

# EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE CAFÉ: ESTUDIO DE CASO DE LA FINCA TRIUNFO VERDE, CHIAPAS

## EVALUATION OF THE CARBON FOOTPRINT OF THE COFFEE PRODUCTION CHAIN: CASE STUDY OF THE TRIUNFO VERDE FARM, CHIAPAS

Adán Villa-Herrera<sup>1</sup>, Martín A. Bolaños-González<sup>1\*</sup>, Fernando Paz-Pellat<sup>2</sup>, José M. Salvador-Castillo<sup>1</sup>, Luz M. Ramírez-Armas<sup>1</sup> y Carolina Villagómez Jiménez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo C.P. 56264. Texcoco, Estado de México, México. Email: [adan123avh@hotmail.com](mailto:adan123avh@hotmail.com), [slcastillo990@gmail.com](mailto:slcastillo990@gmail.com), [luz.ramirezarmas@gmail.com](mailto:luz.ramirezarmas@gmail.com)

<sup>2</sup>Programa Mexicano del Carbono, Morelos N° 17, San Simón C.P. 56210, Texcoco, Estado de México. Email: [ferpazpel@gmail.com](mailto:ferpazpel@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Carr. México-Texcoco km 38.5, Chapingo C.P. 56230. Texcoco, Estado de México, México. Email: [carolinavillagomez82@gmail.com](mailto:carolinavillagomez82@gmail.com)

\*Autor para correspondencia: [martinb72@gmail.com](mailto:martinb72@gmail.com)

### 1.0. Resumen

**Antecedentes.** La huella de carbono (HC) mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por actividades humanas. Reducir la HC de los productos agrícolas es clave para mitigar el calentamiento global.

**Objetivo.** Este estudio cuantificó la HC en la producción de café orgánico bajo sombra en dos modalidades: para exportación (café verde) y mercado local (café molido y empaquetado) en Finca Triunfo Verde S.C. **Metodología.** Se evaluaron 458 parcelas durante el ciclo productivo 2023-2024, ubicadas en 32 localidades de ocho municipios de la Sierra Madre de Chiapas. Las emisiones de GEI se estimaron conforme a las directrices del IPCC y la norma PAS-2050. **Resultados.** La HC promedio total fue de 0.909 y 1.014 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde para exportación y mercado local, respectivamente. La fase de beneficio húmedo mostró mayor impacto en ambas modalidades, debido a las emisiones de metano por la descomposición de la pulpa (0.289 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup>) y a las emisiones de óxido nitroso de las aguas residuales (0.266 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup>). Las emisiones por transporte fueron de 0.238 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> para exportación y 0.211 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> para mercado local por consumo de combustible. Estas actividades representaron el 87.18 y 75.54 % de la HC total en café de exportación y mercado local, respectivamente. **Implicaciones.** Optimizar el manejo de subproductos del beneficio del café, emplear energías limpias y mejorar la eficiencia del transporte pueden reducir significativamente la HC. **Conclusión.** El beneficio húmedo tuvo el mayor impacto en ambas modalidades. La descomposición de pulpa contribuyó con un 31.77 % en exportación y 28.48 % en mercado local. Las emisiones de aguas residuales representaron un 29.28 % y 26.25 %, respectivamente. El transporte aportó un 26.13 % en exportación y 20.81 % en mercado local.

**Palabras clave:** *Coffea arabica*, sistemas agroforestales, gases de efecto invernadero, producción sostenible.

### Abstract

**Background.** The carbon footprint (CF) measures human activities' total greenhouse gas (GHG) emissions. Reducing the CF of agricultural products is crucial for mitigating global warming. **Objective.** This study quantified the CF in producing organic shade-grown coffee in two modalities: for export (green coffee) and local market (ground and packaged coffee) in Finca Triunfo Verde S.C. **Methodology.** A total of 458 plots were evaluated during the 2023–2024 production cycle, located in 32 communities across eight municipalities in the Sierra Madre of Chiapas. GHG emissions were estimated following IPCC guidelines and the PAS-2050 standard. **Results.** The average total CF was 0.909 and 1.014 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> for green coffee for export and the local market, respectively. The wet processing phase had the highest impact in both modalities due to methane emissions from pulp decomposition (0.289 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup>) and nitrous oxide emissions from wastewater (0.266 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup>). Transportation emissions were 0.238 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> for export and 0.211 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> for the local market, mainly due to fuel consumption. These activities accounted for 87.18 % and 75.54 % of the total CF for export and local market coffee, respectively. **Implications.** Optimizing the management of coffee processing by-products, adopting clean energy, and improving transportation efficiency can significantly reduce the CF. **Conclusion.** Wet processing had the most significant impact in both modalities. Pulp decomposition contributed 31.77 % to the CF for export coffee and 28.48 % for local market coffee. Wastewater

emissions represented 29.28 % and 26.25 %, respectively. Transportation accounted for 26.13 % of the CF for export coffee and 20.81 % for local market coffee.

**Key words:** *Coffea arabica*, *agroforestry systems*, *greenhouse gases*, *sustainable production*.

## 2.0. INTRODUCCIÓN

El sexto informe del IPCC (IPCC, 2022) señala que el sector agropecuario es la tercera fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global. Las emisiones derivadas de la producción de alimentos están estrechamente relacionadas con el crecimiento poblacional, ya que a medida que esta aumenta, la producción de alimentos debe incrementarse para satisfacer la demanda básica de consumo (Jaisawal y Agrawal, 2019). Según Crippa *et al.* (2021), el sistema alimentario es responsable de aproximadamente la tercera parte de las emisiones globales de GEI, considerando toda la cadena de suministro.

La agricultura es una fuente sustancial de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debido al cambio de uso del suelo y al uso de combustibles fósiles y electricidad en diversas actividades. Además, genera metano (CH<sub>4</sub>) a través de la fermentación entérica en la ganadería y la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, así como óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) principalmente por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el manejo de estiércol (Pathak, 2013, Rees *et al.*, 2014). Las emisiones de N<sub>2</sub>O tienen un impacto significativo debido a que su potencial de calentamiento global es 298 veces mayor que el CO<sub>2</sub> (Skiba y Rees, 2014).

La cantidad y tipo de GEI emitidos en la agricultura varían según el cultivo y las prácticas de manejo, lo que resalta la importancia de evaluarlos detalladamente para identificar medidas de mitigación efectivas. La huella de carbono (HC) es un indicador clave para estimar las emisiones de GEI (Schneider y Samaniego, 2010). Su cálculo permite establecer un balance de carbono, considerando tanto las emisiones como el potencial de remoción (Guerra, 2007). Lo que puede facilitar la creación de estrategias de reducción de emisiones en función de dicho balance.

No obstante, diversos estudios subrayan la importancia de una definición precisa de la HC para que su estimación sea coherente y útil en la evaluación de emisiones, así como en la toma de decisiones orientadas a su reducción (Wright *et al.*, 2011). Enríquez *et al.* (2020), señalan que el propósito de la HC es identificar puntos críticos de emisión, optimizar procesos productivos, ajustar insumos y mejorar prácticas en transporte, distribución y almacenamiento de productos. Este indicador tiene gran importancia para evaluar el desempeño ambiental en sistemas agrícolas para identificar los procesos con mayor oportunidad de mejora (Liu *et al.*, 2022).

