



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

**INDICADORES ECONÓMICO-AMBIENTALES DE LA
PRODUCCIÓN DE GUAYABA: REGIÓN
CALVILLO-CAÑONES**

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

JOSÉ MARTÍN IBARRA HERNÁNDEZ



Bajo la supervisión de: DR. MARCO ANDRÉS LÓPEZ SANTIAGO

Chapingo, Estado de México, junio de 2026

INDICADORES ECONÓMICO-AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE GUAYABA: REGIÓN CALVILLO-CAÑONES

Tesis realizada por **JOSÉ MARTÍN IBARRA HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:



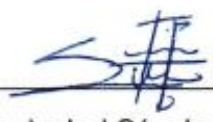
Dr. Marco Andrés López Santiago

ASESOR:



Dr. Ramón Valdivia Alcalá

ASESOR:



Dra. Blanca Isabel Sánchez Toledano

LECTOR EXTERNO:



Dr. Fermín Sandoval Romero

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis	5
1.3.1 Hipótesis general	5
1.3.2 Hipótesis específicas	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Estructura de la investigación	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. Hitos del impacto ambiental de la agricultura.....	8
2.2. El costo de las externalidades.....	15
2.3. Huella de carbono	18
2.4. Huella hídrica	28
2.5 Referencias	33
3. Evaluación económica de la huella de carbono en la producción de guayaba bajo temperaturas adversas en México	42
4. Impacto económico-ambiental de la producción de guayaba en el centro- norte de México	65
5. CONCLUSIONES GENERALES	85

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Potencial de calentamiento global (GWP) de los GEI- Horizonte de 100 años.	11
Cuadro 2. Estrategia y línea de acción para llegar a las cero emisiones de carbono.	13
Cuadro 3. Cuota del impuesto a los combustibles fósiles 2014-2024.	26
Cuadro 4. Huella hídrica de productos agrícolas.	29
Cuadro 5. Fertilizantes nitrogenados empleados en la producción agrícola de México.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Huella de carbono de diferentes productos agrícolas.	24
Figura 2. Precio al Sistema de Comercio de Emisiones en el mundo-2024.	26
Figura 3. Impuestos estatales al carbono en México para el 2024	28

DEDICATORIA

La suma de todos mis esfuerzos a lo largo de mi estadía de Doctorado se resumen en este trabajo de investigación, por lo que la dedico a mi hermosa familia. A mi querida madre Socorro, quien es un ejemplo a seguir de fuerza y amor; a mis hermanas Karina y mi Jenny, a mis hermanos Diego y Leonardo, así como a mi cuñado Antonio y a mis sobrinos Eduardo, Martín, Carlos y Montserrat, quienes me han brindado su más franco amor, su apoyo y afecto incondicional. No ha sido fácil esta travesía, pero ustedes siempre han sido MIS MOTIVOS PARA SEGUIR.

A mi amigo Agustín De Luis, a mi hermosa compañera de vida Carolina Cisneros, a mis amigos de infancia Adrián, César y Daniel, quienes me han dado consejos y brindado su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos y cada uno de los profesores de la Facultad de Economía, por el apoyo y confianza que me han brindado, por su capacidad para guiarme, lo cual ha sido fundamental para el desarrollo de mis capacidades productivas e intelectuales. Les agradezco también el haberme instruido en el ámbito personal y profesional, dos temas fundamentales que me han dejado una gran lección de vida.

Mi más cordial agradecimiento al cuerpo de colaboradores que fueron partícipes en la realización del presente trabajo, en especial a mi profesor y amigo, el Dr. Ramón Valdivia Alcalá; al Dr. Marco Andrés López Santiago, a la Dra. Blanca Isabel Sánchez Toledano y al Dr. Juan Ortiz, ya que con su valiosa experiencia, responsabilidad y conocimientos, me guiaron y orientaron de la mejor manera en todo el desarrollo de este trabajo de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	José Martín Ibarra Hernández
Lugar de nacimiento	Aguascalientes, Aguascalientes
Profesión	Lic. en Economía
Cédula profesional	12852122

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria José María Morelos y Pavón 2010 - 2013
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo 2015 - 2019
Maestría	Universidad Autónoma Chapingo 2020 – 2022
Doctorado	Universidad Autónoma Chapingo 2022 - 2026

RESUMEN

INDICADORES ECONÓMICO-AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE GUAYABA: REGIÓN CALVILLO-CAÑONES

La producción de guayaba (*Psidium guajava* L.) en México, particularmente en la región Calvillo-Cañones, constituye una actividad agrícola de gran importancia económica; sin embargo, los costos ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero y al uso del agua generalmente no se incorporan en la valoración económica del sistema productivo. El objetivo fue estimar y comparar los beneficios económicos de la producción de guayaba con los costos económicos ambientales derivados de su huella de carbono (HC) y huella hídrica (HH), mediante metodologías estandarizadas como PAS 2050-1 carbon footprint standard y el enfoque de la Water Footprint Network. Los resultados mostraron que, aunque la superficie cosechada se redujo, el valor de la producción regional aumentó considerablemente. Se identificó que las principales fuentes de emisiones difieren según el tipo de productor: en los sistemas tradicionales predominan las emisiones asociadas al uso de fertilizantes orgánicos, mientras que en los sistemas industriales destacan las emisiones indirectas de CH₄ y N₂O. El análisis también evidenció que producir un kilogramo de guayaba requiere un volumen considerable de agua, aunque el costo económico asociado a la huella hídrica y a la huella de carbono representó solo una pequeña proporción del valor económico generado por la producción. Se concluyó que los costos de la HC variaron según productor y municipio, sin relación proporcional con el valor productivo. La HH azul predominó en el consumo hídrico, evidenciando dependencia de fuentes gestionadas. Además, el valor económico de la guayaba superó los costos asociados a la HC y HH.

Palabras clave: huella de carbono; huella hídrica; costo ambiental

Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: José Martín Ibarra Hernández.

Director de Tesis: Marco Andrés López Santiago.

ABSTRACT

ECONOMIC-ENVIRONMENTAL INDICATORS OF GUAVA PRODUCTION: CALVILLO-CAÑONES REGION

Guava (*Psidium guajava* L.) production in Mexico, particularly in the Calvillo-Cañones region, is an agricultural activity of great economic importance; however, the environmental costs associated with greenhouse gas emissions and water use are generally not incorporated into the economic valuation of the production system. The objective was to estimate and compare the economic benefits of guava production with the environmental economic costs derived from its carbon footprint (HC) and water footprint (HH), using standardized methodologies such as the PAS 2050-1 carbon footprint standard and the Water Footprint Network approach. The results showed that, although the harvested area decreased, the value of regional production increased considerably. It was identified that the main sources of emissions differ according to the type of producer: in traditional systems emissions associated with the use of organic fertilizers predominate, while in industrial systems indirect emissions of CH₄ and N₂O stand out. The analysis also showed that producing one kilogram of guava requires a considerable volume of water, although the economic cost associated with the water footprint and the carbon footprint represented only a small proportion of the economic value generated by production. It was concluded that hydroponic costs varied by producer and municipality, with no proportional relationship to productive value. Blue hydroponics predominated in water consumption, demonstrating dependence on managed sources. Furthermore, the economic value of the guava exceeded the costs associated with HC and HH.

Keywords: carbon footprint; water footprint; environmental cost

Doctoral Thesis in Agricultural Economics, Universidad Autónoma Chapingo
Author: José Martín Ibarra Hernández
Thesis Director: Marco Andrés López Santiago.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de guayaba manifiesta una amplia aceptación en la población mundial debido a su significativo aporte de vitaminas y minerales que fortalecen al sistema inmunológico (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2019a). Desde la perspectiva del comercio exterior, este cultivo se ha posicionado como uno de los productos hortofrutícolas de considerable comercialización en el mundo, con alrededor de 406,082.02 t para el 2024 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2025).

México es el quinto mayor productor a nivel mundial de este fruto, produciendo 406,082.02 t en 2023, lo que representa un incremento del 59.8% desde el año 2000 (SIAP, 2025). Asimismo, se registró un incremento del 16.6% en la superficie cosechada y del 265.82% en el valor de la producción para el mismo periodo (SIAP, 2025).

Este fruto se extiende en gran parte del territorio nacional, ya sea de cultivo, traspatio o de forma silvestre (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas [SNICS], 2017). Esta expansión consolidó a la región Calvillo-Cañones, como la segunda mayor productora de este cultivo a nivel nacional, con una participación del 37.01% (SIAP, 2025). Esto a pesar de que no cuenta con las características geográficas ni climáticas específicas (piso térmico) para el cultivo de guayaba (SIAP, 2019).

No obstante, debido a su dinamismo económico y a su carácter antropogénico, la agricultura genera impactos ambientales significativos, particularmente en términos de emisiones atmosféricas y consumo de recursos hídricos. Aproximadamente el 30% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) se atribuyeron al sector agrícola (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2023). Asimismo, el Banco Mundial (2024) estima que cerca del 70% del agua dulce disponible a nivel mundial se destina a dicho sector.

Además, desde la perspectiva de las externalidades, Pigou (1920) sostuvo que los impactos ambientales generan distorsiones en el sistema de precios, al no incorporar los costos reales asociados debido a la inexistencia de mercados que los valoren adecuadamente. En esta línea, Goodwin (2007) los caracterizó como manifestaciones de fallas de mercado, señalando la necesidad de que la economía desarrolle mecanismos para internalizar los costos ambientales.

