialización de cacao. La selección de esta área de estudio respondió a la importancia que tiene la producción cacaotera dentro de la economía local y al papel que desempeña la asociación en el fortalecimiento de la cadena productiva del cacao en la región.

La ubicación de las instalaciones de ASOPROCAVIP facilitó el acceso a los productores asociados, permitiendo la recopilación de información primaria relacionada con las prácticas de manejo agronómico, el uso de insumos agrícolas, la productividad de los cultivos y otros datos necesarios para la estimación de la huella de carbono. Asimismo, la cercanía geográfica entre los productores y el centro de acopio favoreció la realización de visitas de campo, entrevistas y actividades de verificación de la información suministrada.

Figura 3*Mapa municipio de Villagarzón***Nota:** Fuente propia.**Identificación de GEI y fuentes de emisión**

Este estudio identificó y cuantificó solo 3 GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) en cada fuente de emisión, si la fuente lo amerita. Cada fuente emite mínimo el gas de CO_2 . Los valores del potencial de calentamiento global (PCG) que se utilizaron en esta investigación se muestran a continuación.

Tabla 2
Valores del PCG en relación con el CO₂

Nombre común	Fórmula química	Potencial de calentamiento (horizonte de 100 años)
<i>Dióxido de carbono</i>	<i>CO₂</i>	<i>1</i>
<i>Metano</i>	<i>CH₄</i>	<i>28</i>
<i>Óxido de Nitrógeno</i>	<i>N₂O</i>	<i>265</i>

Fuente: IPCC (2016).

Tabla 3
Fuentes de emisión cubiertas por el estudio

	Proceso	Fuente de emisión
<i>Fases de producción</i>	Siembra	Cambio de uso del suelo
	Fertilización	Fertilización en siembra
		Fertilización en etapa de crecimiento vegetativo
		Fertilización de mantenimiento
	Riego	Suministro de energía para el sistema de riego
	Fermentación	Tala de madera para construcción de cajones

		Fermentación del grano de cacao
	Secado	Secado motorizado
Procesos colaterale s	Quema de combustibles fósiles	Control motorizado de malezas
		Poda con maquinaria motorizada
		Fertilización con maquinaria motorizada
		Transporte de insumos agrícolas
		Transporte de empleados
		Control de plagas con maquinaria motorizada
		Secado con maquinaria motorizada
	Generación de Residuos sólidos	Descomposición de residuos orgánicos
		Descomposición de residuos inorgánicos
	Consumo de Energía Eléctrica	Consumo de energía eléctrica por vivienda
		Consumo de energía eléctrica por secado mecánico

Fuente: *Propia*

Factores de emisión seleccionados**Tabla 4***Factores de emisión seleccionados*

Fuente de emisión	Factor			Unidad	Referencia
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Fertilización Nitrogenada	NA	NA	0.01	kg N ₂ O/kg N	IPCC (2006)
Fermentación	0.00007	NA	NA	tCO ₂ e/kg	Gutierrez-Zapata (2023)
Residuos Inorgánicos incinerados	0.4808	NA	NA	tCO ₂ e/t	Gutierrez-Zapata (2023)
Residuos de cosecha compostados	0.1915	NA	NA	tCO ₂ e/t	Gutierrez-Zapata (2023)
Quema de residuos agrícolas en el campo	1515 (+/- 177)	NA	NA	g/kg de materia seca quemada	IPCC (2006)
Consumo de energía eléctrica	0.177	NA	NA	tCO ₂ /MWh	(UPME, 2023, p.4)
Gasolina	2.38	NA	NA	kg CO ₂ e/L	IPCC (2006)

Diesel	2.83	NA	NA	kg CO ₂ e /L	IPCC (2006)
Cal dolomita	0.448	NA	NA	kgCO ₂ /Kg	IPCC (2006)
Compostaje de residuos orgánicos (peso húmedo)	NA	4	0.24	g/Kg de residuo	IPCC (2006)
Quema de leña	957.25	NA	NA	g CO ₂ e/kg de leña	IPCC (2006)

Nota: NA = No Aplica

Estimación de la Huella de Carbono

Asoprocavip cuenta con 177 productores, los cuales en su mayoría realizan un manejo convencional del cultivo, solo 47 realizan labores de manejo orgánico. Para estimar la huella de carbono de la asociación, se tomó una muestra representativa de 40 productores, la cual se calculó mediante la Ecuación 1 tomada de la Universidad Estatal de Milagro (2019) para un nivel de confianza del 90% y un error del 10.5%. Para la muestra se seleccionó una mitad de productores de manejo orgánico y otra de productores de manejo convencional, esto con el fin de analizar el comportamiento de la huella de carbono según el manejo agronómico del cultivo. Además, se analizaron las similitudes de los sistemas de siembra de los productores con respecto a las tipologías para cultivos de cacao en la amazonia propuesta por los autores Salazar et al. (2018), con el fin de observar diferencias en las emisiones y absorciones de carbono en cada una de ellas y establecer cuál de estas tiene un mejor desempeño ambiental.

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra buscado

N = Tamaño de la Población o Universo

Z = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza

e = Error de estimación máximo aceptado

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado

$q = (1 - p)$ = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

Por otro lado, para estimar las emisiones de CO₂e acumuladas en la producción de grano cacao se optó por el enfoque de Tier 1, el cual es el nivel metodológico estandarizado más básico para calcular emisiones o absorciones de GEI, según el IPCC. Es ideal cuando no se tiene información local y se necesita usar valores por defecto que el IPCC proporciona. Para ello se utilizó la siguiente fórmula general:

$$\text{Cantidad de emisiones de GEI} = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

Los datos de la actividad se recolectaron mediante la implementación de encuestas realizadas a cada productor. En ella se recogieron datos generales como área de la finca, clones utilizados, edad del cultivo, producción anual, etc; y datos específicos en cada fase de la producción de cacao relativos a la fertilización, uso de combustibles fósiles, consumo eléctrico, residuos sólidos, etc. La encuesta se puede consultar en Anexos, al final del documento.