La producción de café es de gran relevancia económica y ambiental a nivel global (Aguilar, 2012). México es el décimo mayor productor a nivel mundial (OIC, 2021), con el estado de Chiapas como líder nacional, abarcando una superficie cultivada de 243 954.77 ha (SIACON-SAGARPA, 2024). En particular, la región Frailesca en la Sierra Madre de Chiapas, con sus condiciones agroclimáticas favorables para el café, permiten su cultivo bajo sistemas agroforestales, que funcionan como sumideros de GEI al capturar CO<sub>2</sub> (van Rikxoort *et al.*, 2014, Soto y Aguirre, 2015). Estos sistemas agroforestales tienen un alto valor para el medio ambiente, ya que, al integrar árboles y vegetación múltiple al cafetal, compensan las emisiones de GEI reduciendo la HC (Lara *et al.*, 2024). Sin embargo, aunque estos sistemas tienen un gran valor productivo y ambiental, existen pocos estudios enfocados en evaluar su HC.

El objetivo de este estudio fue evaluar la HC de la cadena productiva del café bajo sombra, desde la producción a nivel de parcela hasta su comercialización en dos modalidades: exportación como café verde y mercado local como café molido. Asimismo, se identificaron las fases y actividades con mayores emisiones de GEI y proponer estrategias de optimización para reducir la HC en este sistema de producción café orgánico bajo sombra.

## 3.0. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Área de estudio

La organización de pequeños productores de café Finca Triunfo Verde (FTV) se integra de 365 socios que cultivan café orgánico bajo sombra, distribuidos en 32 comunidades de los municipios Ángel Albino Corzo, La Concordia, Monte Cristo de Guerrero, Villa Corzo, Capitán Luis A. Vidal, Honduras de la Sierra, Siltepec y Chicomuselo, del estado de Chiapas, México (Figura 1).

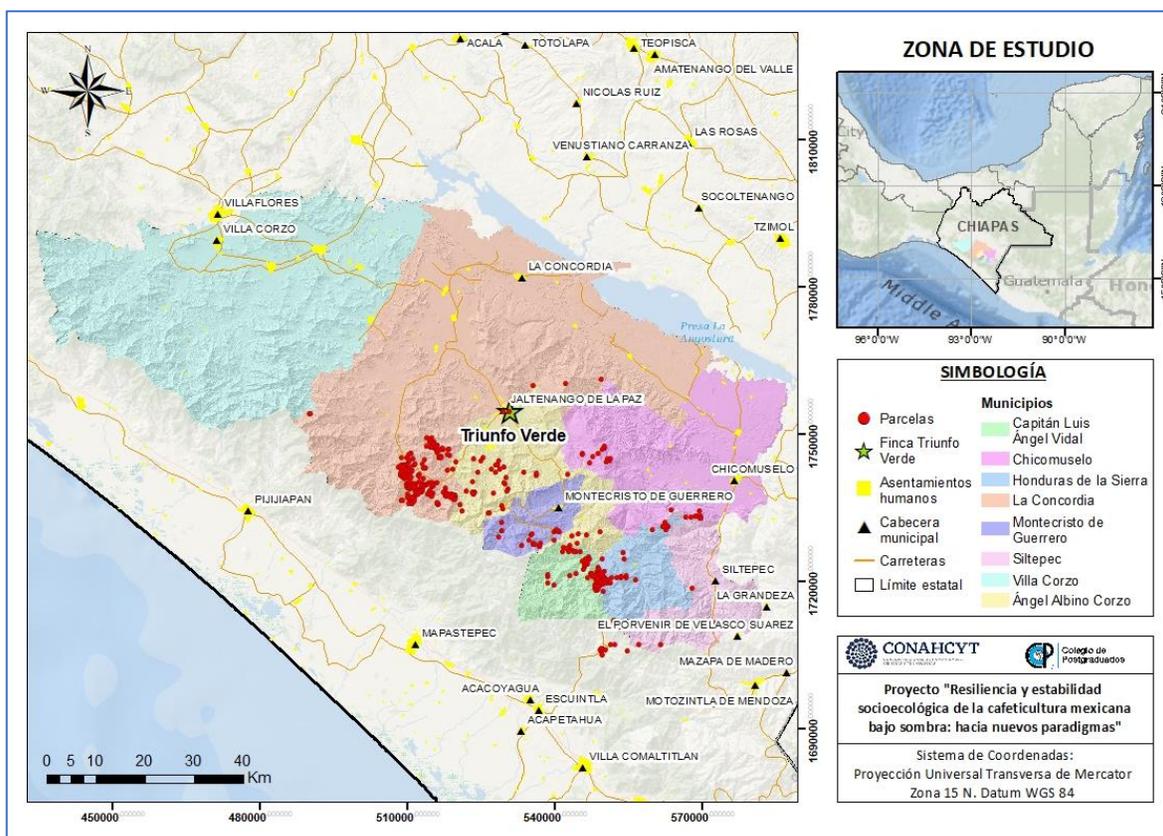


Figura 1. Zona de estudio: municipios, comunidades y distribución de parcelas que integran la Finca Triunfo Verde S.C. Fuente: elaboración propia.

Los climas predominantes en la región de estudio son templado húmedo en las zonas de mayor altitud de la Sierra Madre, templado subhúmedo en las áreas intermedias, y semicálido a cálido subhúmedo en las planicies. Las lluvias se concentran en verano, desde finales de mayo hasta principios de octubre (Salinas, 2009, INEGI, 2010). La temperatura media anual oscila entre 14 y 26° C, mientras que la precipitación media anual varía entre 1100 y 4000 mm.

El área de estudio se caracteriza por tres tipos de relieve: crestas alargadas por arriba de los 2,000 msnm, un macizo montañoso con pendientes fuertes a escarpadas entre 1,000 y 2,000 msnm, y laderas con pendientes moderadas a fuertes por debajo de los 1000 msnm. Los suelos predominantes son litosol, acrisol, luvisol, fluvisol, cambisol y leptosol (SEMARNAP, 1998).

### 3.2. Información recopilada

La recolección de datos de las unidades de producción se realizó entre julio y octubre de 2023. Durante la temporada de cosecha (11 al 25 de febrero de 2024), se registraron las fases y actividades del proceso de producción. La información fue obtenida mediante entrevistas a productores socios de FTV y a técnicos involucrados en el proceso de transformación del café. Además, se realizaron visitas a diversas comunidades para complementar los datos y documentar los procesos productivos. La información también incluyó fichas técnicas de 458 parcelas gestionadas por 365 productores, que detallan las prácticas de manejo específicas para cada una.

En la etapa de beneficio húmedo, se registró el tiempo de operación de los motores eléctricos y de gasolina para calcular el consumo de energía y combustible. Además, se realizaron aforos para medir la cantidad de agua utilizada y se tomaron muestras de agua, antes y después del proceso de despulpado, para analizar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la concentración de nitrógeno total.

