

HUELLA DE CARBONO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE CAFÉ ORGÁNICO BAJO SOMBRA EN LA CONCORDIA, CHIAPAS, MÉXICO

Adán Villa-Herrera¹, Martín Alejandro Bolaños-González^{1*}, José Manuel Salvador-Castillo¹, Luz María Ramírez-Armas¹

¹Posgrado en Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo. Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

*Autor para correspondencia: martinb72@gmail.com

RESUMEN

La producción de café orgánico bajo sombra es una estrategia para mitigar el cambio climático, ya que sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son menores a la del café producido de forma convencional, por lo que su huella de carbono (HC) es pequeña. Se estimó la HC del café cultivado por la cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL en La Concordia, Chiapas, con el objetivo de identificar los puntos críticos para reducir las emisiones de GEI. Se recopiló información en visitas a las 161 parcelas y entrevistas con los propietarios que integran la cooperativa. Además, se midieron datos de actividad durante el beneficio húmedo y se utilizaron los factores de emisión reportados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Las emisiones promedio de GEI en la etapa primaria, desde el manejo de la parcela hasta la obtención del café pergamino, fueron de 0.401±0.079 kg de CO₂ equivalente (CO₂e), destacando la descomposición de la pulpa y las aguas residuales como las principales actividades que contribuyeron a la HC con 0.262 y 0.078 kg de CO₂e, debido a las emisiones de metano y óxido nitroso. Considerando la etapa de procesamiento, desde la entrega del café pergamino hasta el empaque del café molido, la HC fue de 0.415 kg de CO₂e, siendo el tostado el que contribuyó más a la HC de esa etapa del proceso (0.304 kg de CO₂e). La HC promedio de la cadena productiva fue de 0.816 kg de CO₂e, con variaciones entre 0.758 y 1.271 kg de CO₂e. Los resultados mostraron que, a pesar que la HC estimada fue baja, aún tiene margen de mejora, adoptando mejores prácticas en el manejo de las aguas residuales, aprovechando los residuos sólidos de la pulpa y usando energías limpias para el tostado del grano.

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

Citation: Apellido-Apellido NN, Apellido-Apellido NN, Apellido-Apellido N, Apellido-Apellido N. 2023. Título del artículo. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/xxx>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez-Merino

Received: month, year.
Approved: month, year.
Published in Agrociencia #: #-#. 2023.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non- Commercial 4.0 International license.



Los autores no deben realizar ningún cambio en este apartado.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las actividades principales responsables de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, con 34% del total (Crippa *et al.*, 2021). Poore y Nemecek (2018) señalan que la cadena de suministro de alimentos genera cerca de 13.7 mil millones de Mg de dióxido de carbono equivalente (Mg de CO₂e), representando el 26% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI); el 61% de las emisiones de GEI de los alimentos (81% incluida la deforestación) se originan en la parcela. Según el IPCC (2006), las emisiones de GEI han aumentado significativamente las concentraciones atmosféricas desde 1750, lo que está provocando el cambio climático de manera acelerada.

La HC se define como la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera por parte de un individuo, organización, proceso, producto o evento dentro de un tiempo específico (Pandey *et al.*, 2011; Pramulya *et al.*, 2022); se expresa en dióxido de carbono equivalente (CO₂e) (Killian *et al.*, 2013). Para calcular la HC, se considera cada parte de la cadena de valor, desde la producción de materias primas, el transporte y transformación hasta el uso final y la disposición de residuos (Bockel y Schiettecatte, 2018). Noponen *et al.* (2012) explican que la HC se calcula multiplicando las cantidades de insumos que contribuyen al ciclo de vida de un producto (kg de fertilizantes, kWh, L de combustible) por sus factores de emisión (FE), los cuales representan la contribución al calentamiento global en CO₂e. No obstante, los FE se han desarrollado en países industrializados, lo que representa un desafío para países como los dedicados a la producción de café, para calcular sus emisiones de GEI (Noponen *et al.*, 2012; Arias *et al.*, 2018).

A pesar de esta limitación, la HC ofrece una representación detallada de las emisiones de GEI, abarcando desde emisiones de CO₂ hasta mediciones complejas de ciclo de vida (Schneider y Samaniego, 2010). Esta medida ha sido adoptada por empresas para evaluar el potencial de calentamiento global de sus productos. Sin embargo, en el sector agrícola, los desafíos incluyen las diferentes emisiones directas e indirectas que se producen a lo largo de la cadena de valor (Killian *et al.*, 2013, Pramulya *et al.*, 2019). Por ejemplo, se emiten GEI como el CO₂ por el uso de combustibles fósiles, el CH₄ por la oxidación anaeróbica de materia orgánica y el N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados (FAO, 2017).

La unidad funcional empleada permite comparar las emisiones en distintos contextos y etapas del ciclo de vida del café. Algunos trabajos se centran en los estándares de certificación, que solo contemplan las emisiones de GEI en las diferentes etapas de producción del *C. arabica* (Segura y Andrade, 2012). Por otro lado, Killian *et al.* (2013) investigaron todo el ciclo de vida de *C. arabica* en Costa Rica, encontraron una HC de 4.82 kg de CO₂e por kg de café verde, siendo el proceso de consumo final responsable del 44.6% de las emisiones.

Según datos de FAOSTAT (FAO, 2022), en 2022 el *C. arabica* se cultivó en 79 países, abarcando 12 238 976 ha y generando 10 891 219.57 Mg de café verde. México ocupó el noveno lugar en superficie cosechada con 646 804 ha y el decimotercer lugar en producción con 181 706.42 Mg. Sin embargo, al analizar el rendimiento, se ubicó en el puesto 64, con 280.9 kg de café verde por hectárea, muy por debajo de China y Vietnam, que registraron rendimientos de 3272.6 y 2979 kg de café verde por hectárea, respectivamente. Durante el mismo año, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022) reportó que en México el café se distribuyó en 14 estados, de los cuales Chiapas fue el mayor productor con el 36.97% de la superficie cosechada, el 37.63% de la producción y el 31.28% del valor total de la producción.