Estimación de emisiones por cambio de uso de suelo

Para estimar las emisiones de CO₂ generadas por el cambio de uso del suelo en las fincas, se empleó la metodología denominada “*Changes in ecosystem carbon stocks*” (cambios en las reservas de carbono de los ecosistemas), propuesta por el IPCC (2006). Esta metodología señala que generalmente, las emisiones y absorciones de CO₂ dentro del Sector AFOLU se estiman sobre la base de los cambios en las existencias de carbono del ecosistema como se observa en la

Ecuación 3. Éstos incluyen la biomasa aérea y subterránea, la materia orgánica muerta (a saber, la madera muerta y la hojarasca), y la materia orgánica del suelo. Las pérdidas netas de las existencias de carbono de todo el ecosistema se utilizan para estimar las emisiones de CO₂ a la atmósfera (IPCC, 2006, p. 11).

$$\Delta C_{CONVERSIÓN} = \sum_i \{ (B_{DESPUÉS_i} - B_{ANTES_i}) \cdot \Delta A_{A_OTRAS_i} \} \cdot CF$$

Donde:

$\Delta C_{CONVERSIÓN}$ = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra, ton C año⁻¹

$B_{DESPUÉS,i}$ = existencias de biomasa en el tipo de tierra i inmediatamente después de la conversión, ton d.m. ha⁻¹

$B_{ANTES,i}$ = existencias de biomasa en el tipo de tierra i antes de la conversión, ton d.m. ha⁻¹

$\Delta A_{A_OTRAS,i}$ = superficie de uso de la tierra i convertida a otra categoría de uso de la tierra en un año dado, ha año⁻¹

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)⁻¹

i = tipo de uso de la tierra convertido a otra categoría de uso de la tierra.

En este caso, el stock de carbono de la biomasa aérea y subterránea, la materia orgánica muerta y del suelo del ecosistema anterior a la conversión ($B_{ANTES,i}$) se estimó mediante un enfoque Tier 1 utilizando valores predeterminados para suelos de la región y considerando la información sobre el uso del suelo antes del establecimiento del cultivo de cacao, suministrada por el productor a través de la encuesta. Posteriormente, para realizar la conversión de cambios de existencias de C a emisiones de CO₂ se multiplicó el cambio en las existencias de C por -44/12 como se muestra a continuación.

$$\text{Cantidad } CO_2 \text{ por cambio de uso de suelo} = \Delta C_{conversion} \times \left(-\frac{44}{12}\right)$$

Para calcular el stock de carbono del ecosistema posterior a la conversión ($B_{DESPUÉS,i}$) se tuvo en cuenta la metodología del siguiente apartado relativa a la estimación del almacenamiento de biomasa y carbono en el cultivo de cacao. Como consecuencia se obtuvo las pérdidas netas de carbono para realizar la estimación de las emisiones de CO_2 por cambio de uso de suelo.

1. Estimación del almacenamiento de biomasa y carbono en el cultivo de cacao

La biomasa arriba del suelo se estimó mediante el establecimiento de una parcela de muestreo rectangular de 1000 m² en cada productor. Además, la biomasa por individuo se estimó mediante la medición de la altura total (ht) y el diámetro a la altura del pecho (dap) de todos los árboles con $dap \geq 10$ cm, así mismo, para los arbustos de cacao se tuvo en cuenta el diámetro del tronco a 30 cm de altura (D_{30}) y la ht.

Las dimensiones de las leñosas perennes serán convertidas a biomasa arriba del suelo empleando modelos alométricos reportados en la literatura, usados comúnmente en investigaciones con condiciones similares a la zona de estudio (Tabla 4). Para el cálculo de la biomasa abajo del suelo se siguió la metodología sugerida por Marín Quintero (2016).

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

Dónde:

Br = Biomasa bajo el suelo (t/ha)

Ba = Biomasa arriba del suelo (t/ha)

Tabla 5

Tabla de ecuaciones para biomasa área total

Especies	Modelo	R ²	Fuente
Árboles frutales			
(Modelos multiespecies)	$B = 10^{((1,12+2,62*Log(dap)+0,03*Log(h_t)))}$	0,95	Andrade et al., 2008
Árboles maderables			
(<i>Cordia alliodora</i>, <i>Cedrela odorata</i>)	$B = 10^{((-0,94+1,32*Log(dap)+1,14*Log(h_t)))}$	0,96	Segura et al., 2005
<i>Pithecellobium guachapele</i>, <i>acacia glomerata</i>, <i>croton sp</i>, <i>Carica papaya</i>, <i>Guarea trichiliodes</i>	$B = 21,30 - 6,95 * (dap) + 0,74 * (dap)^2$	0,92	Brown e Iverson (1992)
<i>Theobroma cacao</i>	$B = 10^{((-1,625+2,63*Log(dap_{30})))}$	0,98	Andrade et al., (2008)

Nota: B: biomasa aérea total (kg/árbol); dap: diámetro a la altura del pecho (1,30 m) (cm); ht: altura total (m); Log: Logaritmo base 10; dap30: diámetro del tronco a 30 cm de altura (cm). Tomando de Marín Quintero (2016).

Además, la autora determinó el almacenamiento de carbono en la biomasa total utilizando el valor default de fracción de carbono (0.47). La tasa de fijación de carbono para árboles y arbustos de cacao fue estimada dividiendo el almacenamiento de carbono en la biomasa total entre la edad promedio de cada componente. La edad de cada componente fue estimada mediante la realización de una entrevista al productor o administrador de la finca. La tasa de fijación fue cuantificada en términos de CO₂e usando una constante de 3.67 (IPCC, 2006).

Resultados

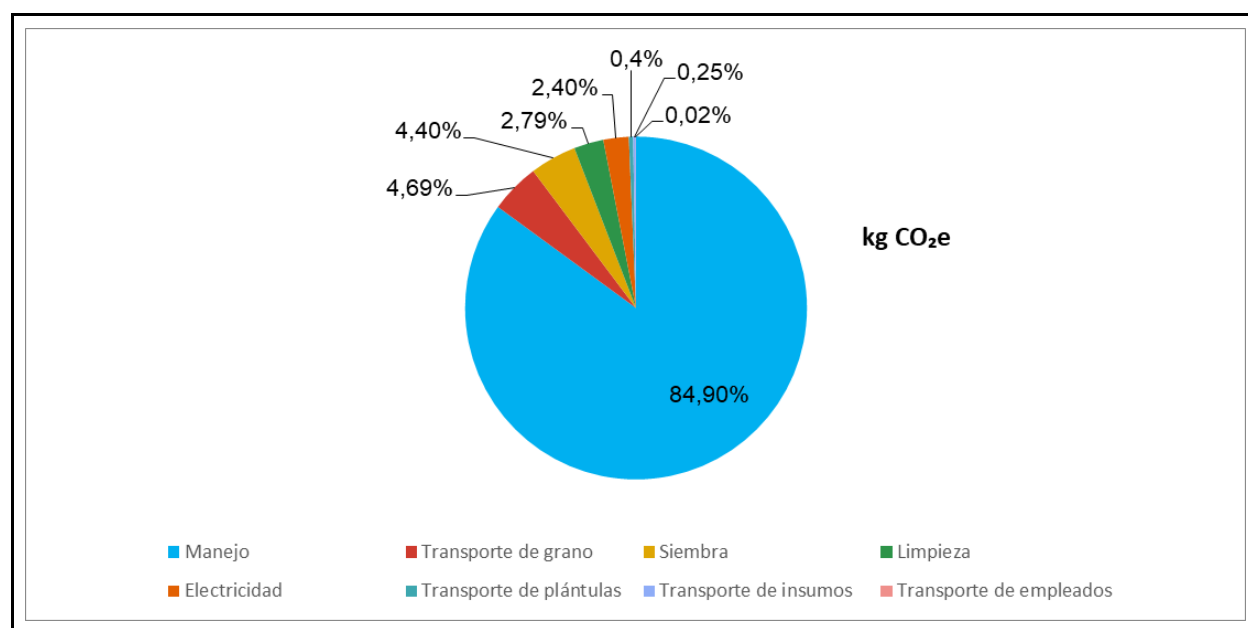
Emisiones de CO₂e generadas durante la producción de cacao

Las emisiones de gases de efecto invernadero fueron estimadas a partir de las diferentes actividades desarrolladas durante la producción de cacao, incluyendo labores de manejo, siembra, limpieza, transporte y consumo de energía eléctrica.