Las muestras de aguas fueron analizadas en el Laboratorio de Ciencias ambientales del Colegio de Postgraduados. La DBO se determinó utilizando el método Winkler modificado con la adición de ácido de sodio, de acuerdo con las recomendaciones de APHA, AWWA y WEF (2005). La concentración de nitrógeno total se determinó por el método de Kjeldahl, que es el estándar para muestras de aguas residuales (Trikilidou *et al.*, 2020).

### 3.3. Estimación de huella de carbono por fases del proceso de producción de café

La estimación de las emisiones de GEI se realizó conforme al protocolo basado en las directrices del IPCC (2006, 2019) y la norma británica PAS-2050 (2008 y 2011). El estudio abarcó desde el manejo de la parcela hasta la comercialización, identificando y cuantificando tanto las emisiones directas como indirectas asociadas a cada fase.

Para cada actividad, las emisiones de GEI se calcularon multiplicando factores de emisión (FE) específicos por los datos de actividad medidos (DA), y se convirtieron a dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) utilizando el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) según la Ecuación (1), en línea con las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI (IPCC 2006 y 2019). Los valores para el GWP en un horizonte de 100 años son: 1 para el CO<sub>2</sub>, 28 para el CH<sub>4</sub> y 298 para el N<sub>2</sub>O, que son los que se utilizaron en este estudio.

$$\text{Emisiones de GEI (CO}_2\text{e)} = \text{DA} \times \text{FE} \times \text{GWP} \quad (1)$$

### 3.4. Datos de actividad (DA)

Los DA representan la cantidad de actividad que genera las emisiones, como el consumo de energía, la aplicación de fertilizantes, el uso de productos industriales y el consumo de gasolina para el transporte. Estos datos se expresan en unidades que dependen de la actividad, por ejemplo, litros de combustible consumido, kilómetros recorridos, kilogramos de producto aplicado o litros de aguas residuales derivadas del beneficio húmedo.

Las actividades emisoras de GEI se agruparon por fases del proceso productivo (Figura 2). La primera fase va desde el manejo de la parcela hasta la cosecha del café cereza. La segunda fase cubre las actividades del beneficio húmedo, hasta la obtención del café pergamino. La tercera fase comprende el acopio del café pergamino, su trillado y el proceso del café molido destinado a la venta en la cooperativa (tostado, molido y empaquetado). En el caso del café para exportación, esta fase contempla el acopio, trillado y transporte al puerto de Veracruz.

Para estandarizar los datos a la unidad funcional de café empleada en este trabajo (kg de café verde) en las diferentes actividades, se utilizaron factores de conversión para un quintal de café pergamino (57.5 kg de café pergamino) que equivale a 270 kg de café cereza. Después del secado y trillado, un quintal equivale a 46 kg de café verde u oro.

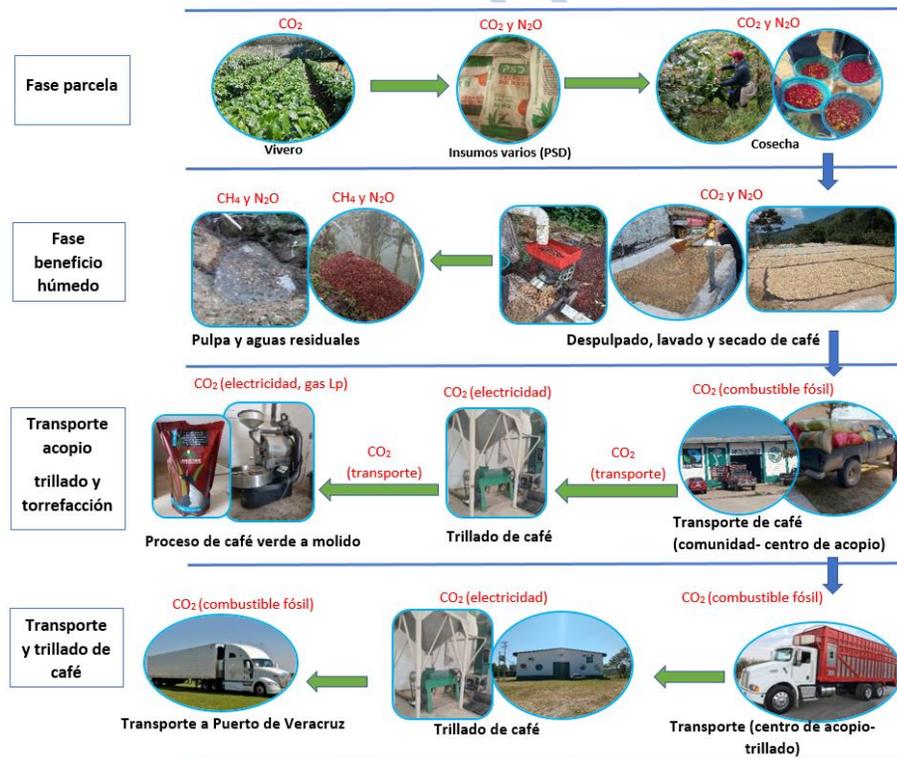


Figura 2. Diagrama de las actividades que emiten GEI por fases de la cadena productiva. Fuente: elaboración propia. PSD (Fertilizante orgánico: Potencializador Solubilizador Dihidro), CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono, CH<sub>4</sub>: Metano, N<sub>2</sub>O: Óxido Nitroso).

Las actividades identificadas en las que se emiten GEI en cada fase, así como sus unidades de medida se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Actividades consideradas en el análisis de la huella de carbono.

Actividades/fuentes de emisiones de GEI en la producción de café	Unidad de medida
<b>Fase parcela nivel parcela</b>	
Bolsa para planta en vivero	kg
Transporte de insumos	L
Aplicación de PSD	kg
<b>Fase beneficio húmedo</b>	
Aguas residuales óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	L
Aguas residuales metano (CH <sub>4</sub> )	L
Descomposición de la pulpa	kg
Gasolina y electricidad para despulpa	L (gasolina), kWh (energía eléctrica)
<b>Fase de acopio y torrefacción</b>	
Transporte de pergamino a FTV, centro de acopio-trillado-torrefacción)	L
Electricidad en instalaciones de FTV. (torrefacción y luz de oficinas)	kWh
Bolsas de envasado de café	kg
Gas LP (tostado)	L
<b>Fase de trillado y transporte (embarque)</b>	
Transporte a centro de trillado y puerto de Veracruz	L (Diésel)
Bolsas de polipropileno	kg
Trillado de café	kWh

Fuente: elaboración propia

### 3.5. Factores de emisión (FE)

Los FE son coeficientes que establecen la relación entre la cantidad de un GEI liberado a la atmósfera con las actividades que los generan (IPCC, 2006). Estos factores se expresan en términos de unidades de masa de GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, o N<sub>2</sub>O). La unidad de referencia puede ser el peso, volumen, distancia o la duración de una actividad (Aguilar, 2012). Los FE utilizados en este estudio se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Factores de emisión (FE) usados.