La cafeticultura en Chiapas no solo brinda sustento económico a miles de productores, sino que también representa un modelo de prácticas agrícolas sostenibles. Aunque dominada por la forma convencional de cultivo, con sus consecuencias ambientales como la pérdida de biodiversidad y la contaminación debido al uso de fertilizantes sintéticos (Escamilla, 2007), diferentes regiones de Chiapas han experimentado un giro hacia la producción orgánica bajo sombra.

Este estudio tiene como objetivo cuantificar la HC del café orgánico cultivado bajo sombra por la sociedad cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL, desde las actividades de manejo de parcelas hasta el empaquetado del café molido para su comercialización directa, excluyendo las emisiones administrativas. Según Nab y Maslin (2020) y Arellano y Hernández (2023), comprender las emisiones a lo largo del ciclo de producción es crucial para avanzar hacia la sostenibilidad del café, mejorando tanto las prácticas agrícolas como los sistemas de gestión ambiental. Se espera que los resultados obtenidos no solo informen a consumidores y comercializadores sobre el impacto ambiental del café orgánico de la cooperativa, sino que también se identifiquen puntos críticos para reducir las emisiones de GEI y proponer prácticas para tal fin, promoviendo así un modelo más sostenible y replicable para otras cooperativas y productores interesados en mejorar su HC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la cooperativa de café orgánico Comon Yaj Noptic SPR de RL, con sede en la comunidad de Nuevo Paraíso, La Concordia, Chiapas. Fundada el 19 de mayo de 1995, esta cooperativa cuenta con la participación de 141 productores que gestionan 161 parcelas en 12 comunidades (Figura 1).

De acuerdo a los datos de la estación climatológica 00007037 Finca Cuxtepeques (SMN, 2023), ubicada a 15°43' 43" N, 92°58'08" W y 1550 m de altitud (Figura 1), la temperatura promedio de la zona es de 22.4 °C con una precipitación media anual de 2151.3 mm.

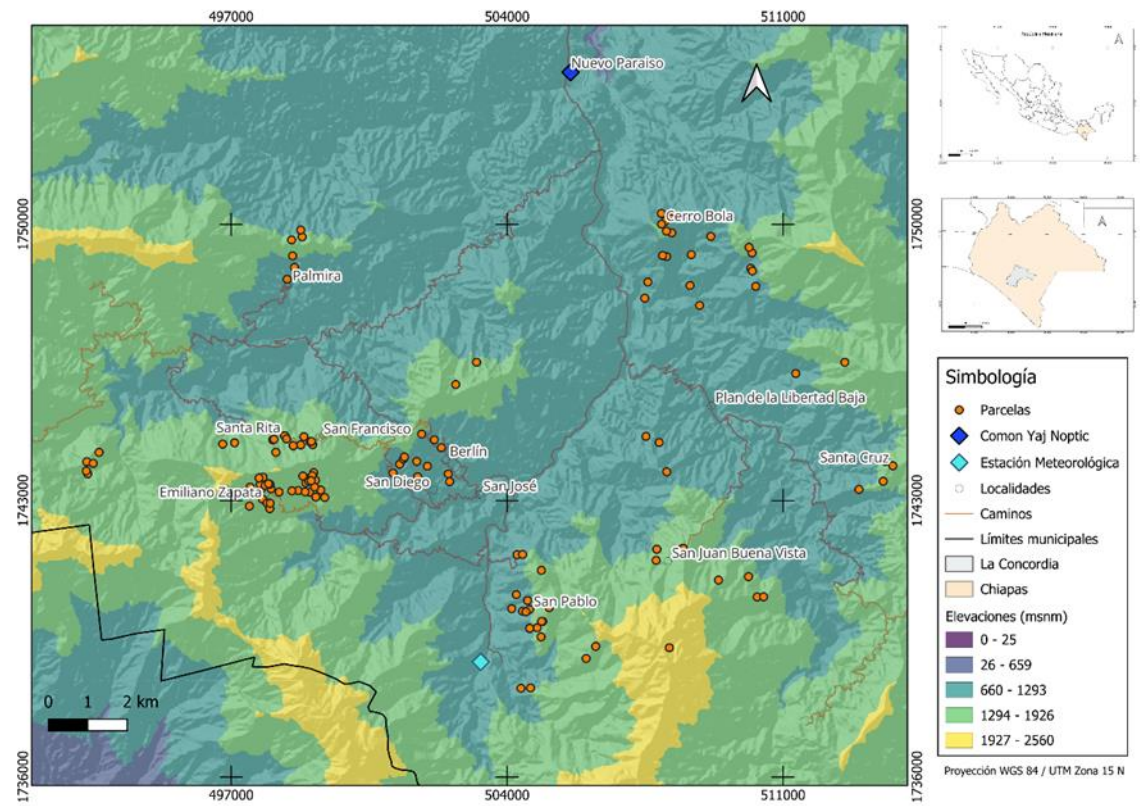


Figura 1. Ubicación de las parcelas y las principales comunidades de la zona de estudio. 2
Fuente: elaboración propia. 3

El reconocimiento de las unidades de producción y la primera etapa de recolección de datos 4
del cultivo se realizaron de julio a octubre de 2022. Después, en febrero de 2023, se efectuó 5
una segunda etapa de recolección de información para identificar las prácticas relacionadas 6
con la cosecha, el beneficio húmedo y el procesamiento del café pergamino. En ambas 7
etapas se realizaron entrevistas detalladas a los productores y se analizaron las fichas 8
técnicas que permitieron conocer el manejo específico de cada parcela de café (fertilización 9
y transporte de insumos). 10