Emisiones por fuente en sistemas orgánicos

Figura 4.

Emisiones de CO₂e por fuente en el sistema orgánico



Fuente propia.

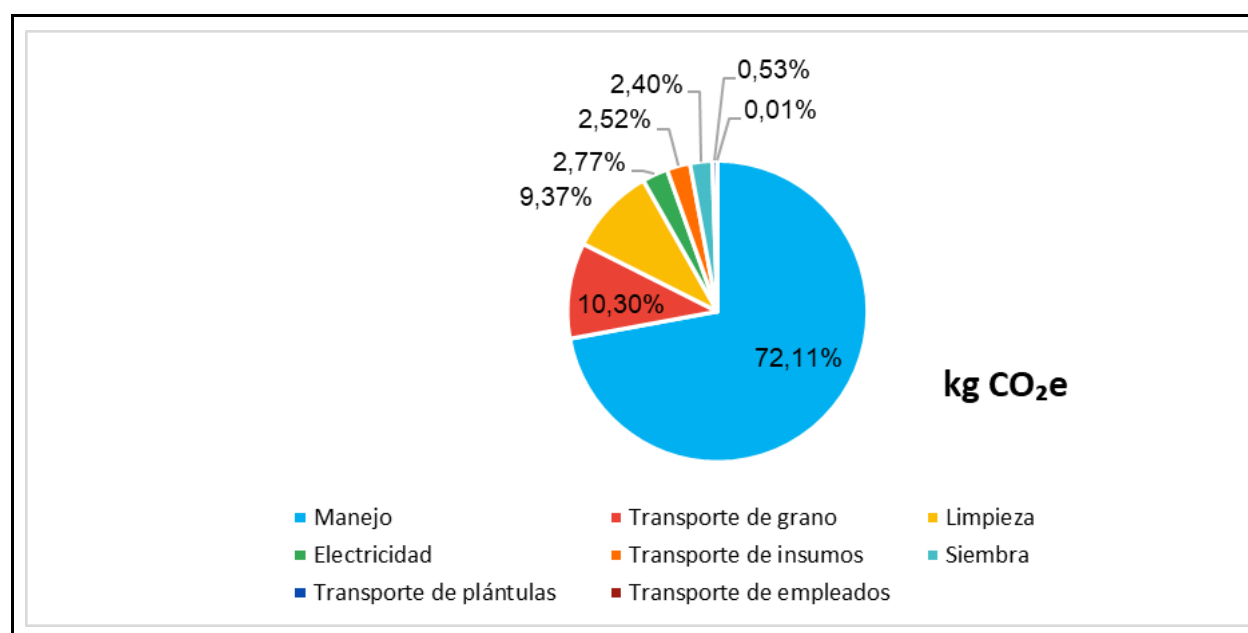
Los resultados muestran que la principal fuente de emisión en los sistemas orgánicos corresponde a las actividades de manejo del cultivo, las cuales generaron 63.951,41 kg CO₂e. Posteriormente se ubicaron el transporte de grano (3.531,10 kg CO₂e), la siembra (3.312,25 kg CO₂e), las labores de limpieza (2.104,22 kg CO₂e) y el consumo de electricidad (1.810,22 kg CO₂e).

Las menores contribuciones provinieron del transporte de plántulas (300,206 kg CO₂e), transporte de insumos (186,09 kg CO₂e) y transporte de empleados (16,30 kg CO₂e). Estos resultados indican que las labores de manejo representan la actividad con mayor incidencia sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas orgánicos evaluados.

Emisiones por fuente en sistemas convencionales

Figura 5.

Emisiones de Kg CO₂e por fuente en el sistema convencional.



Fuente propia.

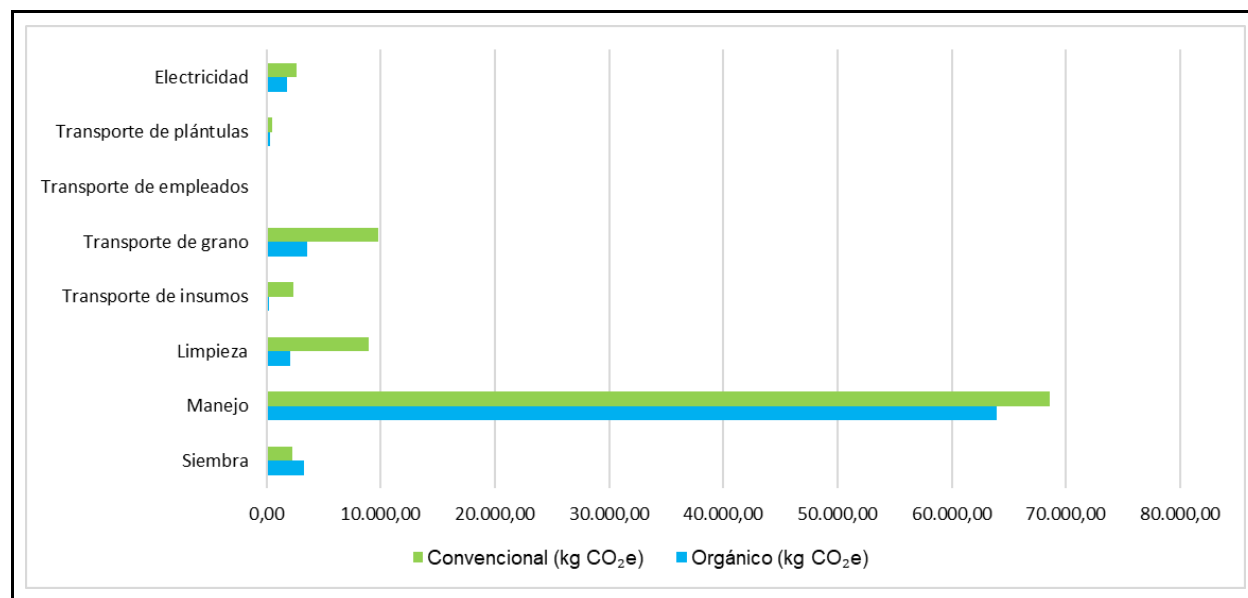
En los sistemas convencionales se observó una tendencia similar, donde las actividades de manejo constituyeron la principal fuente de emisión con 68.569,81 kg CO₂e. Asimismo, se registraron aportes importantes asociados al transporte de grano (9.791,96 kg CO₂e), las labores de limpieza (8.905,48 kg CO₂e) y el consumo de electricidad (2.635,44 kg CO₂e).