Dado que las externalidades asociadas a la producción de guayaba distorsionan el sistema de precios y, simultáneamente, contribuyen al cambio climático, el análisis de esta problemática adquiere especial relevancia. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo estimar el costo económico-ambiental vinculado a la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones, a partir del cálculo de su huella de carbono (HC) y su huella hídrica (HH).

Por lo anterior, a través de estos indicadores pueden plantearse medidas de política económica-ambiental que pretendan influir sobre las emisiones de gases contaminantes (De Salvo, 2018); para el sostenimiento de las cuencas hidrológicas (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2015); y fomentar la búsqueda de soluciones que impulsen el crecimiento económico sostenible a través de un sistema de precios reales de uno de los cultivos que, a través de la industrialización, manifiesta un significativo flujo comercial tanto en México como en el mundo (Leyva et al., 2023).

1.1 Planteamiento del problema

A pesar de la asignación de recursos técnicos y económicos por parte de organismos internacionales (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2019) y nacionales para mitigar los impactos ambientales de la actividad antropogénica (Rivera, 2023); los países latinoamericanos han visto estancado su desarrollo agrícola asociado con bajos niveles de investigación en el sector (Viteri y Tapia, 2018).

Galina et al. (2023) señalaron que el limitado acceso a recursos financieros y técnicos en estos países restringe de manera significativa el desarrollo de esfuerzos productivos orientados a la investigación agrícola integrada. Esta restricción estructural puede limitar la generación de evidencia científica sólida, reduciendo la disponibilidad de insumos técnicos confiables y dificultando el diseño de políticas agrícolas sostenibles basadas en fundamentos empíricos.

La producción de guayaba presenta un dinamismo productivo y económico positivo para las regiones productoras de México (SADER, 2022); sin embargo, los impactos económicos de las externalidades que se desprenden de esta actividad no han sido internalizados por falta de investigaciones específicas en términos de estimaciones de emisiones de CO_{2e}, lo cual dio pie a la implementación de políticas ambientales ineficientes. Se estima que del 2000 al 2019, las tierras de cultivo en México que permanecen como tal han incrementado la captura de carbono alrededor del 23%, mientras que las tierras convertidas a cultivos han aumentado cerca de 572% sus emisiones para el mismo periodo (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2023).

La región Calvillo-Cañones constituye la segunda zona con mayor producción de guayaba en México. Esta área comprende el municipio de Calvillo, en el estado de Aguascalientes, así como los municipios de Apozol, Huanusco, Jalpa, Juchipila, Moyahua de Estrada, Nochistlán de Mejía, Tabasco y Villanueva, en Zacatecas (SADER, 2019b). Se caracteriza por presentar un alto nivel de tecnificación agrícola y por presentar un piso térmico no óptimo para el cultivo de guayaba (SIAP, 2019).

Ambas características conllevan un impacto ambiental significativo, particularmente en términos del uso de agua dulce y de las emisiones de CO_{2e} asociadas a las prácticas de manejo necesarias para sostener la productividad del cultivo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016a). Para México, el INECC (2018) estima que el sector agrícola es

responsable de aproximadamente el 14 % de las emisiones totales de GEI. Asimismo, la SADER (2024) señala que esta actividad concentra alrededor del 77 % del consumo de agua dulce.

En este contexto, dichos impactos pueden interpretarse como externalidades ambientales; es decir, efectos derivados de la actividad productiva cuyos costos económicos no son contabilizados por los agentes económicos. La omisión de estos costos indirectos tiende a generar distorsiones en el bienestar social (Stiglitz, 2012) y a comprometer la eficiencia en el funcionamiento del mercado mediante la alteración de los precios relativos (Pigou, 1920).

En su conjunto, estos contextos menguan y obstaculizan las posibilidades del cumplimiento de los objetivos medioambientales para alcanzar una huella de carbono neutro y para una adecuada gestión del agua. Al no establecer un punto de partida, como lo es la estimación de la huella hídrica y la huella de carbono, los encargados de la formulación de políticas agrícolas carecen de argumentos sólidos al momento de diseñar estrategias político-económicas de producción agroalimentaria sostenibles.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estimar el costo económico-ambiental asociado a la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones, mediante el cálculo de la huella de carbono y la huella hídrica, con el propósito de contribuir en el avance hacia una producción agrícola sostenible en este cultivo.

1.2.2 Objetivos específicos

Estimar las emisiones de CO₂e generadas en la producción de guayaba de la región de Calvillo-Cañones mediante la huella de carbono.

Estimar el volumen de agua dulce que se destina en la cadena de producción de la guayaba en la región Calvillo-Cañones mediante la huella hídrica.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

La producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones genera externalidades ambientales significativas, reflejadas en emisiones relevantes de CO₂e y en un uso considerable de agua dulce a lo largo de su cadena productiva.

1.3.2 Hipótesis específicas

La producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones genera emisiones significativas de CO₂e, derivadas principalmente del uso de insumos agrícolas y manejo del cultivo.

La cadena de producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones demanda un volumen considerable de agua dulce, asociado principalmente al riego.

1.4 Justificación

La producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones enfrenta diversos retos ambientales asociados a condiciones de aptitud territorial que no siempre resultan óptimas para el cultivo. Dicho lo anterior, la presente investigación se enfocó en estimar el costo económico de la huella hídrica (HH) y la huella de carbono (HC) de la producción de guayaba, con el propósito de generar evidencia que contribuya a la sostenibilidad agrícola de este sistema productivo. La cuantificación de estos indicadores ambientales permite identificar la magnitud del uso de recursos y de las emisiones generadas, lo cual constituye un insumo relevante para el diseño de políticas agrícolas orientadas a reducir los impactos ambientales y económicos del sector.

Asimismo, desde la perspectiva económica, la internalización de las externalidades ambientales, planteada por Pigou (1920) y desarrollada posteriormente por Goodwin (2007), puede contribuir a corregir las distorsiones en el sistema de precios al incorporar los costos ambientales asociados a la producción. Bajo este enfoque, el estudio buscó aportar elementos analíticos que favorezcan la formulación de estrategias orientadas a una producción agroalimentaria más sostenible, coherente tanto con las condiciones ambientales del territorio como con las dinámicas económicas del cultivo de guayaba.

1.5 Estructura de la investigación

La presente investigación se estructura en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta una introducción general del entorno de la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones y la relación que tiene la actividad agrícola con los impactos ambientales; centrándose en los costos económicos de las emisiones de CO₂e y cantidad de agua dulce utilizada.

El segundo capítulo proporciona el contexto histórico de la concientización y estudio del impacto ambiental que genera la agricultura y sus implicaciones en los precios; se revisan y analizan estudios previos que abordan el impacto ambiental agrícola; también, se exponen los principales conceptos y metodologías utilizadas en dichos estudios que dieron pie al análisis de los indicadores ambientales de la huella de carbono y la huella hídrica.

La estructura del tercer y cuarto capítulo está diseñada en forma de artículo científico, en los cuales se estima el costo económico ambiental que generan las externalidades de la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones a través de la huella de carbono y huella de hídrica respectivamente.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La guayaba presenta un significativo crecimiento en su flujo comercial, a tal grado que se ha posicionado como uno de los productos hortofrutícolas con mayor aceptación en el mundo (SIAP, 2022). Este contexto ha incentivado a que su producción se extienda en varias regiones del mundo (ONU, 2023a); así como el análisis del impacto ambiental que se desprende de esta actividad antropogénica (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018).

Ante este panorama de interés medioambiental, la ONU (2023b) señala que sus países miembro, en conjunto con organizaciones no gubernamentales (ONGs), desarrollaron una serie de objetivos con el fin de llegar a un desarrollo sostenible. Una de las metas de estos objetivos de desarrollo sostenible (ODS) orientadas a la agricultura, expone la importancia de las inversiones hacia la investigación y servicios de extensionismo (CEPAL, 2018).

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 2021) señala que el fomento hacia las inversiones en investigación aplicadas al campo es fundamental para abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con la producción agrícola y la gestión de recursos. En este contexto, Díaz y Morejón (2018) manifiestan que atender este reto implica impactos positivos para los productores y para el medio ambiente, esto debido al desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles. En tal sentido, fomentar una producción agropecuaria sostenible, puede equilibrar los impactos ambientales de los modelos agropecuarios tradicionales, y con ello, alcanzar los objetivos medioambientales (Rizo-Mustelie al., 2017).

Lo anterior contextualiza la importancia de una agricultura que, dentro de un marco de crecimiento productivo, fomente prácticas agrícolas resilientes con el medio ambiente. Sin embargo, para alcanzar estos objetivos, primero se es

necesario profundizar sobre aquellos puntos de partida que influyen en el proceso de mitigación del impacto ambiental que genera esta actividad antropogénica.

En lo que a la importancia de estimar parámetros como punto de partida para la toma de decisiones se refiere, Hammond et al. (1995) señalaron que el hacer estimaciones es crucial para una eficaz planificación informada y una optimización de recursos naturales. Por su parte, Perevochtchikova (2013) explica que realizar estimaciones como punto de inicio en el proceso productivo, no solamente es primordial para una gestión adecuada de recursos, sino que también contribuye a la capacidad de adaptación de aquellas decisiones estratégicas.