Etapas consideradas en la estimación de la HC 11

De forma similar al procedimiento seguido por Killian *et al.* (2013) y Nab y Maslin (2020), 12
no se incluyeron las emisiones de GEI por cambio de uso de la tierra, dado que habían 13
pasado más de 20 años desde el establecimiento del cultivo de café. Tampoco se consideró 14
el almacenamiento de carbono de la vegetación y el suelo. Para estimar la HC, primero se 15
calcularon las emisiones de GEI de las actividades en la parcela, que incluyeron la 16
renovación de plantaciones, el transporte de insumos y la aplicación de Potencializador 17
Solubilizador Dihidro (PSD). Posteriormente, se evaluaron las emisiones durante el 18
beneficio húmedo, incluyendo el despulpado, la descomposición de la pulpa, las emisiones 19
de las aguas residuales y el transporte del café pergamino hasta la cooperativa. La suma de 20

las emisiones de GEI en estas dos fases correspondieron a la etapa primaria de la cadena productiva de café. Por último, se consideraron las emisiones del procesamiento del grano, que abarcaron el retriado del café pergamino para producir el café verde, para su tostado, molido, pesado y envasado (Figura 2). Las actividades consideradas fueron las siguientes:

- Renovación de plantaciones: Transporte de plantas desde el vivero de la cooperativa hasta la parcela, para volver a plantar arbustos de café que mantengan la productividad.
- Transporte de insumos: Incluye el transporte de composta y PSD desde las instalaciones de la cooperativa hasta las comunidades.
- Aplicación de PSD: Ayuda a promover la salud y productividad de los cafetos, se aplicaron de 50 a 100 g por planta.
- Despulpado: Separación de los granos de café de la pulpa utilizando despulpadoras mecánicas con motores a gasolina y eléctricos.
- Emisiones por descomposición de pulpa y aguas residuales: Después del despulpado, los granos de café se lavaron para eliminar cualquier residuo de pulpa. Este proceso generó aguas residuales que emiten metano (CH₄) al medio ambiente. Además, las deposiciones de pulpa del café en el sitio o en la parcela también emiten GEI.
- Trillado: Eliminación de la capa del café pergamino utilizando maquinas trilladoras con motor eléctrico (5 HP), para producir café verde.
- Tostado: Los granos de café verde se tostaron a temperaturas controladas. Se utilizó gas LP para el tostado y electricidad para el funcionamiento de un motor (2 HP) que mueve los granos de café para lograr un tostado uniforme.
- Molido: Molienda de los granos tostados para producir café en polvo. Se usó un molino eléctrico (3 HP).
- Empaquetado: Empaquetado en envases para su distribución y venta. Se utilizó una máquina empaquetadora y una báscula electrónica de pesado (modelo BAR-8).

Todas las emisiones de GEI se normalizaron a la unidad funcional definida, tal como lo realizaron Trinh *et al.* (2020). Se determinó que eran necesarios 4.7 kg de café cereza para obtener 1 kg de café pergamino y 1.28 kg de café pergamino para generar 1 kg de café verde. Estas cifras fueron semejantes a los 5 kg de café cereza para obtener 1 kg de pergamino y 1.25 kg de pergamino para producir un kg de café verde, reportados por Chéron-Bessou *et al.* (2024). Esta información fue fundamental para dividir las emisiones de GEI de cada etapa y así obtener la HC de cada fuente de emisión específica, tal como lo hicieron Killian *et al.* (2013). Los resultados de la HC para cada actividad se expresaron en kg de CO₂e por kg de café verde producido; sin embargo, para mejorar la comprensión y fluidez del texto, los

resultados de este trabajo se expresan en kg de CO₂e, omitiendo la redundancia de 'por kilogramo de café verde producido'.

Procedimiento para calcular la HC

Las emisiones de GEI se calcularon multiplicando los FE específicos por la cantidad de la fuente de emisión o los datos de actividad (L de gasolina, kWh de electricidad o kg de PSD).

Los FE utilizados en este estudio se recopilaron de literatura científica referente al tema. Para el nitrógeno, se consideró un FE de 0.01 kg de N₂O kg⁻¹ de N (IPCC, 2006). Para el carbonato de calcio, se utilizó un FE de 0.12 kg C kg⁻¹ de CaCO₃ y de 0.122 kg C kg⁻¹ de MgCO₃ (IPCC, 2006). Las emisiones de CH₄ y N₂O por descomposición de la pulpa se estimaron en términos de CO₂e utilizando un potencial de calentamiento global de 28 g CO₂e g⁻¹ de CH₄ y 298 g CO₂e g⁻¹ de N₂O (IPCC, 2006). Para cuantificar la cantidad de pulpa generada, se aplicó un factor de conversión de 0.41, que representa el porcentaje de pulpa respecto al peso de la cereza (Balma, 2018). Además, se utilizó un FE de 0.120 para las emisiones combinadas de CO₂, CH₄ y N₂O, basado en un promedio de mediciones de 12 beneficios húmedos en Costa Rica (Balma, 2018).