Fuente de emisión	+FE	Unidades	Fuente
<b>Combustibles fósiles</b>			
Gasolina	2.33	kg CO <sub>2</sub> e L <sup>-1</sup>	IPCC-2006
Diésel	2.83	kg CO <sub>2</sub> e L <sup>-1</sup>	IPCC-2006
Gas LP	0,604	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup>	Factor CO <sub>2</sub> y Netherlands Development Organization [SNV], 2015
<b>Fertilizante orgánico nitrogenado</b>			
Carbono	3.67	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup> de C	(IPCC, 2006)
Carbonato de calcio	0.12	kg C kg <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	(IPCC, 2006)
Carbonato de Magnesio	0.122	kg C kg <sup>-1</sup> de MgCO <sub>3</sub>	(IPCC, 2006)
Nitrógeno	0.10	kg N <sub>2</sub> O kg <sup>-1</sup> N	(IPCC, 2006)
<b>Consumibles (kg CO<sub>2</sub>e por kg de producto)</b>			
Plástico	2.1	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup>	Factor CO <sub>2</sub> y Netherlands Development Organization [SNV], 2015
Bolsas de Polipropileno	3.53	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup>	IPCC 2007 GWP
Costales de Yute	0.583		IPCC 2007 GWP
<b>Electricidad</b>			
Programa GEI México	0.3	kg CO <sub>2</sub> e kWh <sup>-1</sup>	Climate Transparency, 2022
<b>Aguas residuales</b>			
DBO	0.000153	kg L <sup>-1</sup>	Medido
CH <sub>4</sub>	0.03	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup> de CH <sub>4</sub>	Pramulya <i>et al.</i> , 2019
GWP de CH <sub>4</sub>	28		IPCC, 2006

Nitrógeno total ( $N_{total}$ )	0.0000711	kg L <sup>-1</sup>	Medido
N <sub>2</sub> O	0.251	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup> de N <sub>2</sub> O	Pramulya <i>et al.</i> , 2019
GWP de N <sub>2</sub> O	298.00		IPCC, 2006
<b>Residuos orgánicos</b>			
GEI Pulpa	0.12	kg CO <sub>2</sub> e kg <sup>-1</sup>	Balma 2018

<sup>†</sup>FE-Factor de emisión. Fuente: elaboración propia

### 3.6. Emisiones por aplicación de fertilizantes

Para estimar las emisiones por la aplicación de Potencializador Solubilizador Dihidro (PSD) en las plantaciones de café, se consideraron las emisiones directas tras su aplicación, utilizando los FE mostrados en el Cuadro 2.

### 3.7. Emisiones por aguas residuales

Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de aguas residuales se estimaron con las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$\text{Para N}_2\text{O: CO}_2\text{e} = (V_a * N_{total}) * \text{GWP de N}_2\text{O} * \text{FE de N}_2\text{O} \quad (2)$$

$$\text{Para CH}_4: \text{CO}_2\text{e} = (V_a * \text{DBO}) * \text{GWP de CH}_4 * \text{FE de CH}_4 \quad (3)$$

El volumen de agua ( $V_a$ ) empleado fue de 50 L para la producción de un kg de café verde (equivalente a 40 L para producir un kg de café pergamino). Estos volúmenes de agua se multiplicaron por la concentración de nitrógeno total ( $N_{total}$ ) o la DBO, y el GWP del gas correspondiente (ver Cuadro 2).

### 3.8. Emisiones por descomposición de la pulpa

Las emisiones de GEI por descomposición de la pulpa se calcularon con la Ecuación (4).

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{PF} * \text{FE por descomposición de pulpa} \quad (4)$$

Los DA correspondieron a la cantidad de pulpa fresca producida (PF), medida en kg, y el FE por descomposición de la pulpa (Balma, 2018).

### 3.9. Emisiones por consumo de combustibles fósiles

Las emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles fósiles están ligadas a las actividades de manejo del cultivo, incluyendo el transporte de insumos y plántulas, así como el uso de motores a gasolina en el proceso de despulpado y el uso de Gas Lp para el tostado de café. Las estimaciones se realizaron tomando en cuenta el consumo total de combustible, basado en las directrices del IPCC (2006).

### 3.10. Transporte del café pergamino

Los cálculos de emisiones por transporte se estimaron con información del consumo de combustible usado por viaje, número de viajes y cantidad de producto transportado. Se consideró la distancia que existen de las parcelas al centro de acopio en la comunidad de Jaltenango de la Paz y la cantidad de café pergamino comprometido para su entrega a la cooperativa, estimando las emisiones para cada productor, y posteriormente, se obtuvo un promedio.

También se incluyeron las emisiones por el transporte del café para su trillado, que se realiza en la comunidad de Independencia, municipio de La Concordia. Para esta actividad se utiliza un camión tipo Torton, con capacidad de 16 Mg de café pergamino de carga promedio, un recorrido de 37 km y un rendimiento de motor de 2.5 km L<sup>-1</sup>. De igual manera, se consideró el transporte de café verde destinado para el proceso a café molido.

Para estimar las emisiones asociadas al transporte hacia el puerto de Veracruz, se consideró un rendimiento del motor de 1.8919 km L<sup>-1</sup> y un consumo total de 370 L de diésel para un trayecto de 700 km. La carga transportada en cada tráiler es de 28 Mg, equivalente a 400 sacos de café verde de 70 kg, más 1 kg por cada costal de yute.

### 3.11. Emisiones por consumo de energía eléctrica

El análisis del consumo de energía eléctrica se basó en cada etapa del proceso de producción de café, con pruebas de funcionamiento realizadas durante la etapa de despulpado. Además, se recopilaron datos de consumo eléctrico de dos instalaciones clave, donde se realiza la torrefacción y las oficinas administrativas, aplicando un FE de 0.3 kg de CO<sub>2</sub> por kWh, conforme al Reporte de Transparencia Climática de 2022 para México (Climate Transparency, 2022).

### 3.13. Procesamiento de la información para la huella de carbono

La información recopilada fue procesada utilizando el *software* Microsoft Excel®. La huella de carbono total se estimó como la suma de las emisiones generadas en cada fase de la cadena productiva del café destinado a la exportación o para mercado local. Además, se calcularon estadísticas descriptivas.

El análisis de incertidumbre se realizó mediante simulaciones Monte Carlo con 10,000 iteraciones, siguiendo un enfoque estandarizado para evaluar cómo la variabilidad de las entradas afecta el resultado final. Para ello, se utilizó Python, en particular, las bibliotecas NumPy y Pandas, y Matplotlib para elaborar las gráficas.

#### 4.0. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Emisiones en el proceso de producción de café

El análisis de la HC (Cuadro 3) reveló que la producción de café para exportación genera en promedio 0.909 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, cifra que aumenta a 1.014 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> en el café procesado y empaquetado para mercado local.