La estimación del impacto ambiental que se desprende de la agricultura es un campo que ha ido evolucionando. A lo largo del tiempo, se ha agudizado el interés sobre los impactos ambientales de las prácticas agrícolas. Sin embargo, no hay un año o autor en específico con el que se haya comenzado la medición de estos impactos, ya que esta actividad antropogénica es un campo multidisciplinario. Vallejo (2009) destaca que, a partir de los 60's del siglo XX, los temas medioambientales y protección de recursos naturales comenzaron a cobrar relevancia en la agenda de la política económica internacional.

2.1. Hitos del impacto ambiental de la agricultura

Algunos hitos relacionados con el progreso hacia las estimaciones del impacto ambiental que, de manera directa o indirecta ha generado la agricultura, se suscitaron mayoritariamente después de la segunda mitad del siglo XX, estos incluyen:

i) Durante los 60's, la Revolución Verde expuso a la comunidad internacional la influencia que tenían las innovadoras prácticas agrícolas que se venían implementando en esta época y su impacto sobre el medio ambiente, en especial, la erosión (Ceccon, 2008). Al respecto, Carson (2015) enfatizó sobre los efectos

daños que generaban los agroquímicos empleados en estos años sobre la naturaleza; su estudio fomentó los primeros movimientos ecologistas contemporáneos (Mediavilla, 2022). Es importante destacar que, si bien su obra no arrojó cifras concretas, esta siguió impulsando la concientización pública y científica para la comprensión de los impactos que se suscitaban de las relaciones entre la sociedad y el medio ambiente.

ii) Para la época de los 70's, la concientización del impacto ambiental que generaba la actividad humana se agudizó, por lo que comenzaron a plantearse estudios para tratar de comprender dichos impactos (Camargo, 2008). En este contexto, a la actividad agrícola se le asoció como uno de los factores que contribuían en la degradación ambiental, pues esta actividad se basaba en tecnologías destructivas (Ceccon, 2008). Ante este panorama, se comenzaron a realizar investigaciones para evaluar los límites ambientales de las actividades antropogénicas. Al respecto, Ehrlich y Holdren (1971) desarrollaron una herramienta, llamada "capacidad de campo", para evaluar la sostenibilidad del entorno natural de un territorio ante la explotación que la actividad humana hacía sobre este. Sin embargo, esta herramienta abrió paso a diversas discusiones y opiniones sobre los límites naturales de aprovechamiento humano. Ejemplo de ello fue el estudio de Hildyard et ál. (1993); *grosso modo*, encontraron que la capacidad de carga de una región no se limita solamente a las características naturales interiores, sino que ésta también dependía del contexto externo.

iii) Hacia la década de los 80's, se hizo hincapié en el crecimiento económico basado en una producción equilibrada con el medio ambiente. Investigaciones como las de Farman et al. (1985) identificaron la relación del empleo de sustancias químicas y la degradación ambiental; en especial, sobre los efectos adversos que los clorofluorocarbonos tenían sobre la capa de ozono.

A raíz de este tipo de investigaciones, se fueron estructurando enfoques económico-productivos compatibles con los recursos de su entorno. En particular, el término "desarrollo sostenible", popularizado por la Comisión

Brundtland en el informe “Nuestro futuro común” (ONU, 1987). El informe de ésta comisión resaltó la importancia de la responsabilidad de las generaciones actuales y futuras sobre la gestión de los recursos naturales y la protección el medio ambiente para aspirar a un desarrollo sostenible, donde las capacidades innovadoras tecnológicas y científicas se proyectan como el método para lograrlo.

Para evaluar el conocimiento sobre el cambio climático a nivel mundial, en 1988 se creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El IPCC, creado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), además de evaluar la información científica de todo el mundo, es el principal órgano encargado de informar a la comunidad internacional el estado actual de conocimientos sobre el cambio climático: “[...] conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta” (IPCC, 2024).

Desde 1990, México se apega a los criterios científicos y técnicos del IPCC para dar informes a la comunidad internacional de sus emisiones de GEI: “[...] bióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y carbono negro” (INECC, 2018). México y los EE.UU. están dentro de los primeros 10 países con mayor extensión de cultivos en el mundo (eWordTrade, 2021). Estos dos países, aunque con diferentes realidades de desarrollo tecnológico agrícola entre y dentro de ellos, señalan al dióxido de carbono (CO_2), al óxido nitroso (N_2O) y al metano (CH_4) como los principales GEI resultantes de las actividades agrícolas (United States Department of Agricultura [USDA], 2019; INECC, 2018; Environmental Protection Agency [EPA], 2024). Los tres GEI antes mencionados son objeto de análisis por parte de la comunidad internacional debido que contribuyen en gran medida al calentamiento global y al cambio climático (Cuadro 1).

Cuadro 1. Potencial de calentamiento global (GWP) de los GEI- Horizonte de 100 años.

Tipo de GEI	Fórmula química	GWP INECC	GWP EPA	GWP IPCC- 1995	GWP IPCC- 2007
Bióxido de carbono	CO ₂	1	1	1	1
Metano	CH ₄	28	27-30	24.5	25
Óxido nitroso	N ₂ O	265	273	320	298

Fuente: Elaboración propia con datos de INECC (2018), EPA (2024), IPCC (1995), IPCC (2007).

Nota: “El potencial de calentamiento atmosférico expresa la importancia relativa de los gases de invernadero con relación al CO₂ en un horizonte de tiempo determinado. Esto es así, pues los gases permanecen en la atmósfera tiempos diferentes, por lo que el potencial de calentamiento es función de cuán eficiente es el gas para absorber radiación infrarroja y cuánto tiempo permanece en la atmósfera” (SEMARNAT, 2008).

iv) Como resultado de la concientización medioambiental que se venía gestando en décadas anteriores, para los 90's se comenzaron a desarrollar metodologías para estimar y evaluar los impactos ambientales asociados con la agricultura. Una de estas metodologías fue la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), la cual se centró en una evaluación holística de los impactos ambientales potenciales derivados de la generación de productos o servicios (Rodríguez, 2003). Por su parte, Porras et al. (2000) señalaron que, si bien esta metodología contribuía a analizar los impactos ambientales que se generaban a lo largo de la cadena productiva, estos análisis presentarían consecuencias en otras naciones debido a las interrelaciones que estas presentaban. Otros aspectos a destacar que se suscitaron en esta década fueron: las certificaciones ambientales y etiquetas ecológicas (Abarca y Sepúlveda, 2001); el desarrollo de los primeros indicadores de ambientales (Polanco, 2006); así como una planificación y gestión urbana y empresarial con enfoques sostenibles (Jordán y Simioni, 2003).

Hacia las primeras dos décadas del siglo XXI, se fueron adoptando políticas y técnicas agrícolas con un enfoque sostenible; por ende, se fueron desarrollado herramientas y métricas más avanzadas para estimar y evaluar los impactos ambientales que genera esta actividad productiva. Consecuente a esto, Quiroga

(2001) señaló que, si bien estas métricas se encuentran en diferentes niveles de desarrollo en el mundo, sus estimaciones pueden direccionar las estrategias políticas de las naciones y regiones hacia el desarrollo sostenible.

Para celebrar el vigésimo aniversario de la primera conferencia global concerniente al entorno ambiental, en 1992 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), también conocida como la Cumbre de la Tierra de Río, dio paso a adoptar y plantear principios y disposiciones de envergadura global para abordar el tema de los problemas ambientales derivados de la actividad antropogénica, así como de promover el desarrollo sostenible (ONU, 1993). Principales resultados de la Cumbre de Río:

- Líneas de acción del desarrollo sostenible
- Programa 21
- Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo
- Convenio sobre la diversidad biológica
- Declaración sobre los principios de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

En la CMNUCC, se acordaron principios y disposiciones para que los países adopten medidas y estrategias para mitigar los GEI “[...], de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas, [...]” (ONU, 1992). Estas líneas de acción fueron puestas en práctica en el Protocolo de Kioto en 1997 (ONU, 1998). A causa de un proceso de ratificación intrincado, México ratificó el protocolo en el 2000; sin embargo, dicho instrumento entró en vigor a nivel mundial hasta el 2005 (SEMARNAT, 2016b).

La CMNUCC dio paso a la Conferencia de las Partes (COP). Realizada anualmente, en la COP se toman acuerdos en relación al cambio climático, los cuales son de carácter vinculante para los Estados miembro de la CMNUCC

(SEMARNAT, 2017). La ONU (1992) señala, entre otras cosas, que en la COP se examinan los informes e inventarios de emisiones que cada Estado brinda, y con ello, se evalúa el progreso hacia el objetivo último de la Convención:

El objetivo último de la presente Convención y de todo instrumento jurídico conexo que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible (ONU, 1992).

Durante la COP21 realizada en París, se lograron acuerdos vinculantes de largo plazo para mitigar las emisiones de GEI, cuyo objetivo recae en hacerle frente al calentamiento global (ONU, 1992). Asimismo, este organismo internacional manifiesta que el Acuerdo de París insta, como estrategia de desarrollo a largo plazo, a todas las naciones a planificar sus economías en un marco con bajas emisiones de GEI. Esto contempla una diferenciación de los compromisos de planificación ambiental para todos los Estados que son partes de la Convención (SEMARNAT, 2017). El Cuadro 2 expone las estrategias de asistencia y líneas de acción que contempla el Acuerdo de París en apoyo a los países que lo necesitan.

Cuadro 2. Estrategia y línea de acción para llegar a las cero emisiones de carbono.

Estrategia	Líneas de acción
Finanzas	Asistencia financiera para las naciones subdesarrolladas mediante aportaciones voluntarias de los demás países.
Tecnología	Desarrollo y transferencia tecnológica.