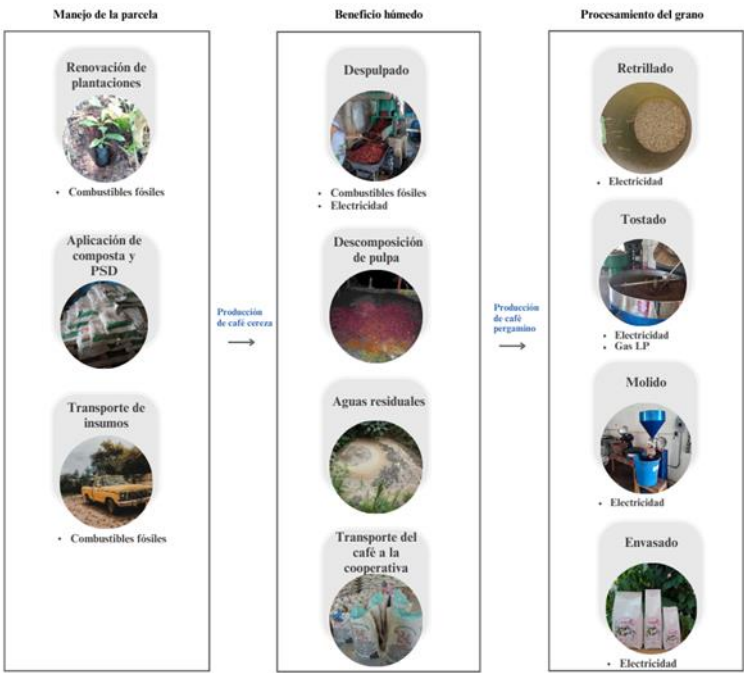


Figura 2. Etapas e insumos del proceso de producción de café. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las emisiones de CH₄ de las aguas residuales, se consideró la cantidad de agua utilizada durante el despulpado (7 L kg⁻¹ de café cereza) determinados mediante aforos en los beneficios húmedos, cantidad que fue 3.5 veces mayor que la reportada por Pramulya *et al.* (2022) y cercana a los 5.39 L kg⁻¹ de café cereza reportado por Maina *et al.* (2015).

Además, se consideró la demanda biológica de oxígeno (DBO) del agua residual ($0.00025 \text{ kg l}^{-1}$), así como un FE de CH_4 de $0.3 \text{ kg de CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café verde.

Para determinar la DBO, se tomaron muestras de agua en la fuente de abastecimiento, el despulpado, el lavado y las fosas de recepción de aguas residuales de cinco beneficios húmedos. Para estimar la HC, se utilizaron los valores de DBO de las muestras tomadas en las fosas de aguas residuales ($0.00025 \text{ kg l}^{-1}$), ya que representan los efluentes del proceso de beneficio completo y, por lo tanto, contienen la mayor carga de sustancias orgánicas (mucílago producto del despulpado y lavado). Las muestras fueron procesadas 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, según las recomendaciones de APHA, AWWA y WEF (2005).

Para estimar la cantidad de gasolina empleada en el traslado de insumos o del café pergamino, se calculó la distancia recorrida desde la comunidad de los productores hasta la cooperativa. Para ello, se utilizó el *software* QGIS versión 3.16.9, bajo el sistema de referencia de coordenadas EPSG:6370 - México ITRF2008 / UTM zona 15N, y un rendimiento promedio del vehículo de 8 km l^{-1} . El FE de la gasolina fue de $2.33 \text{ kg CO}_2\text{e L}^{-1}$ (IPCC, 2006).

En el caso del rellado, tostado, pesado y empacado, se revisaron las características de las máquinas utilizadas y se estimó la cantidad de electricidad empleada para procesar una tonelada de café verde. Se utilizó un FE de $1.595 \text{ kg CO}_2\text{e L}^{-1}$ de gas LP y de $0.3 \text{ kgCO}_2\text{e kWh}^{-1}$, este último indicado para México en el Reporte de Transparencia climática del 2022 (Climate Transparency, 2022).

Análisis de datos

Se construyó una base de datos con la información completa de las 161 parcelas y se estandarizó, convirtiendo el rendimiento a $\text{kg de café verde ha}^{-1}$. La gestión de datos se realizó mediante hojas de cálculo en Excel®. El análisis estadístico se realizó con el programa R (versión 4.3.1) y su interfaz R-studio (versión 2023.6.0.421, R Core Team, 2023). Se calcularon las estadísticas descriptivas con la librería *pastecs* y la función *stat.desc*. Además, se elaboraron gráficos utilizando la librería *ggplot2* y la función *ggplot*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sistema de producción

Las estadísticas descriptivas de las variables asociadas a las parcelas estudiadas proporcionaron una visión integral de las condiciones de producción de café (Cuadro 1). La superficie de las parcelas varió entre 0.50 y 6.00 ha , mientras que la altitud osciló entre 769 y 1846 m . La densidad de siembra varió entre 1050 y $18300 \text{ plantas ha}^{-1}$, indicando diferentes prácticas agronómicas adoptadas por los productores. La magnitud de la

desviación estándar se atribuye al amplio rango de densidad de plantación observado. Las plantaciones tuvieron edades entre 1.7 y 26 años, lo que podría tener implicaciones directas en el rendimiento.

El número de especies de árboles de sombra fluctuó desde 1 hasta 50, con una mediana de 12 especies por parcela. Según la clasificación de sistemas agroforestales empleada por Chéron-Bessou *et al.* (2024), la mayoría de los sistemas estudiados se clasificaron como sistemas agroforestales complejos. La alta cantidad de especies de sombra no sólo beneficia la biodiversidad, sino que también influyen en la captura de CO₂ (Van Rikxoort *et al.*, 2014; Casanova-Lugo *et al.*, 2016) y en la provisión de otros servicios ecosistémicos de regulación, como el ajuste del clima, la erosión, la humedad y la fertilidad del suelo, y el control biológico de plagas y enfermedades (Altieri y Nicholls, 2020).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables analizadas para estimar la huella de carbono.

| Variables | Unidades | Mín. | Máx. | Mediana | Media | Desviación estándar | C. V. |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|---------|--------|---------------------|-------|
| Superficie | ha | 0.5 | 6 | 1.5 | 1.95 | 1.276 | 0.656 |
| Altitud | m | 769 | 1846 | 1429 | 1369.2 | 225.93 | 0.165 |
| Densidad de siembra | Plantas ha ⁻¹ | 1050 | 18300 | 4133.3 | 4574.1 | 2454.86 | 0.537 |
| Edad | Años | 1.7 | 26.0 | 9.3 | 10.1 | 5.465 | 0.542 |
| Especies de sombra | Cantidad | 1 | 50 | 12 | 13.2 | 5.754 | 0.436 |
| Rendimiento | quintales ha ⁻¹ | 1 | 40 | 10 | 12.8 | 8.46 | 0.663 |
| Distancia | km | 12.43 | 32.5 | 22.04 | 21.96 | 5.915 | 0.269 |

El coeficiente de variación del rendimiento fue de 0.663, esta alta variabilidad se atribuye a las diferencias en las prácticas de manejo. Por último, la distancia desde las comunidades hasta las instalaciones de la cooperativa varió desde 12.43 a 32.50 km.