Por otra parte, el transporte de empleados presentó la menor contribución al inventario de emisiones, con un valor de 6,49 kg CO₂e. De manera general, los sistemas convencionales presentaron mayores emisiones acumuladas en comparación con los sistemas orgánicos.

Comparación de las fuentes de emisión entre sistemas productivos.

Figura 6.

Comparación de las emisiones de Kg CO₂e entre sistemas orgánicos y convencionales.



Fuente propia.

Al comparar ambos sistemas productivos, se evidenció que las mayores diferencias se presentan en las actividades de manejo, limpieza y transporte de grano, donde los sistemas convencionales registraron mayores emisiones. Igualmente, el consumo de energía eléctrica y el transporte de insumos mostraron valores superiores en los sistemas convencionales. Estos resultados sugieren que las prácticas de manejo implementadas en los cultivos convencionales generan una mayor contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los sistemas orgánicos.

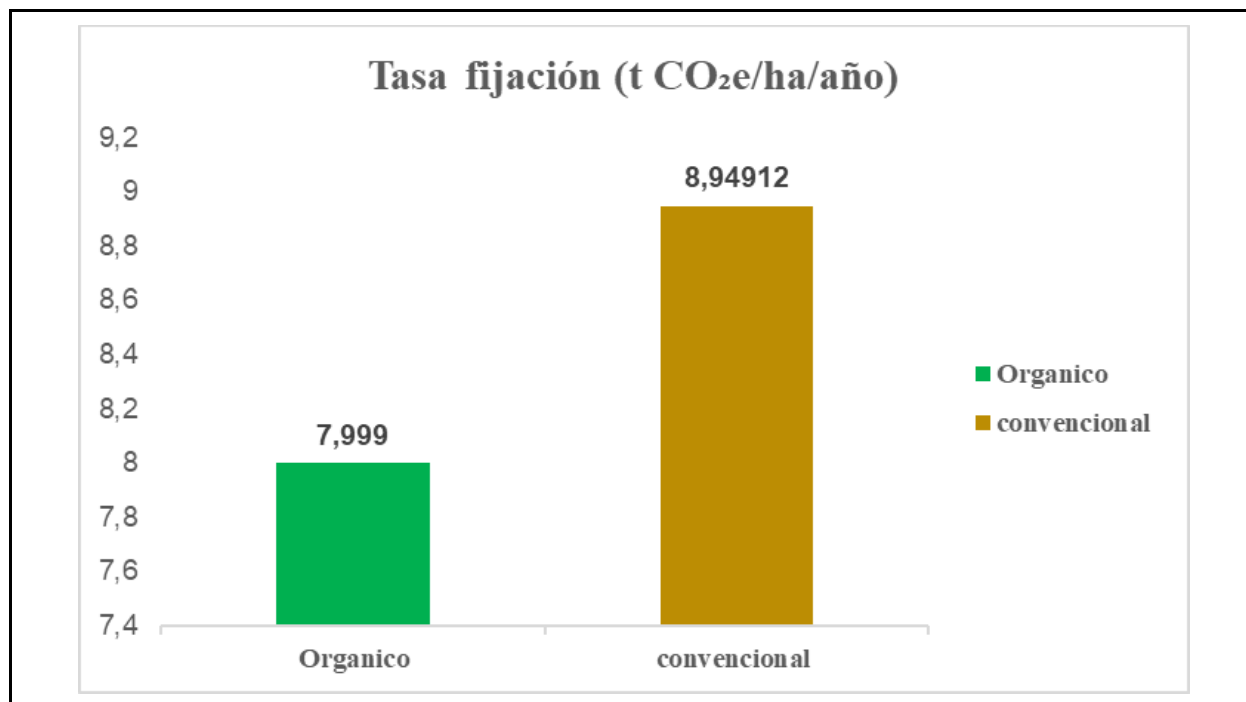
Tasa de fijación de CO₂e entre sistemas orgánicos y convencionales.

Gran parte de los datos de fijación que se presentan a continuación forman parte del proyecto de doctorado “Maximización de los beneficios económicos en la cacaocultura al incorporar las contribuciones de la naturaleza en Putumayo-Colombia”.

La capacidad de fijación de carbono de los sistemas productivos de cacao fue estimada a partir del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea presente en las fincas evaluadas.

Figura 7.

Comparación de la tasa de fijación de t CO₂e entre sistemas orgánicos y convencionales.



Fuente propia.

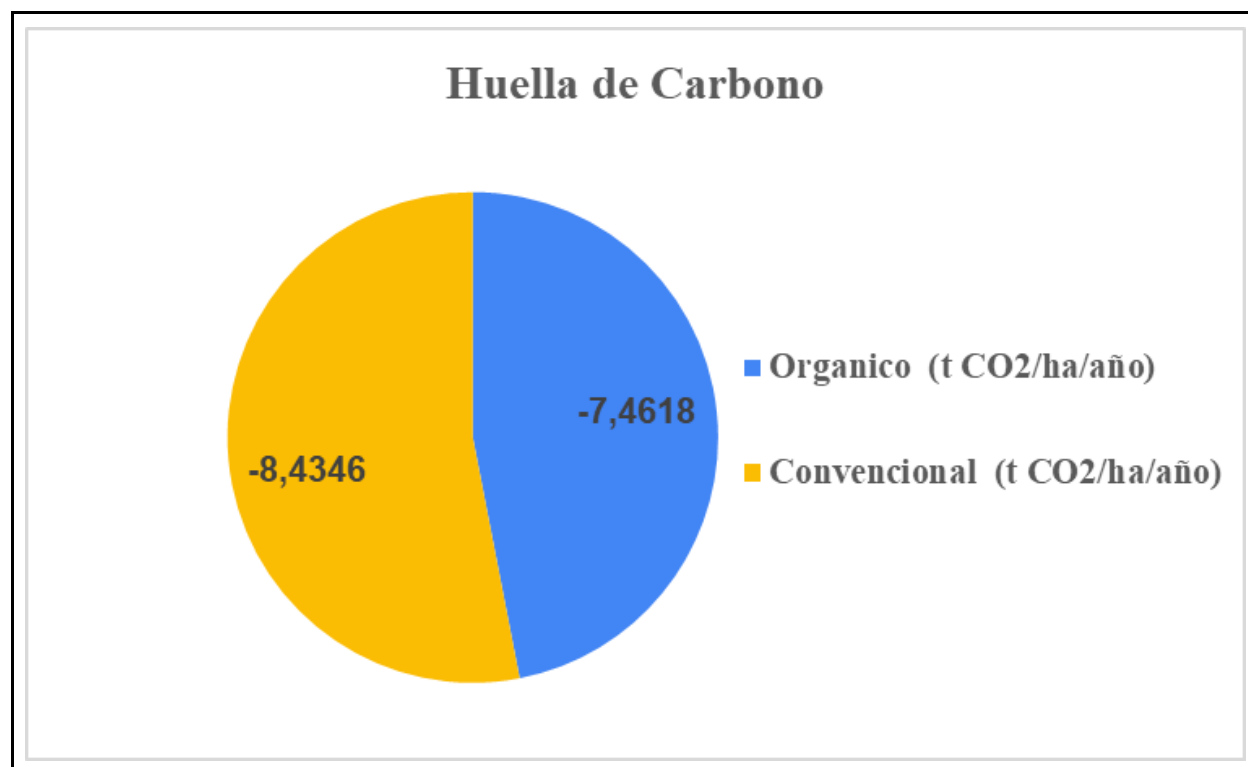
Presenta la comparación de la tasa promedio de fijación de CO₂e entre los sistemas de producción orgánico y convencional evaluados en la asociación Asoprocavip. Los resultados muestran que los sistemas convencionales registraron una tasa de fijación promedio de 8,95 t CO₂e/ha/año, mientras que los sistemas orgánicos presentaron una tasa promedio de 8,00 t CO₂e/ha/año.