Fomento de la capacidad	Fomentar la capacidad de reacción ante el cambio climático de los países subdesarrollados.
-------------------------	--

Fuente: ONU (2015).

El Protocolo de Kioto no solo fomenta la reducción de las emisiones de CO₂ de los países industrializados, sino que también fomenta el desarrollo sostenible de los países en vías de desarrollo (SEMARNAT, 2016b). Este mismo organismo señala que dicha caracterización vinculante promueve estrategias ambientales en México, posicionándolo como la quinta nación que más énfasis hace en el desarrollo de proyectos sustentables. A continuación se presentan las estrategias y políticas que México ha puesto en marcha para mitigar las emisiones de GEI (SEMARNAT, 2021a):

- Ley General de Cambio Climático (LGCC)
- Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC)
- Sistema Nacional de Cambio Climático
- Programa Especial de Cambio Climático (PECC)
- La Economía del Cambio Climático en México
- Comunicaciones Nacionales ante la CMNUCC
- Inventarios Nacionales de Emisiones de GEI
- Programa GEI México
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
- Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de GEI
- Impulso a la eficiencia y tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica.
- Promoción del uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte.
- Programas de adaptación al cambio climático.
- Programas de comunicación y difusión del cambio climático.

Para finales de la segunda década del siglo XXI, el impacto internacional del Protocolo de Kioto ha logrado que: i) los gobiernos establezcan leyes y políticas ambientales, ii) las empresas contemplen al medioambiente en sus tomas de decisiones y iii) estimular los mecanismos para promover los mercados de carbono (SEMARNAT, 2016b). Es en este contexto que se hacen presentes los impuestos pigouvianos y las premisas del Teorema de Coase; pues las medidas que se están adoptando en el mundo para mitigar el impacto ambiental derivado de los GEI van desde un sistema de comercio de emisiones de CO₂, pasando por los derechos de emisión de CO₂ e impuestos sobre las emisiones de CO₂, hasta incentivar la conciencia ambiental empresarial.

2.2. El costo de las externalidades

Al no contar con un mercado definido, Pigou (1920) argumentó que las externalidades conllevan a distorsiones de mercado debido a que estas alteran el sistema de precios; lo que resulta en una asignación ineficiente de recursos dentro de la economía. Para corregir esta falla de mercado, este autor sugirió establecer impuestos y subvenciones sobre la contaminación, los cuales podrían incentivar a las empresas a reducir su nivel de contaminación. En tal caso, las autoridades nacionales serían el órgano regulador de dichas medidas.

El impuesto pigouviano sentó las bases teóricas para el principio “el que contamina paga”, donde el Estado debería crear los mecanismos e instrumentos económicos para internalizar los costos ambientales en las actividades económicas. Este principio hace hincapié en que los agentes económicos que contaminan deben de responsabilizarse de los costos asociados a ella (ONU, 1992).

Si bien, este tipo de impuesto tiene como objetivo mejorar la eficiencia económica al internalizar las externalidades, también plantea algunos inconvenientes. Varian (2010) expresa que el problema del impuesto pigouviano recae sobre la necesidad de comprender el nivel ideal de contaminación para establecerlo

correctamente y garantizar su eficacia; por lo que se elimina la necesidad de ejecutar un impuesto al instruir a los agentes económicos contaminantes de solo producir exactamente dicho nivel.

Otra crítica a los impuestos pigouvianos, pero referente a la intervención del Estado como agente regulador de las externalidades, es que no deberían caer sobre la aplicación de mecanismos de política fiscal para ajustar los precios. Al respecto, Coase (1960) afirma que las externalidades, al ser originadas por falta de claridad en los derechos de propiedad sobre los bienes, serían corregidas con la intervención del Estado, si y sólo si, si este último estuviera limitado únicamente para asignar tales derechos. Bajo este criterio, Coase (1960) expone que “Todas las soluciones tienen costos y no hay razón para suponer que la regulación del Gobierno será beneficiosa, [...]”.

En tal sentido, Coase (1960) propone que para alcanzar una asignación eficiente de recursos entre privados, se debe contemplar dos premisas: i) la no existencia de costos de transacción (o que al menos estos no sean significativos) y ii) la existencia de derechos de propiedad bien definidos (sin importar quien tenga el derecho de propiedad). Bajo este enfoque (teorema), las diversas maneras de asignar los derechos de propiedad mejoran la eficiencia del mercado cuando hay presencia de externalidades (Stiglitz, 2012).

Aunque el teorema de Coase conduce a una solución eficiente entre partes privadas cuando están expuestas a externalidades, la premisa de que los costos de transacción sean cero es un concepto idealizado que difícilmente concuerda con la realidad. Al respecto, Stiglitz (2012) señala que esta premisa solo se daría “en un mundo hipotético” y que, además, la distribución de los derechos de propiedad sería sesgada. Respecto a este último argumento, este mismo autor señala que “el imperio de la ley” crea los mecanismos y condiciones para que los entes económicos privilegiados obtengan beneficios a expensas de los demás. En tal caso, el principio “el que contamina paga” experimenta una metamorfosis hacia una dinámica donde el que paga, tiene licencia para contaminar.

El principio contaminador-pagador no debe recaer en la errada concepción de que al que tiene los recursos económicos para pagar, se le brinden licencias para contaminar. Si fuese así, la sociedad tendría que pagar por los costos externos asociados a las externalidades de quienes las producen. Bajo esas circunstancias, el principio no recae en un problema de fondo, sino de forma. Valenzuela (1991) señala que el principio tampoco busca responsabilizar de dichos costos a los culpables de quienes producen externalidades, sino de internalizar los costos asociados a la prevención y a la mitigación de la contaminación de quienes la producen.

Aunque los impuestos pigouvianos y el Teorema de Coase presentan líneas de acción diferentes para contrarrestar las externalidades negativas, comparten el propósito fundamental de corregir las distorsiones de mercado derivadas de los costos externos de la producción mediante gravámenes por un lado, y derechos de propiedad por el otro.

Stiglitz (2012) hace hincapié en el principio “el que contamina paga” como una forma de corregir las distorsiones de mercado que se desprenden de las externalidades, en particular, gravar a las negativas como la contaminación. Esto conllevaría a que los costos de producción reflejen los costos reales y no a costos distorsionados (Valenzuela, 1991). Asimismo, al internalizar los costos asociados a las externalidades mediante el pago de un canon, las empresas restarían estímulos a aquellas actividades generadoras de externalidades negativas (Stiglitz, 2012); es decir, los agentes productores pueden orientar sus políticas de producción convencional hacia una gestión de producción sostenible.

Aunado a lo anterior, ha surgido la necesidad de generar y desarrollar indicadores que permitan evaluar y cuantificar el impacto ambiental que genera la actividad humana (Páez-Barón et al., 2018). Ante este panorama, la huella de carbono y la huella hídrica fungen como el primer paso en el proceso de conversión agraria-ambiental-económica con miras a una producción de alimentos sostenible; y además, que eviten las distorsiones de mercado generados por externalidades.

2.3. Huella de carbono

La huella de carbono es definida como "la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por nuestras actividades (individuales, colectivas, eventuales y de los productos) en el medio ambiente" (CEPAL, 2023). El cálculo de este indicador medioambiental se alinea a la norma ISO 14.064 (Schneider y Samaniego, 2009). En relación a su estimación, estos últimos autores consideran que este es el primer paso para que los productores agrícolas puedan disminuir o compensar sus emisiones de CO₂. En dicho contexto, este primer eslabón funge como la base esencial de un proceso productivo encaminado a la neutralidad del carbono; el cual, este último, hace referencia al equilibrio entre las cantidades de emisiones de CO₂ liberadas, y las absorbidas o compensadas de estas en un periodo determinado (Masson-Delmotte et al., 2022).

Diferentes organizaciones plantean una serie de pasos para alcanzar la neutralidad del carbono. Al respecto, Frohmann et al. (2012) señalaron que dicho proceso se sustenta en tres actividades específicas: el punto de partida recae en la necesidad de estimar parámetros medioambientales; esto permite cuantificar las emisiones de CO₂e que desprenden las diferentes actividades antropogénicas, así como de identificar las fuentes de emisiones de GEI. Consecuentemente, con la verificación y comunicación de los resultados obtenidos, se busca garantizar la precisión y la fiabilidad de los datos suministrados para evitar notificaciones omitidas o no significativas. Reducir las emisiones de carbono es el segundo paso en este proceso; con los resultados obtenidos, los productores y los encargados de formular políticas pueden establecer estrategias de cooperación que influyan sobre las emisiones de GEI (De Salvo, 2018). Por último, compensar las emisiones de CO₂e que no pudieron reducirse; el remanente de emisiones de GEI se puede compensar a través de inversiones en tecnologías no contaminantes o por el comercio de derechos de emisión (Parlamento Europeo, 2019).

La huella de carbono es un indicador multidisciplinario que involucra diferentes áreas de investigación, generando controversias debido a las diferentes metodologías empleadas (Carballo y García, 2008). Por lo contrario, Perevochtchikova (2013) señala que la concertación entre expertos de diferentes disciplinas es esencial para abordar la complejidad de los indicadores medioambientales. Bajo este último criterio, un enfoque pluridisciplinario permite desarrollar una visión agregada de los desafíos y oportunidades relacionados con las emisiones de GEI, lo cual tendría el potencial de dar pie al desarrollo de estrategias y decisiones eficaces para mitigar los impactos medioambientales.