HC durante la fase primaria

En el Cuadro 2 se presentan los valores de las emisiones de GEI específicas de las actividades de manejo de la parcela y del beneficio húmedo, así como el total de estas dos etapas que comprenden la fase primaria.

HC a nivel de parcela

La HC del transporte de insumos tuvo un promedio de 0.0133 kg de CO₂e y una mediana de 0 kg de CO₂e, lo que indica que en la mayoría de las parcelas las emisiones fueron bajas o inexistentes. La desviación estándar de 0.0248 kg de CO₂e refleja cierta variabilidad en los datos. El transporte de insumos contribuyó en promedio con el 3.2% de la HC de la etapa primaria, no es la principal contribuyente a la HC. La variabilidad amplia y las altas emisiones en algunas parcelas indican que existe potencial para mejorar. Estrategias como

eficientizar el transporte o reducir la frecuencia de los viajes podrían disminuir las emisiones en esta fase del proceso, tal como señalan Pramulya *et al.* (2022).

Cuadro 2. HC de las actividades realizadas durante el procesamiento primario.

| Actividad | NP | Mín | Promedio | Máx. | Mediana | D. S | % HC total |
|--|-----|-------|----------|-------|---------|-------|------------|
| kg de CO ₂ e kg ⁻¹ de café verde | | | | | | | % |
| Transporte de insumos | 73 | 0 | 0.013 | 0.193 | 0 | 0.022 | 3.2 |
| Aplicación de PSD | 58 | 0 | 0.027 | 0.272 | 0 | 0.052 | 6.7 |
| Despulpado | 161 | 0.001 | 0.002 | 0.012 | 0.001 | 0.002 | 0.4 |
| Descomposición de la pulpa | 161 | ND | 0.262 | ND | ND | ND | 65.2 |
| Aguas residuales | 161 | ND | 0.078 | ND | ND | ND | 19.4 |
| Transporte de pergamino | 161 | 0.003 | 0.017 | 0.113 | 0.013 | 0.016 | |
| HC en la parcela | 74 | 0 | 0.04 | 0.465 | 0 | 0.072 | |
| HC durante el beneficio húmedo | 161 | 0.341 | 0.359 | 0.455 | 0.356 | 0.016 | |
| HC de la fase primaria | 161 | 0.343 | 0.401 | 0.856 | 0.372 | 0.079 | |

NP indica el número de parcelas en las que se realizó la actividad. ND indica que no se obtuvo la información.

Las emisiones de GEI por aplicación de PSD oscilaron entre 0 y 0.2719 kg de CO₂e, con un promedio de 0.0271 kg de CO₂e y una mediana de 0 kg de CO₂e. La aplicación de PSD aportó el 6.7% de la HC durante la etapa primaria de procesamiento.

En las actividades consideradas a nivel de parcela, se registraron emisiones de GEI en 74 de las 161 parcelas. Estas emisiones oscilaron entre 0 y 0.4654 kg de CO₂e, con un promedio de 0.0404 kg de CO₂e y una mediana de 0 kg de CO₂e, indicando que en muchas parcelas no se presentaron emisiones. La desviación estándar de 0.0717 kg de CO₂e refleja una considerable variabilidad en los datos, lo que sugiere que en algunas parcelas las prácticas pueden mejorar para reducir las emisiones.

El promedio de emisiones estimadas a nivel de parcela (0.0404 kg de CO₂e) fue menor a los reportados en otros estudios: 0.05 y 0.08 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde para el café sostenible producido en Brasil y Vietnam, respectivamente (Nab y Maslin, 2020); 0.2551 kg de CO₂e kg⁻¹ de cerezas de café (Giraldi-Díaz *et al.*, 2018); 1.02 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde (Killian *et al.*, 2013), 0.5-1.1 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde (Segura y Andrade, 2012), 0.26-0.67 kg CO₂e kg⁻¹ de café cereza en un sistema convencional y de 0.12-0.52 kg CO₂e kg⁻¹ de café cereza en el

caso de la producción orgánica (Noponen *et al.*, 2012). Sin embargo, el valor máximo encontrado (0.4654 kg de CO₂e) fue superior a los promedios de algunos de estos estudios, resaltando la importancia de contemplar el manejo específico de cada parcela. Las altas emisiones a nivel de parcela se deben principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados (Arellano y Hernández, 2023; Trinh *et al.*, 2020).

Emisiones de GEI por el beneficio húmedo

El despulpado de las cerezas se realizó con despulpadoras impulsadas por gasolina (8 productores) y por electricidad (153 productores). La HC para las de gasolina fue de 0.0118 kg de CO₂e, mientras que para las eléctricas fue de 0.0012 kg de CO₂e. Se obtuvo una HC global de 0.0017 kg de CO₂e. Esto indica que el tipo de energía usada tiene un impacto significativo en la HC, siendo preferible la eléctrica.

Además, se consideraron las emisiones por la descomposición de la pulpa y las de metano (CH₄) de las aguas residuales. La primera arrojó una HC de 0.262 kg de CO₂e, que representó el 65.2%; mientras que la de CH₄ fue de 0.078 kg de CO₂e, constituyendo el 19.4% de la HC del procesamiento primario.