En relación con la HC total, Aguilar (2012) reportó que, en cafetales bajo sombra de la misma región de Chiapas en donde se realizó el presente estudio, la producción de café convencional generó 0.33 kg de CO<sub>2</sub>e, mientras que la producción orgánica alcanzó 0.11 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde. La diferencia entre ambos sistemas de producción se atribuyó al uso de fertilizantes nitrogenados en la producción convencional. Las emisiones reportadas por Aguilar (2012) son menores a las obtenidas en este estudio, lo que se atribuye a que no consideró las emisiones de GEI generadas por la descomposición de la materia orgánica de la pulpa y las aguas mieles.

De manera similar, Trinh *et al.* (2020) reportaron una HC comparable a la obtenida en este estudio al evaluar el ciclo de vida del cultivo de café robusta producido de forma orgánica y convencional en Vietnam, utilizando como unidad funcional 1 kg de café verde. Sus resultados mostraron que el sistema intensivo convencional tuvo el mayor impacto, con 0.935 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, seguido del sistema convencional moderado con 0.729 kg de CO<sub>2</sub>e y el intensivo orgánico con 0.644 kg de CO<sub>2</sub>e. Las diferencias en la HC se debieron al uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas convencionales. Por su parte, Ortiz *et al.* (2017) reportaron una HC de 1.08 kg CO<sub>2</sub>e, aunque utilizaron como unidad funcional un kg de café cereza, en un sistema de producción en Kenia.

Por el contrario, Arias *et al.* (2018) reportaron emisiones superiores a las del presente estudio, de 2.17 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café pergamino, siendo la fertilización nitrogenada, el transporte y el consumo de combustibles fósiles las actividades con mayores emisiones de GEI. Asimismo, Hernández *et al.* (2018) determinaron una HC de 2.17 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde en Colombia. Por su parte, Alborroz (2017) calculó una HC de 3.42 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde en un sistema de café convencional en Honduras. Las emisiones relacionadas con el uso de fertilizantes, diésel y metano generado por aguas mieles en las lagunas de oxidación tuvieron el mayor impacto, con 1.74 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> café verde.

Asimismo, Van Rikxoort *et al.* (2014) reportaron que, en el policultivo tradicional y comercial, las emisiones oscilaron entre 6.2 a 7.3 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café pergamino. En contraste, para sistemas de monocultivo bajo sombra y sin sombra, las emisiones variaron entre 9.0 a 10.8 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café pergamino. Finalmente, Nab y Maslin (2020) reportaron una HC de 14.61 kg/CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde en un sistema de producción convencional, mientras que para la producción sostenible fue de 3.51 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup>, ambas cifras superiores a lo estimado en este estudio. Las HC reportadas en los estudios de Nab y Maslin (2020) y Van Rikxoort *et al.* (2014) son significativamente mayores a las reportadas en este trabajo, lo que podría explicarse por el uso de fertilizantes y pesticidas en la fase de cultivo, el uso de combustibles fósiles en la fase de beneficio y, en gran medida, al uso de aviones de carga para el transporte del café de exportación.

Cuadro 3 Estadísticas descriptivas de actividades/insumos de emisiones de GEI en el proceso de producción de café.

Actividad	NP	Mínimo	Mediana	Máximo	Mediana	DS	Intervalo de Confianza (95%)
<b>Fase parcela</b>							
Bolsa de plástico (vivero)	100	0	0.012	0.303	0	0.031	0.000 - 0.081
Transporte de insumos	115	0	0.048	0.992	0	0.108	0.031 - 0.070
Aplicación de PSD	17	0	0.020	2.324	0	0.173	0.000 - 0.351
<b>Fase beneficio húmedo</b>							
Aguas residuales (N <sub>2</sub> O)	6	0.015	0.266	0.516	0.262	0.174	0.196 - 0.325
Aguas residuales (CH <sub>4</sub> )	6	0.005	0.006	0.008	0.007	0.001	0.004 - 0.008
Descomposición de la pulpa (CH <sub>4</sub> )	8	0.130	0.289	0.235	0.143	0.035	0.189 - 0.378
Combustible (despulpado)	458	0.004	0.015	0.015	0.015	0.001	0.018 - 0.022
Bolsas de polipropileno	458	ND	0.013	ND	ND	ND	ND
<b>Fase de acopio y proceso de café molido</b>							
Transporte (comunidad-FTV)	458	0.005	0.176	3.83	0.116	0.276	0.000 - 0.670
Transporte (FTV-trillado-proceso)	ND	ND	0.035	ND	ND	ND	ND
Electricidad en instalaciones de FTV. (proceso de café y luz de oficinas)	ND	ND	0.017	ND	ND	ND	ND
Bolsas de envasado de café	ND	ND	0.067	ND	ND	ND	ND
Gas LP	ND	ND	0.047	ND	ND	ND	ND
<b>Fase de trillado y transporte (embarque)</b>							
Transporte (comunidad-FTV)	458	0.005	0.176	3.83	0.116	0.276	0.000 - 0.670
Transporte (FTV-trillado-puerto de Veracruz)	ND	ND	0.061	ND	ND	ND	ND
Trillado de café	ND	ND	0.002	ND	ND	ND	ND

NP indica el número de parcelas en las que se realizó la actividad. DS indica desviación estándar. ND indica que no se obtuvo la información. Fuente: elaboración propia.

Nota: Los intervalos de confianza (IC) al 95% fueron calculados mediante simulaciones Monte Carlo. En el caso de algunas actividades, como la aplicación de PSD (fertilizante) y el transporte al centro de acopio, los límites inferiores del IC resultaron negativos debido a la alta variabilidad de los datos y la incertidumbre asociada. Dado que las emisiones de gases de efecto invernadero no pueden ser negativas, se estableció un límite inferior de 0 para reflejar una estimación realista.

El análisis de incertidumbre reveló que algunas actividades presentan una amplia dispersión en las emisiones estimadas, lo que sugiere un comportamiento menos predecible y más sensible a las condiciones operativas. En particular, destacan el transporte al centro de acopio, la descomposición de pulpa y las emisiones de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> de las aguas residuales.

En la Figura 3 se muestran las emisiones de todas las fases desglosadas por actividades para la cadena productiva del café destinado a la venta local. De igual forma, en la Figura 4 se ilustran las emisiones de la cadena de producción del café para exportación.