La estimación de las emisiones de CO₂e se presenta como una herramienta que tiene el potencial de encaminar estrategias económico-agrícolas amigables con el medio ambiente. Ortiz y Delfín (2011) señalan que, además de contribuir con la reducción de la huella de carbono, “Las estrategias y mejora de los procesos agrícolas para reducir las emisiones de carbono, aportan en sí mismas un instrumento de competitividad”. Es decir, dicha estimación agrega valor a los productos que optan por implementar la herramienta; así como de satisfacer la demanda de ciertos consumidores e ingresar a mercados internacionales con ecoetiquetas. Feijoo y Moreira (2020) clasifican las ecoetiquetas según la información que brindan al consumidor:

- Bajos niveles de emisión: Etiquetas que exponen productos eficientes en emisiones de CO₂e.
- Ranking en los niveles de emisión: Etiquetas que clasifican los productos según su nivel de emisiones.
- Puntuación: Etiquetas que indican los kg de CO₂e que emite un producto.
- Carbono neutral: Etiquetas que identifican los productos que compensan sus emisiones de CO₂e.

Para estimar la huella de carbono, se pueden encontrar una gran variedad de metodologías, llamadas “calculadoras de emisiones” (Schneider y Samaniego,

2009); sin embargo, algunas carecen de aceptación científica, exponiéndolas a una dudosa validez (Valderrama et al., 2011). Una de las metodologías que han tenido mayor presencia en las investigaciones relacionadas a la cuantificación de las emisiones de GEI agrícolas es la PAS 2050. Esta métrica se ha estandarizado para cuantificar la huella de carbono de aquellas actividades humanas relacionadas en el sector agrario (Frohmann et al., 2012).

En cuanto a la agricultura tradicional se refiere, investigaciones como las de Guallasamin y Baile (2018) ponen en perspectiva el nivel impacto que ejerce esta actividad sobre el medio ambiente. Estos autores encontraron que los productos agrícolas, en particular los fertilizantes químicos, fueron la fuente con mayor huella de carbono en un estudio sobre el cultivo de rosas. Los resultados de dicha investigación fueron obtenidos mediante las metodologías GHG Protocol y PAS 2050. Otro estudio que implementó la metodología PAS 2050 en la producción agrícola tradicional fue el de Andrade et al. (2015), encontraron que los fertilizantes nitrogenados, empleados en la producción de caña de azúcar de una localidad colombiana, emitieron el 73% de los GEI para ambas metodologías.

Cabrera et al. (2020) estimaron la huella de carbono de uno de los cultivos con mayor presencia en la economía ecuatoriana. Encontraron que la producción de una tonelada de caña de azúcar emite 50 kg de CO₂e, donde los residuos del cultivo emitieron el 49.8% de CO₂e, y la aplicación directa e indirecta de fertilizantes nitrogenados el 48.2%. El resultado encontrado en su investigación arrojó datos de considerable atención. Con base a los GEI que desprende la producción de caña, el N₂O representa el 98% de las emisiones de CO₂e debido a su factor de potencial calorífico 296 veces más que el CO₂.

Si bien, la agricultura convencional practicada en gran parte del siglo XX mostró beneficios en términos de producción y eficiencia, esta es objeto de críticas debido a sus impactos negativos al medio ambiente (Espinoza-Villavicencio et al., 2007). Ante este panorama, se implementaron técnicas de producción agrícola con enfoques más sostenibles que buscan mitigar el impacto

antropogénico; sin embargo, estas prácticas no quedan exentas de emisiones de GEI.

Al respecto, el estudio realizado por López Astudillo et al. (2018) estimaron las emisiones de GEI que desprendía la producción de caña de azúcar en el Valle del Cauca. La investigación comprendió la comparativa de las emisiones de GEI de cultivos desarrollados bajo fertilizantes ureicos y nitrogenados. Estos autores encontraron que tanto los cultivos en transición a ser orgánicos, como los orgánicos, redujeron las emisiones de GEI (71% y 36% respectivamente) respecto a los cultivos comerciales. Referente a esto, López y Hernández (2016) manifiestan que las medidas de adaptación climática referidas al sector agrícola, pueden ser pieza clave en la búsqueda de la mitigación de los GEI.

Otro estudio que comparó la producción agrícola tradicional con una orgánica fue el de Morales et al. (2018). Estos autores encontraron que la producción mecanizada de maíz, camote y yuca realizada en la Costa Desértica Peruana emiten el 1.47% de las emisiones de GEI del sector primario nacional. Aunque su análisis fue realizado en una región en específico, los resultados para dos de sus localidades presentaron diferencias significativas. La producción de los tres cultivos de Barranca presentó mayores emisiones de CO₂e que la localidad de Cañete tanto para el análisis por ha como por t. Es decir, dicho análisis pone de manifiesto que, aunque las dos localidades están en la misma región de producción de maíz, camote y yuca, sus conclusiones deben atenderse por separado. Sin embargo, los estudios agrícolas en México están enfocados y estudiados por regiones generalmente.

La importancia de mantener una agricultura activa es fundamental para los intereses de diferente índole de la sociedad, esto propicia transformar terrenos naturales en campos de cultivo, los cuales también desprenden emisiones de CO₂. Estimar las emisiones (y absorciones) de GEI por el cambio de uso de suelo implica consideraciones específicas en la métrica de la HC agrícola. Para diferenciar la HC entre la producción agrícola y otros sectores productivos de la

economía, la British Standards Institution (BSI, 2012) puso a disposición la metodología PAS 2050-1. Esta herramienta, desarrollada bajo la norma BS ISO 14040 y BS ISO 14044, proporciona una guía detallada que estima las emisiones de CO₂e de la producción de bienes y servicios, específicamente de la cadena productiva de alimentos, abarcando también el uso y cambio de suelo.

Cruz-Ruiz et al. (2012) encontraron que debido al cambio de uso de suelo (de bosque a áreas de cultivo), se pierden más del 55% del carbono secuestrado y más del 40% del nitrógeno total contenido en la MO. Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) señalan que el almacenamiento de carbono depende de la cobertura del suelo; en su estudio encontraron una alta volatilidad en las reservas de carbono en la biomasa sobre el suelo según su uso: 43.8 - 74.2 Mg/ha de almacenamiento de carbono para los sistemas forestales, con una diferencia de rango del 61% - 268% en comparación con los sistemas productivos agrícolas. Dichos estudios ponen de manifiesto que la HC por cambio de uso de suelo no se reduce únicamente a contabilizar las emisiones de GEI, sino también a una parte significativa de almacenamiento de carbono de la biomasa. De acuerdo con la BSI (2012), la metodología PAS 2050-1 emplea las directrices del IPCC para los inventarios Nacionales de GEI para evaluar las reservas de carbono del suelo, tanto anteriores como actuales, así como de la vegetación.

Otras investigaciones de la HC para productos agrícolas en México

Ortiz y Delfín (2011) concluyeron que la certificación ambiental de los productos agrícolas, a través de la HC, permite ser competitivos y abre paso a insertarse en nuevos mercados. Es decir, en una economía cada vez más globalizada, contar con aspectos diferenciadores es clave para mantenerse o posicionarse no solo en el ámbito local, sino también en mercados internacionales. En este marco comercial, estos autores hicieron hincapié en el rol gubernamental como incentivador de la competitividad del sector agropecuario.

Como todo instrumento de política, la certificación ambiental también tiene impactos tanto económicos como ambientales y sociales. En su estudio, Aguilar (2012) encontró que las practicas sostenibles para disminuir la HC fortalecen al capital humana, social y natural de la producción de café. Sin embargo, también señaló que ante la falta de estrategias productivas y gubernamentales, los ingresos de los productores certificados tienen el mismo nivel que el de los productores convencionales. Dicho estudio resalta la importancia de promover prácticas productivas orientadas a la productividad y a la diferenciación, donde las campañas de difusión pueden impulsar dichas prácticas.

Aranda-Arguello et al. (2018) concluyeron que la HC en producción de palma de aceite es baja, por lo que recomendaron incentivar la producción de este cultivo como estrategia alternativa para la venta de bonos de carbono. Es decir, el estudio de la HC no solamente se limita a medir las emisiones de CO₂e que la producción agrícola genera, sino también cuantifica la cantidad que absorbe/captura dicha actividad. Asimismo, a través de esta doble cuantificación (emisiones y captura), se pueden establecer estrategias productivas.

La HC de la agricultura varía dependiendo del cultivo. En el caso de la guayaba, por cada kilogramo producido de este cultivo, se genera en promedio un kg de CO₂e. La Figura 1 muestra las emisiones de CO₂e de algunos alimentos de origen vegetal por kg producido.