El beneficio húmedo es una actividad crítica de la investigación, según Chéron-Bessou *et al.* (2024) las condiciones de DBO iniciales del agua pueden influir en las tasas de emisiones de GEI. van Rikxoort *et al.* (2014) señalan que la variabilidad en la HC es una característica notable dentro de los sistemas de producción, que refleja las diferentes prácticas del uso de agua durante la fermentación, el despulpado y la eficiencia en la aplicación de insumos.

Pramulya *et al.* (2019) encontraron que las mayores emisiones de CO₂e resultaron de las aguas residuales (0.125 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde) y, en menor medida, de la descomposición de la pulpa (0.015 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde). En contraste, este estudio mostró mayores emisiones por la descomposición de la pulpa y menores por las aguas residuales (Cuadro 2). Esta diferencia se atribuye a que en la región estudiada el despulpado se realiza en seco, dejando la pulpa para su descomposición en el ambiente, mientras que el agua se usa solo para la fermentación y el lavado, concentrando más material orgánico en la pulpa, por lo que las emisiones de GEI son mayores por la descomposición de esta última. Ambos estudios coinciden en que estos procesos son los mayores contribuyentes a las emisiones de GEI, representando el 65% en el caso de Pramulya *et al.*, (2019)) y casi el 85% en este trabajo. van Rikxoort *et al.* (2014) reportaron emisiones de GEI mayores debido a la fermentación y aguas residuales, en promedio de 4.7±2.8 kg CO₂e kg⁻¹ de café pergamino, con un uso de agua mucho mayor (80 L kg⁻¹ de café pergamino beneficiado) al de este estudio (7 L kg⁻¹ de café verde beneficiado).

El promedio de la HC por el transporte del café pergamino fue de 0.0173 kg de CO₂e, contribuyeron con el 5% de la HC de la etapa primaria de procesamiento. Por su parte, Maina *et al.* (2015) reportaron una HC de 0.036 kg de CO₂e por kg de café pergamino, mayor

que la HC obtenida en este trabajo al aplicar el factor de conversión de pergamino a café verde de 1.28 kg.

La HC durante la etapa de beneficio húmedo tuvo un promedio de 0.3593 kg de CO₂e y una desviación estándar de 0.016 kg de CO₂e, lo que indica consistencia, ya que se utilizaron los mismos valores de agua para el despulpado, DBO y factores de emisión. Para esta etapa, Killian *et al.* (2013) reportaron un valor de 0.48 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde, mayor al promedio encontrado en este estudio. Asimismo, van Rikxoort *et al.* (2014) reportaron valores aún mayores, con una HC de 3.0±2.1 kg de CO₂e kg⁻¹ de café pergamino, con valores mínimos de 0.6 y máximos 7.7 kg de CO₂e kg⁻¹. Nab y Maslin (2020) reportaron valores de 0.08 y 0.10 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde, para el café sostenible producido en Brasil y Vietnam, respectivamente. Los valores bajos de HC encontrados por estos autores se atribuye a que no contemplaron las emisiones de la descomposición de la pulpa de café y las aguas residuales y al tipo de metodología empleada (PAS 2050:2011).

La HC de la etapa primaria, desde el manejo de la plantación hasta la obtención del café pergamino registró valores entre 0.343 y 0.856 kg de CO₂e, con un promedio de 0.401 kg de CO₂e. El coeficiente de variación fue de 19.61%, sugiriendo una variabilidad moderada. Para la misma etapa Pramulya *et al.* (2019) reportaron un valor de HC más bajo (0.341 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde). Por el contrario, otros autores reportaron valores más elevados; 1.05-3.56 kg de CO₂e por kg de café pergamino seco producido (Arias *et al.*, 2018).

HC del procesamiento del grano

La HC total durante el procesamiento del café fue de 0.415 kg de CO₂e. El retrillado contribuyó con 0.013 kg de CO₂e, el tostado utilizando gas LP con 0.304 kg de CO₂e, el molido agregó 0.009 kg de CO₂e, las bolsas de plástico aportaron 0.086 kg de CO₂e, el pesado con 0.001 kg de CO₂e y el sellado con 0.002 kg de CO₂e. La Figura 3 muestra el aporte en porcentaje de cada una de estas actividades. En este trabajo, el tostado presentó una HC mayor, comparado con los 0.19 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde reportados por Killian *et al.* (2013). Sin embargo, las actividades después del tostado fueron menores (0.098 kg de CO₂e) a los 0.13 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde reportados por Killian *et al.* (2013) para el empaclado. En general, la HC por el procesamiento del grano en este estudio fue ligeramente mayor a la reportada por Segura y Andrade (2012), quienes encontraron un promedio de 0.380 kg de CO₂e kg⁻¹ de café verde, con valores mínimos de 0.155 y máximos de 0.653. Esta diferencia se atribuye a que en el estudio de estos investigadores utilizaron leña para el tostado del grano. En contraparte, estos resultados fueron inferiores a los de Giraldi-Díaz *et al.* (2018), quienes reportaron valores de HC de 1.50 y 2.82 kg de CO₂e kg⁻¹ de café molido.