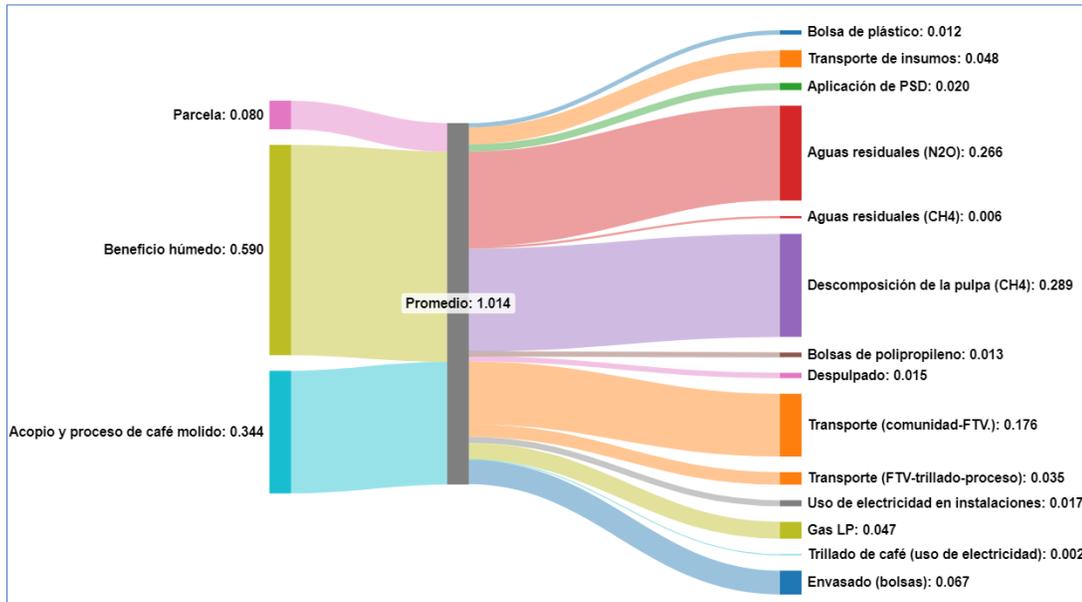


Figura 3. Huella de carbono en la cadena productiva de café para mercado local. Fuente: elaboración propia

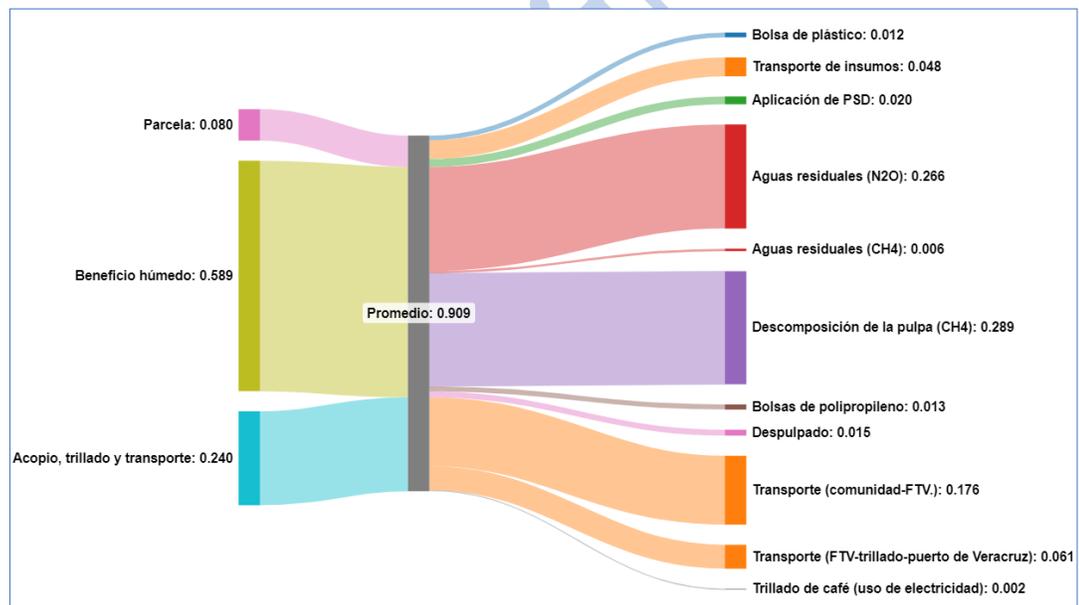


Figura 4. Huella de carbono en la cadena productiva de café para exportación. Fuente: elaboración propia

Las mayores emisiones se registraron en la fase de beneficio húmedo para ambas modalidades de comercialización, con  $0.590 \text{ CO}_2\text{e kg}^{-1}$  de café verde.

#### 4.2. Emisiones en la fase de beneficio húmedo

En la fase de beneficio húmedo, la descomposición de pulpa constituyó la principal fuente de emisiones, con  $0.289 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$  de café verde en forma de metano ( $\text{CH}_4$ ), seguido de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes de las aguas residuales, con  $0.266 \text{ CO}_2\text{e kg}^{-1}$  de café verde para ambos tipos de comercialización (Figura 4).

Pramulya *et al.* (2019) reportaron mayores emisiones de  $\text{CO}_2\text{e}$  en las aguas residuales ( $0.125 \text{ kg de CO}_2\text{e kg}^{-1}$  de café verde) y menores emisiones por descomposición de la pulpa ( $0.015 \text{ kg de CO}_2\text{e kg}^{-1}$  de café verde). Las emisiones

estimadas en este trabajo son mayores que las reportadas por Pramulya *et al.* (2019), lo que podría atribuirse a la mayor cantidad de agua usada para lavado de café en este estudio, a la DBO calculada y al manejo de pulpa.

Por su parte, van Rikxoort *et al.* (2014) informaron emisiones más elevadas para la fermentación de la materia orgánica en la pulpa y las aguas residuales, con un promedio de 4.7 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café pergamino, usando 80 L de agua kg<sup>-1</sup> de café pergamino producido. Albornoz (2017), reportó 0.29 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde en aguas residuales, mientras que Yeomans (2012), informó emisiones de 0.514 kg CO<sub>2</sub> e kg<sup>-1</sup> café verde, ambas cifras por arriba de lo estimado en este estudio. Estas diferencias podrían explicarse por las variaciones en los valores de DBO calculados en función de los sistemas de lavado utilizados.

Las emisiones en conjunto de N<sub>2</sub>O de las aguas residuales y GEI por la descomposición de la pulpa fueron de 0.555 kg de CO<sub>2</sub>e de café verde. Estos resultados superan lo reportado por Pramulya (2019), con 0.14 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, y por Killian (2013) con 0.374 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde.

Finalmente, las emisiones asociadas al uso de combustibles durante el despulpado, bolsas de polipropileno y al CH<sub>4</sub> generado por las aguas residuales fueron de 0.015, 0.013 y 0.006 kg CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, respectivamente, para ambas formas de comercialización del producto.

#### **4.3. Emisiones por el transporte**

Las emisiones totales de GEI por traslado de café durante toda la cadena de producción generó 0.238 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde para exportación, y 0.211 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> para consumo local. Estas cifras reflejan los impactos de diferentes fases del proceso de producción y transporte.

En la fase de acopio, el traslado del café pergamino desde las comunidades, responsabilidad de cada productor, emitió en promedio 0.176 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde. Por su parte, el transporte del café pergamino desde el centro de acopio hacia el centro de trillado y finalmente al puerto de Veracruz en su presentación de café verde, responsabilidad de la cooperativa, generó 0.061 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde (Cuadro 3).

En comparación, Aguilar (2012), reportó solo las emisiones asociadas al traslado al puerto de Veracruz, con 0.06 kg de CO<sub>2</sub>e para la producción convencional y 0.04 kg de CO<sub>2</sub>e para la producción orgánica. Estos valores son muy cercanos a las estimadas en este trabajo. Sin embargo, debe considerarse que estudios como los de Killian *et al.* (2013) resaltan que el transporte internacional puede aumentar significativamente la huella de carbono total, especialmente cuando se usan métodos de transporte aéreo o terrestre en lugar de marítimo.