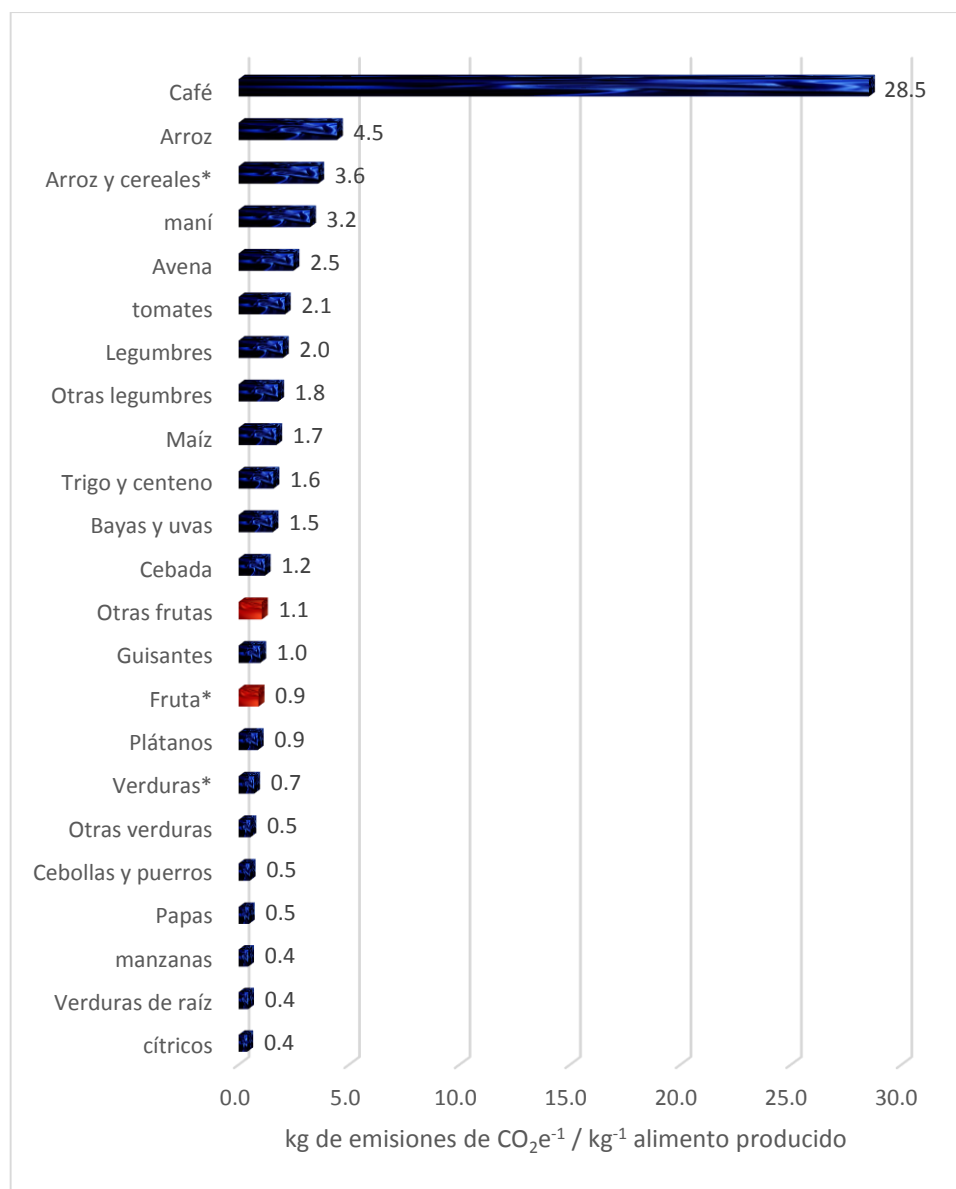


Figura 1. Huella de carbono de diferentes productos agrícolas.

Fuente: Elaboración propia con datos Ritchie (2020); ONU (2024)*.

El interés por las emisiones de GEI por parte de la comunidad internacional puso en marcha estrategias para reducir de manera eficiente dichas emisiones; el Banco Mundial (2017) señala que las sobresalientes son la aplicación de un impuesto al carbono y la imposición de límites al comercio de emisiones de carbono. La importancia de estas estrategias recae en internalizar los costos de emitir CO₂e mediante la fijación un precio para este último; además, el Climate Trade (2023) afirma que fijar el precio del carbono puede incentivar a empresas

y personas a reducir emisiones, invertir en tecnologías limpias y adoptar prácticas sostenibles; así como de internalizar los costos asociados a sus emisiones (Carbón Neutral Plus, 2022).

Las iniciativas de fijar un precio al carbono presentan considerable aceptación a nivel mundial. Para el 2023, se han puesto en marcha 110 instrumentos, de los cuales, 36 son SCE (Sistema de Comercio de Emisiones), 35 son mecanismos de acreditación gubernamental, y 39 son impuesto al carbono (Banco Mundial, 2023). Este mismo órgano señala que estos mecanismos son adoptados por 53 jurisdicciones nacionales y 40 jurisdicciones subnacionales.

México se suma a los compromisos internacionales, como el Acuerdo de Paris, para la reducción progresiva de emisiones de GEI, cuales fueron incluidas en la reforma de la Ley General de Cambio Climático del 2018. El compromiso es reducir un 22% de sus emisiones de GEI para 2030, el cual podría aumentar a 36% si recibe apoyo y financiamiento internacional (SEMARNAT, 2021b). Para ello, el Estado mexicano se hace presente con tres tipos de instrumentos de fijación de precio:

i) Sistema de comercio de emisiones (SCE): Este instrumento pone un límite obligatorio de emisiones de GEI establecido por el gobierno y dirigido a los sectores de la economía, el cual para el 2024 no ha sido implementado en México. Una vez adquiridos los permisos, las empresas pueden comercializar sus emisiones (medidas en t/CO₂) con otras empresas (Figura 2) (SEMARNAT, 2021b).

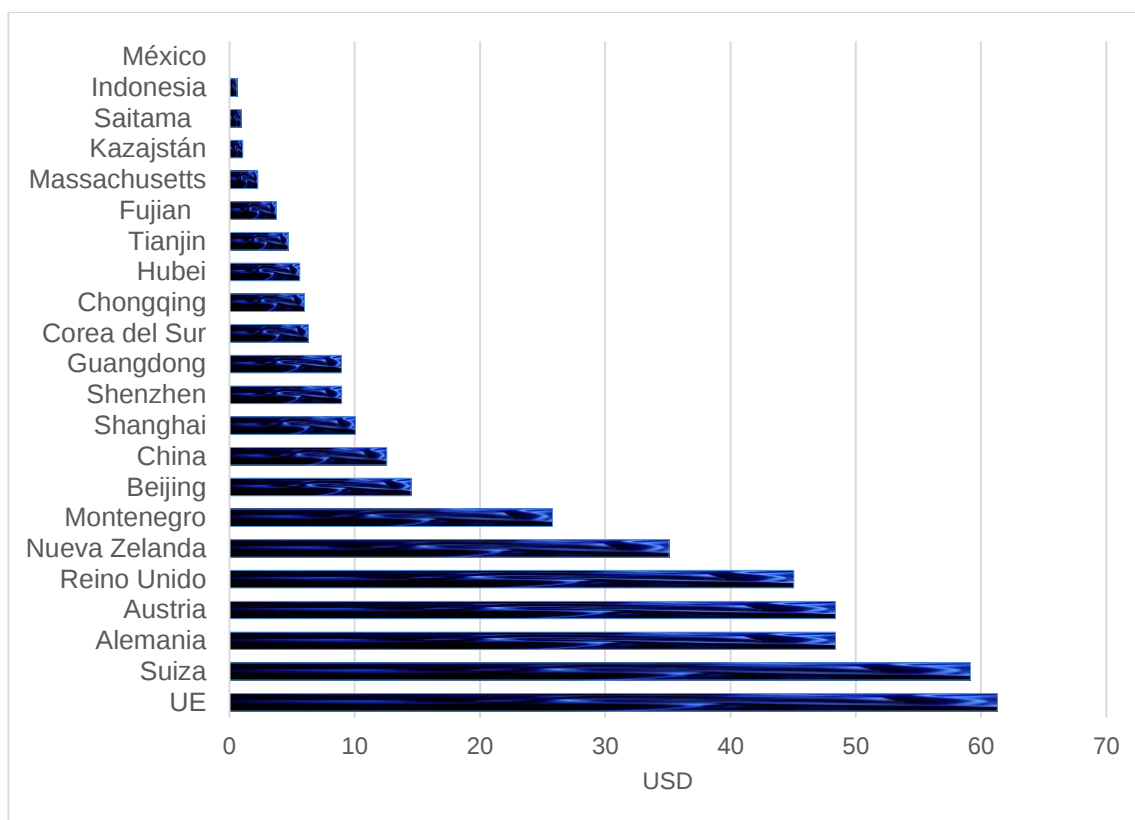


Figura 2. Precio al Sistema de Comercio de Emisiones en el mundo-2024.

Fuente: Elaboración propia con datos de Banco Mundial (2023).

ii) Impuesto federal al carbono: Este instrumento entro en vigor desde el 2014 como impuesto especial sobre producción y servicios (IEPS) aplicables a los combustibles fósiles (Cuadro 3). Con una actualización anual, la cuota del IEPS tiende a incrementarse con el tiempo, respondiendo a las dinámicas del mercado y del medio ambiente.

Cuadro 3.Cuota del impuesto a los combustibles fósiles 2014-2024.

Combustibles Fósiles	Impuesto 2014 (MXN)	Impuesto 2024 (MXN)	Variación %	Unidad
1. Propano	5.91	9.3315	57.89	centavos por litro.
2. Butano	7.66	12.0759	57.65	centavos por litro.
3. Gasolinas y gasavión	10.38	16.3677	57.68	centavos por litro.
4. Turbosina y otros kerosenos	12.40	19.5488	57.65	centavos por litro.
5. Diésel	12.59	19.8607	57.75	centavos por litro.