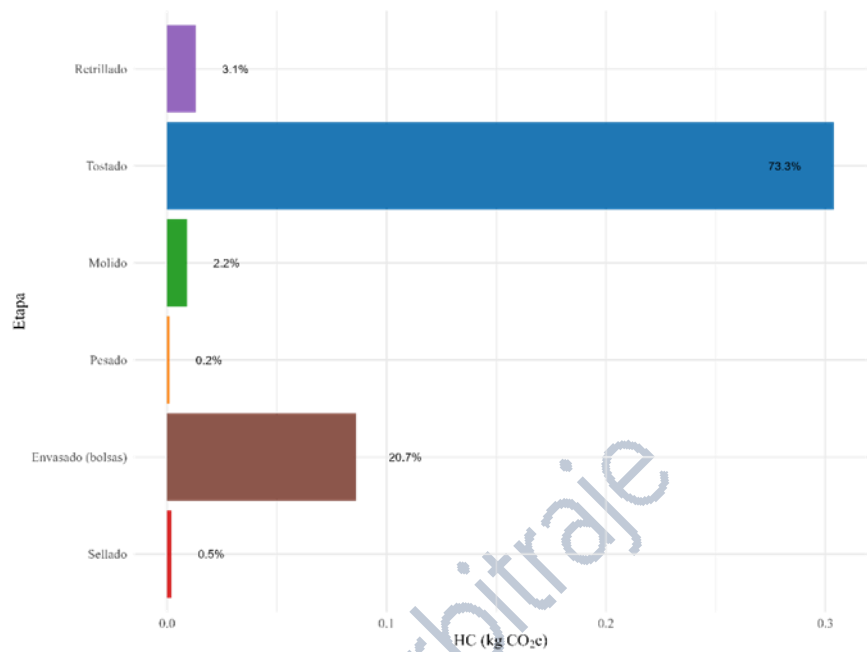


Figura 3. Porcentaje de emisiones de CO₂e durante el procesamiento del café. Fuente: elaboración propia.

HC de la cadena productiva completa

La HC promedio de toda la cadena productiva fue de 0.816 kg de CO₂e, variando entre 0.758 y 1.271 kg de CO₂e. Las principales contribuciones a la HC fueron el tostado, la descomposición de la pulpa, las bolsas de envasado y las aguas residuales (Figura 4). Trinh *et al.* (2020) reportaron valores entre 0.640 y 0.647 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde en un sistema orgánico, menores a los de este trabajo en el que representaron en conjunto el 41.6%, ya que no consideraron las emisiones por la descomposición de la pulpa ni las aguas residuales. Maina *et al.* (2015) reportaron una HC significativamente mayor, de 4 kg de CO₂e kg⁻¹ de café pergamino. Por otro lado, Pramulya *et al.* (2022) encontraron una HC de 1.93 kg CO₂e kg⁻¹ de café verde en 2016 y de 1.48 kg CO₂e en 2015, considerando todo el proceso desde la cosecha hasta el empaque.

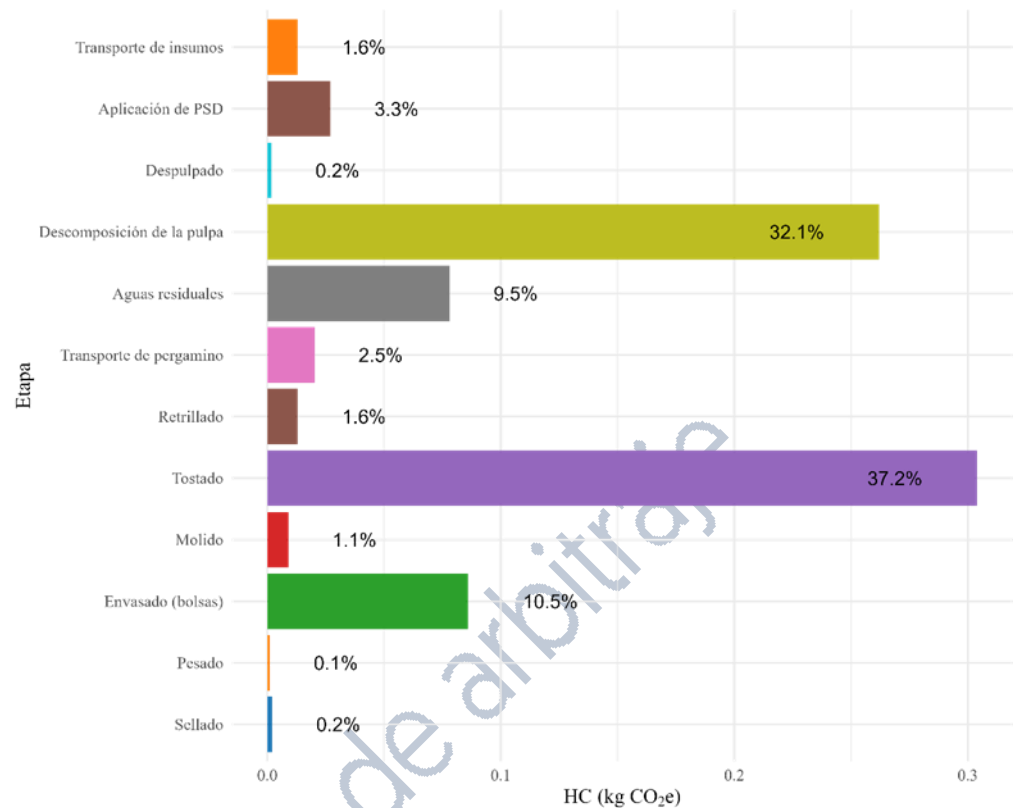


Figura 4. Porcentaje de emisiones de CO₂e durante toda la cadena productiva de café.
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con Maina *et al.* (2015), las diferencias en los valores de la HC pueden atribuirse a las diferencias en los métodos de producción, especialmente en la fertilización. De forma adicional, Pramulya *et al.* (2019) y Noponen *et al.* (2012) señalan que las diferencias en los valores de HC estimados pueden provenir del método de cálculo de la HC, los valores de DBO o los FE empleados.