#### **4.4. Emisiones a nivel parcela**

Las emisiones promedio a nivel parcela para ambas formas de comercialización fueron de 0.080 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde. Nab y Maslin, (2020) reportaron una cifra similar para la producción de café sostenible en Vietnam (0.08 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde) y un valor menor para Brasil (0.05 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde).

Sin embargo, otros estudios reportan estimaciones más altas: Giraldi-Díaz *et al.* (2018) reportaron 0.255 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café cereza; Killian *et al.* (2013), 1.02 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde; mientras que Segura y Andrade (2012) estimaron un rango de 0.5 a 1.1 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde. Por su parte, Noponen *et al.* (2012) informaron emisiones de 0.26 a 0.67 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café cereza en sistemas convencionales y de 0.12 a 0.52 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café cereza para producción orgánica. Las diferencias observadas se atribuyen principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados (Arellano y Hernández, 2023, Trinh *et al.*, 2020).

Las actividades consideradas como fuentes de emisión a nivel parcela incluyeron: el transporte de insumos, con un promedio de 0.048 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, lo que representó el 25.1 % del total a nivel de parcela; la aplicación de fertilizante orgánico (PSD), que generó 0.020 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, aunque este insumo solo se utilizó en el 3.7% de las parcelas; y el uso de bolsas de plástico para plántulas, que aportó 0.012 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, limitado a los productores que tienen su propio vivero (21.8%).

#### **4.5. Emisiones en el proceso de café verde a molido para mercado local**

Las emisiones generadas durante el proceso de transformación de café verde a molido fueron de 0.125 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde. Las principales fuentes de emisión fueron: uso de bolsas de plástico para empacado, con 0.067 kg de CO<sub>2</sub>e; consumo de gas LP durante el tostado, que generó 0.047 kg de CO<sub>2</sub>e; energía para el tostado, con una contribución de 0.0045 kg de CO<sub>2</sub>e; proceso de molido, con 0.003 kg de CO<sub>2</sub>e; uso de energía para trillado de café pergamino con una emisión de 0.0024 kg de CO<sub>2</sub>e; sellado del producto, que aportó 0.0012 kg de CO<sub>2</sub>e; pesado final, con una emisión mínima de 0.00024 kg de CO<sub>2</sub>e.

En la misma fase, Killian *et al.* (2013) reportaron mayores emisiones durante el tostado y empacado, con 0.19 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde y 0.13 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, respectivamente. Por su parte, Segura y Andrade (2012)

estimaron un promedio de 0.380 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde, mayor al de este estudio, lo que se atribuye al uso de leña como fuente de energía para el tostado. Finalmente, Giraldi-Díaz *et al.* (2018) registraron emisiones más altas para este proceso, oscilando entre 1.50 y 2.82 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café molido.

## 5.0. CONCLUSIONES

La Huella de Carbono (HC) promedio total de la organización de pequeños productores Finca Triunfo Verde S.C. fue de 0.909 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde para el producto destinado a exportación (café verde) y 1.014 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde para el café destinado al mercado local (tostado, molido y empaquetado). Se determinó que la fase de beneficio húmedo representó el mayor impacto en ambas modalidades, con emisiones de 0.590 kg de CO<sub>2</sub>e kg<sup>-1</sup> de café verde.

Entre las principales fuentes de emisiones, la descomposición de pulpa representó la mayor contribución individual, con un 31.77 % para el café destinado a exportación y 28.48 % para el mercado local de la HC total. Las emisiones de óxido nitroso de las aguas residuales aportaron un 29.28 % (exportación) y 26.25 % (mercado local). Por su parte, el transporte de café representó el 26.13 % para el café de exportación y el 20.81 % para el mercado local. En conjunto, estas actividades representaron el 87.18 % de la HC del café de exportación y el 75.54 % del café para mercado local, lo que subraya la necesidad de priorizar la mitigación de GEI en estas fases críticas del proceso productivo.

Los resultados indican que es posible lograr una reducción significativa de la HC mediante la adopción de prácticas tales como la instalación de biofiltros para capturar la materia orgánica de las aguas residuales, el compostaje o la biodigestión para el aprovechamiento de la pulpa, la implementación de tecnologías que usen energía solar en el proceso de torrefacción y la optimización de la logística de transporte.

## 6.0. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la cooperativa Finca Triunfo Verde S.C. por su valiosa colaboración en este estudio. Su compromiso con una producción responsable y sostenible destaca como un ejemplo de lo que es posible lograr en la caficultura. Agradecemos por igual al Colegio de Postgraduados y al Conahcyt, por su apoyo institucional y el financiamiento que hizo posible esta investigación, desarrollada dentro del marco del proyecto: 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la caficultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”.

**Fondos.** Pronace Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad del Conahcyt, mediante el Programa Presupuestario F003 “Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado”.

**Declaración de conflicto de intereses.** Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

**Cumplimiento de las normas éticas.** No aplica.

**Disponibilidad de los datos.** Los datos están disponibles a pedido razonable al autor correspondiente ([martinb72@gmail.com](mailto:martinb72@gmail.com)).

**Declaración de contribución del autor (CRediT).** A Villa-Herrera: trabajo de campo, metodología, software, investigación, borrador original, análisis de la información y edición. MA Bolaños González: conceptualización, curación de datos, redacción, análisis de la información y administración del proyecto. F Paz Pellat: revisión y edición. JM Salvador-Castillo: validación, investigación, visualización y redacción. LM Ramírez-Armas: validación, investigación, visualización y redacción. C Villagómez-Jiménez: validación, investigación, visualización y redacción - revisión y edición.

## 7.0. REFERENCIAS

Aguilar, R., 2012. Impacto socioeconómico y ambiental de la certificación orgánica-comercio justo de café (*Coffea arabica*) en la región Frailesca, Chiapas, México. Tesis Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Albornoz, O. A. C., 2017. Huella de Carbono del café (*Coffea arabica*) en Empresa Asociativa Campesina Aruco en Copán, Honduras para el año 2016-2017. Tesis. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.

APHA, AWWA & WEF., 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. Health Association, 21th ed., Washington D.C., USA. 1200 pp.

Arellano, C., Hernández, C., 2023. Carbon footprint and carbon storing capacity of arabica coffee plantations of Central America: A review. Coffee Science, 18:e182072. Doi: <https://doi.org/10.25186/v18i.2072>

Arias, H. J. J., Riaño, H. N. M., Riaño, B. A. M., Ariza, C. W., Posada, S. H. J., Valenzuela, A. J., Vega, C. M. A., Murgueitio, C. Y. P. y Castro, C. J. F., 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. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.2283>.