6. Combustóleo	13.45	21.1956	57.59	centavos por litro.
7. Coque de petróleo	15.60	24.6014	57.70	pesos por tonelada.
8. Coque de carbón	36.57	57.6738	57.71	pesos por tonelada.
9. Carbón mineral	27.54	43.4269	57.69	pesos por tonelada.
10. Otros combustibles fósiles carbono que contenga el combustible.	39.80	62.7762	57.73	pesos por tonelada de carbono que contenga el combustible

Fuente: Elaboración propia con datos de Cámara de Diputados-México (2024).

iii) Impuestos subnacionales al carbono: En México, los efectos del cambio climático no se distribuyen de manera uniforme, afectando de manera desproporcionada a ciertos estados en comparación con otros. Algunos estados del país enfrentan mayores desafíos debido a su vulnerabilidad climática, lo que ha generado la necesidad de acciones específicas. En respuesta a este contexto, desde 2014 varios estados mexicanos implementaron impuestos al carbono como una medida para combatir las emisiones de GEI provenientes de combustibles fósiles (Figura 3): CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ (México2, 2022).



Figura 3. Impuestos estatales al carbono en México para el 2024

Fuente: Elaboración propia con datos de Banco Mundial (2023).

El compromiso, enmarcado en los Acuerdos de París, de los diferentes gobiernos del mundo para el 2030-2050 es reducir las emisiones de GEI a escala global. Para ello, una gestión eficaz, pero diferenciada, del cambio climático tiene el potencial de hacer realidad las metas establecidas. El Banco Mundial (2017), en acuerdo con la comunidad científica, organismos internacionales y otros expertos en materia ambiental, exponen la necesidad de fijar un precio mínimo por tonelada de CO₂ de 40 USD para el 2020, y que ese valor aumente a 100 USD t CO₂e⁻¹ para el 2030.

2.4. Huella hídrica

La huella hídrica constituye un instrumento que permite cuantificar el volumen de agua utilizado de manera directa e indirecta en la producción de bienes (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2023). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA,

2025), este concepto no se limita únicamente al volumen de agua incorporado en cada producto; es decir, se trata de un indicador multidimensional que permite identificar el lugar de origen, la fuente y el momento en que el recurso hídrico es utilizado a lo largo del proceso productivo.

En la agricultura, la HH se clasifica según su fuente en tres componentes: verde, correspondiente al agua de lluvia almacenada en el suelo; azul, que refiere al volumen de agua superficial y subterránea utilizado en el riego; y gris, que representa el volumen de agua necesario para diluir los agroquímicos empleados en el cultivo (Hoekstra et al., 2021). En este sentido, el análisis de la HH permite identificar el uso oculto del agua a lo largo de los procesos productivos, evaluar su sostenibilidad y reconocer cómo el consumo en un lugar puede impactar los recursos hídricos en otro (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2019).

La suma de los componentes verde, azul y gris constituye la huella hídrica (HH) total de un producto (Hoekstra et al., 2021). Para estimar cada uno de estos componentes se requieren datos específicos de la zona de estudio; no obstante, la metodología propuesta por la Water Footprint Network permite emplear datos y parámetros estandarizados que son compatibles y aplicables a diferentes regiones de evaluación.

El consumo directo e indirecto de agua para la producción de un cultivo agrícola varía según las condiciones productivas de cada región. En el Cuadro 4 se presenta la HH promedio de diversos productos agrícolas cosechados a nivel mundial y en México.

Cuadro 4. Huella hídrica de productos agrícolas.

Producto	Mundial L/kg	México L/kg
Manzana	822	700
Papa	287	250
Jitomate	214	185.71

Fuente: SADER (2024), Hoekstra y Water Footprint Network (2020).

Importancia de la huella hídrica

La huella hídrica es un concepto integral que, además de considerar el agua utilizada durante la fabricación de un bien (denominada agua virtual), contabiliza el volumen de agua requerido a lo largo de todo su ciclo de vida (CONAGUA, 2025). Este enfoque incluye distintas etapas, entre las que destacan: producción, que comprende el riego de cultivos, la cría de animales y los procesos industriales; empaque y transporte, relacionados con el agua utilizada dentro de la cadena de suministro; y consumo y desecho, que considera tanto el agua utilizada directamente en el hogar como el volumen de agua contaminada generado (Hoekstra et al., 2021).

Hoekstra et al. (2021) señalaron que un reporte riguroso de la HH tiene el potencial de contribuir a una gestión más eficiente del agua dentro de los procesos productivos. Desde esta perspectiva, su adecuada estimación se convierte en una herramienta de planificación estratégica, útil para la toma de decisiones y el establecimiento de prioridades en el uso y manejo de los recursos hídricos.

Además, la HH no solo contabiliza el volumen de agua utilizado en la producción de bienes, sino que también incorpora el componente gris, el cual está asociado a la contaminación generada por los procesos productivos. En este contexto ambiental, Chapagain et al. (2006) señalaron que dicho componente permite cuantificar el volumen de agua requerido para diluir los flujos de contaminantes, de modo que la calidad del agua resultante se mantenga por debajo de los estándares de calidad establecidos.

En este sentido, el agua destinada al uso y consumo humano debe cumplir con condiciones químicas que no representen riesgos para la salud. En México, los límites permisibles de contaminantes en agua potable están establecidos en la

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 2000). En el Cuadro 5 se presentan los límites permisibles de algunos constituyentes químicos asociados con la actividad agrícola para México, considerados entre los contaminantes más relevantes que afectan la calidad de los recursos hídricos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2026).

Cuadro 5. Fertilizantes nitrogenados empleados en la producción agrícola de México.

Fertilizante	Característica	Concentración máxima (kg/m ³)
Nitrato de potasio	Nitrato	0.01
Nitrato de calcio	Nitrato	0.01
Sulfato de amonio	Sulfato	0.4

Fuente: Secretaría de Salud (2000).

Estudios de la huella hídrica en la producción agrícola

En estudios sobre la huella hídrica en cultivos agrícolas, Renderos (2016) estimó que la producción de caña de azúcar presenta una huella hídrica total de 203 m³ t⁻¹, compuesta principalmente por 128 m³ t⁻¹ de agua verde (precipitación), 71 m³ t⁻¹ de agua azul (proveniente de fuentes superficiales o subterráneas) y 4 m³ t⁻¹ de agua gris, asociada al volumen requerido para diluir los fertilizantes no absorbidos por el cultivo. El autor señala que la predominancia de cada componente depende de la estacionalidad hídrica, de modo que entre finales de abril y principios de noviembre domina la huella azul debido a mayores requerimientos de riego, mientras que durante el resto del año predomina la huella verde por la mayor disponibilidad de lluvia. Asimismo, los resultados obtenidos muestran valores cercanos al promedio mundial reportado para este cultivo, con una diferencia aproximada del 3 %, aunque difieren en alrededor de 16 % respecto al promedio registrado en El Salvador. Comparativamente, la huella hídrica de la caña de azúcar resulta menor que la de otros cultivos

relevantes como el frijol y el café, lo que sugiere una menor presión relativa sobre los recursos hídricos, particularmente en términos de consumo de agua de lluvia y requerimientos de dilución de contaminantes.

Ríos Flores et al. (2015) concluyeron que los índices de productividad física y monetaria del agua pueden emplearse como indicadores de ecoeficiencia, rendimiento y presión ambiental. En particular, al estimar la huella hídrica azul de los cultivos forrajeros en el Distrito de Riego 017, se encontró que cultivos como el maíz y el sorgo forrajero presentan mayor eficiencia y productividad hídrica en comparación con la alfalfa, tanto en términos productivos como socioeconómicos. En este sentido, el estudio sugiere que una reconfiguración del patrón forrajero basada principalmente en maíz y sorgo podría reducir la presión sobre los recursos hídricos de la región, manteniendo los niveles de producción de forraje y sin generar afectaciones significativas en el empleo agrícola.

En un estudio sobre sistemas de producción protegida, Liñeiro Astiazaran et al. (2025) evaluaron la huella hídrica del cultivo de espinaca en invernaderos bajo dos sistemas hidropónicos: Técnica de Película de Nutrientes e hidroponía en sustrato. Los resultados mostraron valores de 1714.18 L kg⁻¹ de huella hídrica, mientras que en HP se estimaron 222.22 L kg⁻¹. Asimismo, el análisis evidenció que el mayor aporte a la huella hídrica estuvo asociado al consumo de energía, particularmente cuando se consideró el factor de vida útil de los materiales; en contraste, al excluir dicho factor, los materiales utilizados en la infraestructura representaron la principal contribución. No obstante, el sistema de hidroponía en sustrato presentó mayor rendimiento y menor consumo energético y de agua en comparación con la técnica de película de nutrientes, lo que sugiere una mayor eficiencia ambiental bajo las condiciones evaluadas.

De acuerdo con Dumes y Peralta (2023), la estimación de la huella hídrica en el cultivo de cacao constituye una herramienta relevante para promover el uso sostenible del agua. En su estudio realizado en Ecuador, se encontró que los valores de huella hídrica verde del cultivo son inferiores al promedio nacional.

Además, el análisis económico evidenció que el valor económico de la huella hídrica del cacao es menor en comparación con el valor económico total (VET) del consumo de agua en hogares y negocios de un sector de Guayaquil, lo que sugiere que este cultivo ejerce una menor presión económica sobre los recursos hídricos en relación con algunos usos urbanos.