Huella de carbono de los sistemas productivos de cacao

La huella de carbono fue estimada mediante la diferencia entre las emisiones generadas durante el proceso productivo y la tasa de fijación de carbono del sistema. Este indicador permitió determinar el balance neto de carbono de cada sistema productivo evaluado.

Figura 8.

Comparación de la huella de carbono entre sistemas orgánicos y convencionales.



Fuente propia.

Los resultados muestran que la huella de carbono de los sistemas evaluados estuvo determinada por la relación entre las emisiones generadas y la capacidad de captura de carbono de la biomasa presente en las fincas. En aquellos casos donde la tasa de fijación de carbono superó las emisiones generadas, se obtuvieron valores negativos de huella de carbono, indicando que los sistemas funcionan como sumideros netos de carbono.

Discusión

Emisiones de carbono

Los productores de cacao de ASOPROCAVIP generan en promedio 525 ± 441 kg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹. Este resultado se sitúa dentro del rango típico reportado a nivel global, aunque en el extremo inferior del mismo. Un metaanálisis global reciente, que excluye las emisiones por deforestación asociada, reportó una mediana de huella de carbono por área (ACF) de 732 kg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, con un rango intercuartílico de ± 1318.5 kg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. El percentil 10 y 90 de este estudio global se sitúa entre 26 y 1691 kg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica una variabilidad muy alta entre sistemas productivos en el mundo (Cornelius et al., 2025).

En Colombia, investigaciones previas han reportado que las emisiones por manejo en plantaciones de cacao pueden variar en un rango de 0.4 a 1.4 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ (Ortiz-Rodríguez et al., 2016). El valor de la asociación se alinea con los valores bajos de este rango, sugiriendo que las prácticas de manejo, aunque diversas, tienden a ser de baja intensidad en el uso de insumos y maquinaria. Esto es una característica común en muchos sistemas productivos de la Amazonía colombiana.

Por otro lado es de tenerse en cuenta la elevada desviación estándar observada (± 441 kg CO₂e/ha/año) que indica una fuerte heterogeneidad entre productores, probablemente relacionada con diferencias en edad del cultivo, intensidad de fertilización, rendimientos, tamaño de finca y manejo agronómico.

Huella de Carbono

La huella de carbono de ASOPROCAVIP es en promedio de 6.70 ± 9.52 kg CO₂ por kg de cacao cosechado. En el contexto global, el mismo metaanálisis establece una mediana de huella de carbono por producto (PCF) de 1.55 kg CO₂e kg⁻¹ de grano seco, con un rango

intercuartílico que alcanza los 2.703 kg CO₂e kg⁻¹. La media de este estudio es considerablemente superior. Sin embargo, el análisis también señala que el rango típico (del primer al octavo decil) de la PCF global es de 0.05 a 3.74 kg CO₂e kg⁻¹ de grano seco, un intervalo que no alcanza los valores promedios encontrados en Villagarzón (Cornelius et al., 2025) .

Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela debido a que la huella por kilogramo depende fuertemente de la productividad. En sistemas con bajos rendimientos, las emisiones fijas de transporte, fertilización, fermentación y secado se distribuyen entre una menor cantidad de cacao producido, incrementando significativamente el indicador por unidad de producto (Jagoret et al., 2017).

La alta desviación estándar ($\pm 9,52$ kg CO₂e/kg) sugiere que algunos productores presentan rendimientos muy bajos, mientras que otros alcanzan productividades más altas, generando una amplia dispersión de resultados. Este comportamiento también ha sido reportado en estudios de cacao colombiano, donde las diferencias en manejo y productividad generan importantes variaciones en la huella de carbono por kilogramo producido (Ortiz-Rodríguez et al., 2016).

Fijación de carbono

En promedio los sistemas de siembra de ASOPROCAVIP retienen $8,47 \pm 5,40$ t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ para una tasa de 2,3 t C ha⁻¹ año⁻¹ similares a los valores en biomasa aérea y subterránea reportado por Poroma Colmena (2012) en Waslala (Nicaragua), donde los sistemas agroforestales de cacao presentaron una acumulación promedio de 3,3 t C ha⁻¹ año⁻¹. En ambos estudios, la presencia de árboles asociados al cultivo desempeña un papel fundamental en la

captura de carbono, incrementando las reservas de biomasa y favoreciendo balances de carbono más sostenibles.

Asimismo, el estudio de CACAONICA concluyó que los sistemas agroforestales removieron en promedio ocho veces más CO₂ del que se emitió durante la producción de cacao, acercándose a la neutralidad de carbono. Estos resultados refuerzan la importancia de los sistemas agroforestales como una estrategia de producción sostenible, ya que además de generar rendimientos agrícolas, promueven el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos (Poroma Colmena, 2012).

Además, teniendo en cuenta las fijaciones el balance de carbono neto muestra un valor de carbono negativo de -7.95 ± 5.37 t CO₂ ha/año. Este resultado indica que, en promedio, las fincas de ASOPROCAVIP actúan como sumideros netos de carbono, secuestrando más CO₂ atmosférico del que emiten. Este valor se aproxima a valores reportados por el Fondo Colombia en Paz (2019) en el municipio de Valle del Guamuez que registraron -6,0 toneladas netas de CO₂ eq/hectárea/año.