Balma, M. C., 2018. Comparación de las emisiones de gases efecto invernadero para dos tecnologías de tratamiento de residuos de pulpa de café en Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de las Ciencias de la Tierra y el Mar. Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria. Disponible en línea en: <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/14192>

Climate Transparency. 2022. Climate transparency report. G20 response to the energy crisis: critical for 1.5 °C. Disponible en: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT2022-Summary-report.pdf>

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>

Enríquez, A., González, E., Hara, S. y Laciau, P., 2020. La huella ambiental en las actividades agropecuarias, explorando el balance de gases de efecto invernadero en norpatagonia. *Presencia*, 31(74), 28-32. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/140738>.

Giraldi-Díaz, M.R., De Medina-Salas, L., Castillo-González, E. & León-Lira, R., 2018. Environmental impact associated with the supply chain and production of grounding and roasting coffee through life cycle analysis. *Sustainability*, 10(12), 4598. doi:[10.3390/su10124598](https://doi.org/10.3390/su10124598).

Guerra, A. L., 2007. Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por al grado de: Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental. Costa Rica.

Hernández, J. J. A., Becerra, A. M. R., Camacho, W. A., Suárez, H. J. P., Andrade, J. V., Cano, M. A.V., Cortés, Y. P. M. y Chávez, J. F. C., 2018. Determinación de la huella de carbono en el sistema de producción de café pergamino seco de cuatro municipios del sur del departamento de Huila (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2),109-120, doi: <https://doi.org/10.22490/21456453.2283>.

INEGI., 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (en línea). Consultado 26 sep. 2011. Disponible en <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=07>

IPCC., 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI). 49th session of the IPCC, 8 – 12 May 2019, Kyoto, Japan. Disponible en línea en: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

IPCC., 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Jaisawal, B. y Agrawal, M., 2019. Carbon footprints of agriculture sector. En S. Muthu (Ed.), *Carbon Footprints. Environmental footprints and eco-designs of products and processes* (pp.81-99). Springer, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7916-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7916-1_4)

Lara-Delgado, J.M. *et al.*, 2024. Café y Sostenibilidad: estudio de la Huella de Carbono en la producción y consumo de café. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. Volumen 34, Número 63. *Revista Electrónica*. ISSN: 2395-9169

Liu, C., Plaza-Bonilla, D., Coulter, J. A., Kutcher, H. R., Beckie, H. J., Wang, L., Floc'h, J.B., Hamel, C., Siddique, K.H.M., Li, L. and Gan, Y., 2022. Diversifying crop rotations enhances agroecosystem services and resilience. In *Advances in Agronomy* 173:299–335. Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.007>

- Killian, B., Rivera, L., Soto, M. and Navichoc, D., 2013. Carbon footprint across the coffee supply chain: the case of Costa Rican coffee. *Journal of Agricultural Science and Technology B3*: 151-170.
- Nab, C. y Maslin, M., 2020. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. *Geo Geography and Environment*, 7, 1-19, doi: <https://doi.org/10.1002/geo2.96>
- Noponen-Martin, R.A., Edwards-Jones, G., Haggard, J.P., Soto, G., Attarzadeh, N. & Healey, J.T., 2012. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 151:6-15. doi:10.1016/j.agee.2012.01.019.
- Organización Internacional del Café (OIC)., 2021. Datos históricos de producción de café. Recuperado de <https://www.ico.org/es/what-we-do/world-coffee-statistics-database/>
- Ortíz-Gonzalo, D., Vaast, P., Oelofse, M., Neergaard, A., Albrecht, A. y Rosenstock, T. S., 2017. Farm-scale greenhouse gas balances, hotspots, and uncertainties in smallholder crop-livestock systems in Central Kenya. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 248. 58-70, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.002>
- PAS-2050., 2008. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. CARBON TRUST, Department for Environment Food and Rural Affairs and British Standards. [http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Sector/Energy-- Utilities/PAS-2050/](http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Sector/Energy--Utilities/PAS-2050/)
- PAS-2050., 2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. CARBON TRUST. Department for Environment Food and Rural Affairs. Department of Energy and Climate Change and British Standards. <http://www.bsigroup.com/en/sectorsandservices/Forms/PAS-2050>
- Pathak, H., 2013. Greenhouse gas mitigation in Indian agriculture. *Annals of Agricultural Research*, 34.
- Pramulya, R., Bantacut, T., Noor, E. & Yani, M., 2019. Carbon footprint calculation for Gayo Arabica Coffee primer processing. *International Journal of Scientific & Technology Research* 8(12): 2934-2938.
- Rees, R., Flack, S., Maxwell, K., & Mistry, A., 2014. *Air: Greenhouse gases from agriculture*, 293-304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00088-7>.
- Salinas, R., 2009. Caracterización y diagnóstico en tramos de los ríos Prusia, El Plan, Cuxtepeques, Negrito y el Rosario en la Reserva de la Biosfera "El Triunfo" (REBITRI) y su zona de influencia, Chiapas, México. 94 p.
- Schneider, H., Samaniego, J., 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. LC/W.298. Copyright © Naciones Unidas. Todos los derechos reservados. Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile. 46 p.
- SEMARNAP., 1998. Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera el Triunfo. 109 p.
- Segura, M. A., y H. J. Andrade., 2012. Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea Arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul* 35: 60-77. Disponible en línea en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742012000200005&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742012000200005&script=sci_abstract&tlng=es)
- Skiba, U., & Rees, R., 2014. Nitrous oxide, climate change and agriculture. *Cab Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 9. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20149010>.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesca-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. SIACON-SAGARPA., 2024. [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- Soto, L. & Aguirre, C., 2015. Carbon Stocks in Organic Coffee Systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7: 117-128. doi: [10.5539/jas.v7n1p117](https://doi.org/10.5539/jas.v7n1p117)
- Trikilidou, E., Samiotis, G., Tsikritzis, L., & Amanatidou, E., 2020. Performance of Semi-Micro-Kjeldahl Nitrogen Method – uncertainty and nitrate interference. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102, 6204 - 6214. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1807967>.
- Trinh, L. T. K., Hu, A. H., Lan, Y. C. y Chen, Z. H., 2020. Comparative life cycle assessment for conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 17, 1307-1324, doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02539-5>

van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P. & Rodríguez-Sánchez, B., 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*. 34(4): 887-897. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8>

Wright, L., Kemp, S., & Williams, I., 2011. 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2, 61 - 72. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.39>.

Yeomans, J., 2012 *Carbon footprint Across the Coffee Supply Chain: The case of Costa Rican Coffee* (The case of Costa Rican coffee). Costa Rica. Recuperado de [http://www.balas.org/BALAS\\_2013\\_proceedings\\_data/data/documents/p639212.pdf](http://www.balas.org/BALAS_2013_proceedings_data/data/documents/p639212.pdf)

A Villa-Herrera: <https://orcid.org/0009-0009-3368-2582>

MA Bolaños-González: <https://orcid.org/0000-0002-8110-1051>

F Paz-Pellat: <https://orcid.org/0000-0002-6697-2238>

JM Salvador-Castillo: <https://orcid.org/0000-0002-8814-9891>

LM Ramírez-Armas: <https://orcid.org/0009-0004-5443-4864>

C Villagómez-Jiménez: <https://orcid.org/0009-0006-7822-6175>

En arbitraje