Los principales focos de emisiones de GEI en este trabajo fueron la descomposición de la pulpa y las aguas residuales. Otro foco significativo fue el tostado del café, que contribuyó con el 37.2% de la HC total. Killian *et al.* (2013) también identificaron las aguas residuales como una fuente importante de emisiones de GEI en el café y propusieron el uso de biodigestores para reducir las emisiones de CH₄ de 0.374 a 0.340 kg de CO₂e por kg de café verde. Van Rikxoort *et al.* (2014) sugirieron que las estrategias de mitigación en la producción de café en América Latina deberían centrarse en: (1) conservar las reservas de carbono en la biomasa y evitar la deforestación, (2) reducir las emisiones de fertilizantes mediante su uso eficiente, y (3) disminuir las emisiones de aguas residuales utilizando métodos de procesamiento en seco o métodos mejorados de procesamiento en húmedo.

CONCLUSIONES

Las variables más relacionadas con la producción de café orgánico cultivado bajo sombra por la cooperativa Comon Yaj Noptic (superficie, altitud, densidad de siembra, edad de la plantación, especies de sombra y rendimiento) presentaron una alta variabilidad. Esto sugiere una marcada heterogeneidad en las condiciones de las parcelas, vinculada a las prácticas implementadas por cada productor, lo cual se refleja en la Huella de Carbono (HC) estimada para cada parcela.

La cadena productiva presentó un promedio de 0.816 kg de CO₂e por kg de café verde producido. El análisis mediante la estimación de la HC en toda la cadena productiva evidenció que, a pesar que esta fue baja comparada con lo reportado en otros estudios, aún tiene margen de mejora, por lo que se requieren emprender acciones para reducir las emisiones en el beneficio, adoptando mejores prácticas en el manejo de las aguas residuales y aprovechando para otros usos los residuos sólidos de la pulpa, así como mediante el uso de energías limpias para el tostado del grano.

AGRADECIMIENTOS

A la cooperativa Comon Yaj Noptic SPR de RL, por su invaluable colaboración en este estudio, pero sobre todo por el trabajo que realizan, demostrando que es posible producir de manera responsable y sostenible. Al Colegio de Postgraduados y al Conahcyt, por el apoyo institucional y financiamiento para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Altieri MA, Nicholls CI. 2020. Agroecology: challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47(3): 204-215. doi: 10.7764/ijanr. v47i3.2281
- Arias-Hernández JJ, Riaño-Herrera NM, Riaño-Becerra AM, Ariza CW, Posada-Suarez HJ, Valenzuela AJ, Vega-Cano MA, Murgueitio-Cortes YP y Castro-Chavez JF. 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>
- 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>
- APHA, AWWA & WEF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. Health Association, 21th ed., Washington D.C., USA. 1200 pp.
- Balma MC. 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>
- Bockel L, Schiettecatte LS. 2018. Lyfe cycle analysis and the carbon footprint of coffee value chains. En P. Lashermes (Ed.), *Achieving sustainable cultivation of coffee* (pp. 359-382). Francia: Burleigh Dodds Science Publishing, doi: <https://doi.org/10.19103/AS.2017.0022.20>
- Casanova-Lugo F, Ramírez-Avilés L, Parsons D, Caamal-Maldonado A, Piñeiro-Vázquez AT & Díaz-Echeverría V. 2016. Environmental services from tropical agroforestry systems. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 22:269-284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- 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. *et al.* 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat Food* 2, 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Chéron-Bessou C, Acosta-Alba I, Boissy J, Payen S, Rigal C, Setiawan AAR, Sevenster M, Tran T & Azapagic A. 2024. Unravelling life cycle impacts of coffee: Why do results differ so much among studies? *Sustainable Production and Consumption* 47:251–266. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.005>
- Escamilla PE. 2007. *Colegio de Postgraduados. Campus Veracruz. M.F. Altamirano, Veracruz. México.* 254 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Adoption of climate technologieS in the agrifood sector. FAO Investment centre Roma. FAO/EBRD Cooperartion. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i7022e/i7022e.pdf>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations data). 2022. FAOSTAT – Crops. Consultado el 30 de enero de 2024. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Giraldi-Díaz MR, 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
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2006. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. Capítulo 10.

- Killian B, Rivera L, Soto M & 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.
- Maina JJ, Mutwiwa UN, Kituu GM and Githiru M. 2015. Evaluation of greenhouse gas emissions along the small-holder coffee supply chain in Kenya. *Journal of Sustainable Research in Engineering* 2(4):111-120.
- Nab C, 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. *Geography and Environment*, e00096. DOI: 10.1002/geo2.96
- Noponen-Martin RA, Edwards-Jones G, Haggard JP, Soto G, Attarzadeh N & Healey JT. 2012. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 151:6-15. 10.1016/j.agee.2012.01.019
- Pandey D, Agrawal M & Pandey JS. 2011. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ Monit Assess* 178:135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Poore J, Nemecek T. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360:6392. DOI: 10.1126/science.aag0216
- 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.
- Pramulya R, Bantacut T, Noor E, Yani M & Romli M. 2022. Life cycle assessment of gayo arabica coffee green bean at Aceh Province. *Habitat*, 33 (3):308-319. DOI: 10.21776/ub.habitat.2022.033.3.29
- R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- 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.
- Segura MA, Andrade HJ. 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

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Fecha de Consulta 20 de septiembre de 2023. 1
Disponble en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chis> 2
3
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesca-Secretaría de Agricultura, Ganadería, 4
Pesca y Alimentación. SIACON-SAGARPA. 2022. 5
https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/ 6
- Trinh-Lien TK, Hu AH, Lan YC, Chen ZH. 2020. Comparative life cycle assessment for 7
conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. International Journal of 8
Environmental Science and Technology 17:1307–1324. DOI: 9
<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02539-5> 10
- Van Rikxoort H, Schroth G, Läderach P, Rodríguez-Sánchez B. 2014. Carbon footprints and 11
carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. Agronomy for Sustainable 12
Development, 34(4), 887-897. DOI: 10.1007/s13593-014-0223-8 13
14
15

En proceso de arbitraje