Diferencias entre manejo convencionales y orgánico

Realizando una comparación con estudios realizados en Tailandia evidencia diferencias en el comportamiento de la huella de carbono según el tipo de manejo. En dicho país, los sistemas convencionales presentaron emisiones cercanas a 1,50 kg CO₂ eq/kg de cacao, mientras que los sistemas orgánicos registraron valores entre 1,00 y 1,20 kg CO₂ eq/kg. En contraste, los resultados obtenidos en ASOPROCAVIP muestran una tendencia opuesta, con una huella de carbono promedio de $4,85 \pm 5,88$ kg CO₂ eq/kg cacao para el manejo convencional y de $8,55 \pm 12,02$ kg CO₂ eq/kg cacao para el manejo orgánico. Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones particulares de los sistemas agroforestales de Putumayo y a las variaciones en

productividad debido a cultivos jóvenes que no han tenido su pico de producción (Agrawal, 2024).

Asimismo, las fincas evaluadas en ASOPROCAVIP presentaron un balance de carbono. Este resultado contrasta con los sistemas estudiados en Tailandia, donde tanto los cultivos convencionales como los orgánicos continúan siendo emisores netos. Esto resalta que los sistemas de cacao en Putumayo no solo compensan sus emisiones, sino que aportan activamente a la mitigación climática, diferenciándose de los sistemas asiáticos donde la reducción depende principalmente de sustituir fertilizantes químicos por insumos orgánicos.

Por otro lado, los resultados obtenidos también difieren de los reportados por Hernandez et al. (2022) en Pará (Brasil), donde los sistemas convencionales de cacao presentaron una huella de carbono de 10,9 kg CO₂ eq/kg cacao donde se estimó que la transición hacia prácticas orgánicas podría reducirla hasta 2,01 kg CO₂ eq/kg cacao, equivalente a una disminución del 81 %. Los autores atribuyen esta reducción principalmente a la eliminación de fertilizantes nitrogenados sintéticos y al compostaje adecuado de las cáscaras de cacao, identificando estas prácticas como estrategias clave para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En contraste, en la presente investigación no se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de manejo convencional y orgánico, lo que sugiere que otros factores, además del tipo de manejo, pueden estar influyendo en la huella de carbono de los productores evaluados.

Por último, es de mencionar que las emisiones por cambio de uso de suelo no se agregaron al total de emisiones por productor debido a que muchos de estos, antes del establecimiento del cultivo de cacao, contaban con cultivos de coca cuya estimación de la biomasa no fue posible hallar debido a limitaciones bibliográficas sobre el tema. Esta

investigación muestra la escasa información relativa a estudios de biomasa en cicales en Colombia.

Recomendaciones

Optimización de las prácticas de manejo del cultivo.

Reducción de emisiones por manejo: Dado que las actividades de manejo (fertilización, poda, control de malezas) representaron la principal fuente de emisiones tanto en sistemas orgánicos (63.951,41 kg CO₂e) como convencionales (68.569,81 kg CO₂e), se recomienda implementar prácticas de agricultura de precisión y mecanización eficiente. Por ejemplo, utilizar herramientas manuales en lugar de motorizadas para labores de poda y limpieza en áreas pequeñas, y capacitar a los productores en el mantenimiento adecuado de motobombas y motoguadañas para reducir el consumo de combustible.

Fertilización balanceada: En sistemas convencionales, se sugiere transitar gradualmente hacia el uso de fertilizantes de liberación controlada o biofertilizantes, combinados con análisis periódicos de suelo para ajustar dosis y evitar excesos de nitrógeno, que incrementan las emisiones de N₂O.

Mejora en la logística de transporte.

El transporte de grano (3.531,10 kg CO₂e en orgánico; 9.791,96 kg CO₂e en convencional) es la segunda fuente más relevante. Se recomienda consolidar rutas de acopio colectivo entre productores vecinos para optimizar cargas y reducir viajes, así como evaluar el uso de vehículos eléctricos o de bajas emisiones para el traslado del grano desde las fincas hasta la Casa Campesina. Asimismo, se sugiere establecer centros de acopio comunitarios más cercanos a las parcelas.

Fortalecimiento de sistemas agroforestales y aumento de la fijación de carbono

La tasa de fijación promedio fue de 8,47 t CO₂e/ha/año, con valores ligeramente superiores en sistemas convencionales (8,95) frente a orgánicos (8,00). Para incrementar el

secuestro de carbono, se recomienda enriquecer los arreglos agroforestales con especies nativas maderables y frutales, respetando densidades óptimas que no compitan con el cacao. Además, se debe evitar la quema de residuos de cosecha y promover su compostaje o incorporación como cobertura vegetal, lo que además reduce emisiones por quema (factor de 1515 g CO₂e/kg de materia seca quemada).

Eficiencia energética y gestión de residuos

El consumo eléctrico (1.810,22 kg CO₂e en orgánico; 2.635,44 kg CO₂e en convencional) puede reducirse mediante la instalación de paneles solares para el secado mecánico y el bombeo de agua, aprovechando la alta radiación solar de la región. Respecto a los residuos sólidos, se debe implementar un programa de segregación en origen y compostaje de residuos orgánicos (cáscaras de cacao, restos de poda), utilizando los factores de emisión reportados (0,1915 t CO₂e/t para compostaje), lo que evita la generación de metano en disposición final.

Inclusión de emisiones por cambio de uso del suelo en futuros inventarios

El estudio no cuantificó las emisiones por cambio de uso del suelo debido a la falta de información sobre biomasa previa. Se recomienda que futuras investigaciones desarrollen modelos alométricos específicos para ciertos usos de suelo en la Amazonía colombiana y realicen entrevistas detalladas sobre el historial de uso del suelo.

Certificación y acceso a mercados de carbono

Dado que la huella de carbono promedio fue negativa ($-7,95 \pm 5,37$ t CO₂e/ha/año), los sistemas de Asoprocavip actúan como sumideros netos. Se recomienda a la asociación gestionar la certificación de carbono neutro o carbono positivo ante entidades como ICONTEC o programas de mercados voluntarios de carbono (por ejemplo, Verified Carbon Standard). Esto

permitiría acceder a incentivos económicos, mejorar la competitividad del cacao putumayense en mercados internacionales y fortalecer la imagen de sostenibilidad.

Fortalecimiento de alianzas institucionales y vinculación de estudiantes

Se recomienda establecer y consolidar alianzas estratégicas entre la Asociación Asoprocavip, la Universidad del Putumayo (UniPutumayo), CORPOAMAZONIA, la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao) y otras entidades gubernamentales y no gubernamentales con presencia en el departamento. Estas alianzas deben tener como objetivo principal la continuidad y el escalamiento de las investigaciones en huella de carbono y sostenibilidad del cultivo de cacao, así como la implementación de programas de monitoreo participativo de largo plazo.

Conclusiones

Se determinó la huella de carbono de la producción de grano de cacao (*Theobroma cacao*) en la asociación, encontrando que los sistemas agroforestales evaluados presentan un balance neto negativo de $-7,95 \pm 5,37$ t CO₂e/ha/año, lo que indica que actúan como sumideros netos de carbono, secuestrando más CO₂ atmosférico del que emiten durante las labores productivas. La huella por kilogramo de cacao producido fue de $6,70 \pm 9,52$ kg CO₂e/kg, valor superior a la mediana global (1,55 kg CO₂e/kg), lo cual se explica por los bajos rendimientos en algunos predios y la alta variabilidad entre productores.

Se estimó la cantidad de carbono retenido en biomasa aérea y subterránea, obteniendo una tasa de fijación promedio de $8,47 \pm 5,40$ t CO₂e/ha/año (equivalente a 2,3 t C/ha/año). Esta tasa es comparable con la reportada en sistemas agroforestales de cacao en Nicaragua (3,3 t C/ha/año) y demuestra el alto potencial de los arreglos agroforestales del Putumayo para la mitigación del cambio climático. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sistemas orgánicos (8,00 t CO₂e/ha/año) y convencionales (8,95 t CO₂e/ha/año) en cuanto a fijación, lo que sugiere que ambos tipos de manejo, al estar bajo sombra de árboles asociados, logran capturas similares.

Se cuantificaron las emisiones generadas durante la producción de cacao, las cuales ascendieron en promedio a 525 ± 441 kg CO₂e/ha/año (rango inferior del reportado globalmente). La principal fuente de emisión fueron las actividades de manejo del cultivo (aproximadamente 66.000 kg CO₂e en total para la muestra), seguidas del transporte de grano, labores de limpieza y consumo eléctrico. Los sistemas convencionales mostraron mayores emisiones acumuladas que los orgánicos en todas las categorías, especialmente en manejo (68.569 vs 63.951 kg CO₂e) y transporte de grano (9.792 vs 3.531 kg CO₂e). No se incluyeron

las emisiones por cambio de uso del suelo por falta de datos sobre biomasa previa en cultivos de coca, lo cual constituye una limitación del estudio.

Se propusieron estrategias orientadas a neutralizar o mejorar la huella de carbono (ver sección de Recomendaciones), entre las que destacan: optimización del manejo mediante mecanización eficiente, consolidación de rutas de transporte colectivo, enriquecimiento de sistemas agroforestales con especies nativas, uso de energías renovables (solar), compostaje de residuos orgánicos, y certificación en mercados de carbono. Dado que los sistemas ya son sumideros netos, estas estrategias buscan mantener y potenciar dicho balance negativo, así como reducir la huella por kilogramo de producto mediante el aumento de la productividad.

Finalmente, la investigación aporta una línea base cuantitativa para la asociación Asoprocavip, demostrando que la producción de cacao en Villagarzón, bajo sistemas agroforestales, es ambientalmente sostenible en términos de carbono, y abre oportunidades para la certificación y el acceso a mercados verdes, contribuyendo además a las metas nacionales de reducción del 51% de GEI al 2030 y al Acuerdo de París.

Referencias

- Agencia UNAL. (2019, 19 de julio). *El 55 % de los gases que se emiten en Colombia viene del agro*. Unimedios. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/el-55-de-los-gases-que-se-emiten-en-colombia-viene-del-agro>
- Agrawal, R. (2024). *Effects of fertilizers usage in conventional and organic cocoa plantation in Thailand* (Master's thesis, Chulalongkorn University, Graduate School). Chulalongkorn University. <https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2024.1289>
- ASOREDESOCIAL. (2020). *Revisión y ajuste del Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Puerto Asís Putumayo*. <https://www.puertoasis-putumayo.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/DIAGNOSTICO%20V4%20ENE272021.pdf>
- Basher, R. (2006). Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2167–2182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>
- Charry, A., Castro, F., & Castro, A. (2019). *Colombian cacao, forest and peace initiative: Estudio de línea base de la cadena del cacao en Colombia. Oportunidades y limitaciones para el desarrollo de la cadena, la conservación y restauración de bosques y la construcción de paz*. CIAT. https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/102209/CIAT_CBP_201905.pdf
- Congreso de la República de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la*

gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.146. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/Ley-99-de-1993.pdf>

Congreso de la República de Colombia. (2018, 27 de julio). *Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático.* Diario Oficial No. 50.658. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87110>

Congreso de la República de Colombia. (2019, 25 de mayo). *Ley 1955 de 2019. Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad”.* Diario Oficial No. 50.964. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=98425>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2015). *Acuerdo de París.* https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

Cornelius, J. P., Hardy, F. W., & Harvey, C. A. (2025). Carbon footprint of primary production of cacao: a meta-analytical review. *Environmental Reviews*, 33, 1–18. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0146>

CORPOAMAZONIA, Gobernación del Putumayo, & PNUD. (2020). *Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial (PIGCCT) del Departamento del Putumayo 2020-2049.* <https://accionclimatica.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/Biblioteca/Proyectos/Amazon%C3%ADa%20Sostenible%20para%20la%20Paz/Putumayo/Versi%C3%B3n%20Final%20PIGCCT%20PUTUMAYO.pdf>

- Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). *Análisis del ciclo de vida y huella de carbono: Casos prácticos*. Universidade de Santiago de Compostela.
https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/21411/acv_hc_casos_practicos.pdf
- Frohman, A., & Olmos, X. (2013). *Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://hdl.handle.net/11362/4101>
- Fundación Barranquilla Sostenible +20. (2021). *Inventario de emisiones de Colombia Acuerdo de Glasgow 2021*. <https://barranquillamas20.com/wp-content/uploads/2022/05/Informe-Inventario-de-emisiones-de-Colombia-Acuerdo-de-Glasgow-1.pdf>
- Fondo Colombia en Paz. (2019). *Producción de cacao en el Valle del Guamuez, Putumayo*. Colombia Sostenible. [Colombia Sostenible](#)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *Soil carbon sequestration*. FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/soil-carbon-sequestration/en/>
- Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao). (2025). *Colombia reportó en 2024 producción histórica de cacao*. <https://www.fedecacao.com.co/post/colombia-report%C3%B3-en-2024-producci%C3%B3n-hist%C3%B3rica-de-cacao>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2001). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Instituto for Global Environmental Strategies (IGES).

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2016). *Global warming potential values*. GHG Protocol.

https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2022). Summary for Policymakers. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. Van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC.

<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

Gutierrez-Zapata, D. M. (2023). *Focos de emisión en cadenas de valor agroalimentarias en entornos afectados por conflicto: Caso ganadería y cacao en Caquetá*. CGIAR.

<https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/720cacaef574-4ee4-90af-aff0a3ad0f17/download>

Hernandes, G. M. C., Efraim, P., De Andrade Silva, A. R., & De Castilho Queiroz, G. (2022).

Carbon footprint of Brazilian cocoa produced in Pará state. INIS – International Nuclear Information System. <https://inis.iaea.org/records/a8yhg-za115>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2024). *Inventario nacional de emisiones y absorciones atmosféricas de Colombia: Gases de efecto invernadero (1990–2021), contaminantes criterio y carbono negro (2010–2021)*.

IDEAM; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Fundación Natura; Proyecto GEF-CBIT “Transparencia Climática Colombia”; Proyecto Biocarbono “Paisajes Sostenibles Bajos en Carbono”. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 2: Metodologías genéricas aplicables a múltiples categorías de uso de la tierra*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. <https://www.iso.org/standard/71206.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Jagoret, P., Michel, I., Ngnogu , H. T., Lachenaud, P., Snoeck, D., & Malézieux, E. (2017). Structural characteristics determine productivity in complex cocoa agroforestry systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(6). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0468-0>

Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Cripps, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdjie, A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S., Khennas, S., de la Rue du Can, S., ... Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>

Litskas, V. D., Platis, D. P., Anagnostopoulos, C. D., Tsaboula, A. C., Menexes, G. C., Kalburtji, K. L., & Mamolos, A. P. (2020). Climate change and agriculture: Carbon footprint estimation for agricultural products and labeling for emissions mitigation. In N. Betoret & E. Betoret (Eds.), *Sustainability of the Food System* (pp. 33–49). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818293-2.00003-3>

Marín Quintero, M. del P. (2016). *Estrategias de reducción de la huella de carbono en el ciclo de vida de la producción de cacao (Theobroma cacao) y procesamiento industrial de chocolate en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad del Tolima]. Repositorio UT. <https://repository.ut.edu.co/handle/001/3060>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008, 22 de abril). *Decreto 1299 de 2008. Por el cual se reglamenta el sistema de gestión ambiental en las empresas del sector privado*. Diario Oficial No. 47.059. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/Decreto-1299-de-2008.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático*. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/politica-nacional-de-cambio-climatico/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018, 27 de julio). *Resolución 1447 de 2018. Por la cual se crea el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (RENARE)*. Diario Oficial No. 50.651.

Ordóñez, Y. (2012). *Obtención de la certificación de «Carbono Neutro» y su impacto en la creación de valor empresarial: Resultados de casos reales* [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Salesiana del Ecuador]. Repositorio Digital UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2731>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Pérdida de carbono orgánico del suelo (COS)*. <http://www.fao.org/3/a-i6472s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *FAO's work on climate change. United Nations Climate Change Conference*. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/es/c/1255952/>

- Ortiz-Rodríguez, O. O., Villamizar-Gallardo, R. A., Naranjo-Merino, C. A., García-Caceres, R. G., & Castañeda-Galvís, M. T. (2016). Carbon footprint of the colombian cocoa production. *Engenharia Agricola*, 36(2), 260-270. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p260-270/2016>
- Osorio, C. G. (2019). El componente ambiental en el Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana. En Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Unidad Administrativa del Sistema de Parques Nacionales Naturales, WWF, Conservación Internacional y The Nature Conservancy, *Reconocimiento de los servicios ambientales: Una oportunidad para la gestión de los recursos naturales en Colombia* (pp. 153–157).
- Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2010). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1–4), 135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Plassmann, K., & Edwards-Jones, G. (2010). Carbon footprinting and carbon labelling of food products. In U. Sonesson, J. Berlin, & F. Ziegler (Eds.), *Environmental Assessment and Management in the Food Industry* (pp. 272–296). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857090225.3.272>
- Poroma Colmena, D. (2012). *Estrategias de reducción de la huella de carbono en la producción del grano de cacao (Theobroma cacao L.) para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua* (Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE). CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7120>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2021, 20 de agosto). *Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático. ¿Cómo podemos reducirlas?*

<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>

Ramos, G. (2021, 1 de julio). *Colombia reducirá en un 51% sus emisiones de gases efecto invernadero para el año 2030*. Presidencia de la República.

<https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2021/210701-Colombia-reducira-51-emisiones-gases-efecto-invernadero-2030.aspx>

Salazar, J. C. S., Bieng, M. A. N., Melgarejo, L. M., Di Rienzo, J. A., & Casanoves, F. (2018). First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PLOS ONE*, 13(2), e0191003. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191003>

Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3753/S2009834_es.pdf

Smith, J. A. (2020). *Theobroma cacao*. In *ScienceDirect*. Elsevier.

<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/theobroma-cacao>

Solarte Soto, J. (2025). Diversidad arborea y servicios ecosistemicos en sistemas agroforestales de cacao de Putumayo, Colombia. Universidad de Caldas. Disponible en:

<https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/25922>

Suárez, L. R., Salazar, J. C. S., Casanoves, F., & Bieng, M. A. N. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao

agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>

UPME. (2023). *Cartilla factor de emisión 2023*.

https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Cartilla_Factor_de_emision_2023.pdf

UPME. (2026, June 3). *Cambio climatico - UPME*. https://www.upme.gov.co/simec/oferta-y-demanda/transicion-energetica-justa/cambioclimatico/?utm_source=chatgpt.com

Wang, X., Chen, Y., Chen, X., He, R., Guan, Y., Gu, Y., & Chen, Y. (2019). Crop production pushes up greenhouse gases emissions in China: Evidence from carbon footprint analysis based on national statistics data. *Sustainability*, 11(18), 4931.

<https://doi.org/10.3390/su11184931>

Wiebe, K., Robinson, S., & Cattaneo, A. (2019). Climate Change, Agriculture and Food Security: Impacts and the Potential for Adaptation and Mitigation. In C. Campanhola & S. Pandey (Eds.), *Sustainable Food and Agriculture: An Integrated Approach* (pp. 55–74). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00004-2>

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press.

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

Zerón, M. L., & Arias, J. B. (2019). *Huella de Carbono según la ISO 14064-1:2011 de las actividades académicas de la Universidad Peruana Unión, sede Lima* [Tesis de pregrado,

Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional UPeU.

<https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2898>

Anexos

Figura 9

Socialización proyecto de investigación con Asoprocavip



Nota: Fuente propia

Figura 10

Asistencia reunión programa Asómbrate



Nota: Fuente propia

Figura 11

Medición en campo altura de palmas



Nota: Fuente propia

Figura 12

Acompañamiento de productores en las labores de campo



Nota: Fuente propia

Figura 13

Asistencia a productores



Nota: Fuente propia

Figura 14

Medición de las parcelas con cinta métrica



Nota: Fuente propia

Figura 15

Secadero del productor Ricardo Velazco



Nota: Fuente propia

Figura 16

Diseño de gráficas para invitación de productores



Nota: Fuente propia