Rios et al. (2022) analizaron la huella hídrica del cultivo orgánico de caña de azúcar y comparó sus resultados con investigaciones previas del cultivo convencional en Colombia y con referencias internacionales. Los autores señalaron que la producción orgánica puede presentar ventajas ambientales en el uso de los recursos hídricos, asociadas a las prácticas de manejo y a las condiciones del contexto productivo. Asimismo, destacaron la necesidad de profundizar en el análisis de la huella hídrica gris e incorporar enfoques integrales que consideren dimensiones sociales, culturales, económicas, científicas y biofísicas para una mejor interpretación del indicador. Finalmente, el estudio resaltó el uso del modelo CROPWAT 8.0 como herramienta para la estimación de la huella hídrica, al proporcionar resultados con mayor aproximación a las condiciones reales del sistema productivo en comparación con cálculos manuales.

2.5 Referencias

- Abarca, R., & Sepúlveda, S. (2001). Comercio-ambiente: Cadenas agroalimentarias y el impacto del factor localización especial: Eco-etiquetado un instrumento para diferenciar productos e incentivar la competitividad. IICA, Coronado (Costa Rica).
- Aguilar, J. (2012). Impacto socioeconómico y ambiental de la certificación orgánica-comercio justo de café (*Coffea arabica*) en la Región Frailesca, Chiapas, México. Centro Agronómico Tropical De Investigación y Enseñanza.
https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5547/Socioeconomic_and_environmental_impact_of_organic_certification.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Varona, J. P. (2015). Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Revista De

- Investigación Agraria Y Ambiental, 6(1), 19-28.
<https://doi.org/10.22490/21456453.1260>
- Aranda-Arguello, R., Ley-de Coss, A., Arce-Espino, C., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., & Raj-Aryal, D. (2018). Carbon sequestration in aerial biomass of the oil palm in Chiapas, Mexico. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 629-637.
- Banco Mundial. (2017). Fijación del precio del carbono. <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/carbon-pricing>
- Banco Mundial. (2023). Ingresos sin precedentes derivados de la fijación del precio del carbono en el mundo: casi USD 100 000 millones. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/05/23/record-high-revenues-from-global-carbon-pricing-near-100-billion>
- Banco Mundial. (2024). Riego resiliente al clima. https://asamblea.go.cr/sd/referencia_cedil/TA_01_2024_RecursoHidrico_CostaRica,%20Espana,%20Mexico/1_RiegoResiliente.pdf
- British Standards Institution. (2012). Assessment of life cycle greenhouse gas emissions from horticultural products. (núm. ISBN 978 0 580 75725 9). BSI Standards Limited.
- Cabrera, A. I. S., Ojeda, A. P. P., Pinargote, A. R., Martínez, A. P., Pereira, L. B. S., & Santana, K. D. (2020). Huella de carbono en el cultivo de la caña de azúcar. *Evaluación agrícola de un caso de estudio de la amazonia ecuatoriana. Ingenio Magno*, 11(1), 22-32.
- Cámara de Diputados-México. (2024). Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lieps.htm>
- Camargo, M. (2008). Comprendiendo el Cambio Climático: Del conservacionismo a la concienciación ambiental. *Humania del Sur*, 3(4), 33-52.
- Carballo, A., & García, M. (2008). La huella ecológica y su aplicación a organizaciones: el caso de una empresa conservera en Galicia (España). *Revista Desarrollo Local Sostenible. Grupo Eumed. net*, 1(3).
- Carbón Neutral Plus. (2022). Precio del carbono: definición y estado actual. <https://www.carbonneutralplus.com/precio-de-carbono-interno/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20un%20informe,S%20100%2FtnCO2eq%20en%202030.>
- Carson, R. (2015). Silent spring. In *Thinking about the environment* (pp. 150-155). Routledge.
- Carvajal-Agudelo, B. N., & Andrade, H. J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Ceccon, E. (2008). La revolución verde: tragedia en dos actos. *Ciencias*, 1(91), 21-29.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2021) ¿Por qué debemos fomentar la investigación agrícola? <https://idp.cimmyt.org/por-que-debemos-fomentar-la-investigacion-agricola/>

- Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HH, Gautam R (2006) The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1): 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
- Climate Trade. (2023). La Guía Completa sobre la Fijación de Precios del Carbono. <https://climatetrade.com/es/la-guia-completa-sobre-la-fijacion-de-precios-del-carbono/>
- Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*, 3, 1–44. <http://www.jstor.org/stable/724810>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). Huella de carbono. <https://biblioguias.cepal.org/huellacarbono>
- Comisión Nacional del Agua. (2025) ¿Sabes cuál es la diferencia entre agua virtual y huella hídrica? <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sabes-cual-es-la-diferencia-entre-agua-virtual-y-huella-hidrica?idiom=es>
- Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., ... & Reyes-Reyes, B. G. (2012). Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra latinoamericana*, 30(2), 189-197.
- De Salvo, C. (2018). ¿Pueden las políticas agrícolas influir en las emisiones de gases de efecto invernadero? <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/pueden-las-politicas-agricolas-influir-en-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-2/>
- Díaz, S., & Morejón, R. (2018). Impacto de buenas prácticas agrícolas en el desarrollo de una finca en Los Palacios. *Avances*, 20(4), 401-408.
- Dumes, J. M. M., & Peralta, S. L. P. (2023). Valor económico de la huella hídrica de cacao arriba (*Theobroma Cacao*). *Revista de la Universidad del Zulia*, 14(41), 94-130. <https://doi.org/10.46925/rdluz.41.06>
- Ehrlich, P. & Holdren, J. (1971). Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, 171, 1212-1217. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.171.3977.1212>
- Environmental Protection Agency. (2024). Understanding Global Warming Potentials. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Espinoza-Villavicencio, J. L., Palacios-Espinosa, A., Ávila-Serrano, N., Guillén-Trujillo, A., de Luna-de la Peña, R., Ortega-Pérez, R., & Murillo-Amador, B. (2007). La ganadería orgánica, una alternativa de desarrollo pecuario para algunas regiones de México: una revisión. *Interciencia*, 32(6), 385-390.

- eWorldTrade. (2021). Los 10 principales países exportadores de agricultura en el mundo. <https://www.eworldtrade.com/blog/es/los-10-principales-paises-exportadores-de-agricultura-en-el-mundo/>
- Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315(6016), 207-210.
- Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: Casos prácticos. Res. Gate.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). Agriculture: cause and victim of water pollution, but change is possible. <https://www.fao.org/land-water/news-archive/news-detail/en/c/1032702/>
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N., & Olmos, X. (2012). Huella de carbono y exportaciones de alimentos: Guía práctica. (LC/W.503), Santiago de Chile. <https://repositorio.cepal.org/items/eb68b127-52f0-4c8a-9381-712f29eb4cda>
- Galina, S., Martínez, J., & Murphy, B. (2023). Constraints on Research in Biological and Agricultural Science in Developing Countries: The Example of Latin America. *Publications*, 11(2), 22. <https://doi.org/10.3390/publications11020022>
- Goodwin, N. (2007). Internalizando externalidades: haciendo que los mercados y las sociedades funcionen mejor. *Opinion Sur*, (52), 1-6.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. (1995). Climate Change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCCIS92 Emission Scenarios. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/cc1994/climate_change_1994.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg1-sum_vol_en.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. (2024). IPCC. <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- Guallasamin, K., & Simón Baile, D. (2018). Huella de carbono del cultivo de rosas en Ecuador comparando dos metodologías: GHG Protocol vs. PAS 2050. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (24), 27-56.
- Hammond, A., Adriaanse, A., Bryant, D. & Woodward, R. (1995). Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development (Vol. 36). Washington, DC: World Resources Institute.
- Hildyard, H., Sexton, S., & Lohman, L. (1993). "Carrying Capacity", "Overpopulation" and Environmental Degradation. <http://www.thecornerhouse.org.uk/resource/%E2%80%9Ccarrying-capacity%E2%80%9D-%E2%80%9Coverpopulation%E2%80%9D-and-environmental-degradation>

- Hoekstra, A. & Water Footprint Network. (2020). The Water Footprint Assessment Tool. <https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/#product-gallery>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2021). Manual de evaluación de la huella hídrica. AENOR, Internacional, S.A.U.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2015). Identificar el tipo de huella hídrica en la agricultura puede hacer la producción más sustentable. <https://iica.int/es/prensa/noticias/identificar-el-tipo-de-huella-h%C3%ADdrica-en-la-agricultura-puede-hacer-la-producci%C3%B3n#:~:text=La%20huella%20h%C3%ADdrica%20permite%20identificar,cooperaci%C3%B3n%20entre%20los%20sectores%20involucrados>.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019). Huella hídrica. <https://www.gob.mx/imta/articulos/huella-hidrica?>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2023). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2019. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- Jordán, R., & Simioni, D. (2003). Gestión urbana para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe. (LC/G.2203-P), Santiago de Chile. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c853f226-2bef-456f-b18d-cf00380ccd65/content>
- Leyva, J., Abreu, S., Mackay, J., Ramos, Y., Sera, C., y Borges, G. (2023). Cultivo y comercialización de la guayaba. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-GUAYABA-Cultivo-Comercializacion.pdf>
- Liñeiro Astiazaran, H., López Valenzuela, B. E., Bautista Olivas, A. L., Álvarez Chávez, C. R., Gaxiola Camacho, S. M., Valenzuela Escoboza, F. A., & Mendoza-Cariño, M. (2025). Huella hídrica y huella de carbono del cultivo de espinaca en sistemas hidropónicos. *Revista fitotecnica mexicana*, 48(2), 163-171. <https://doi.org/10.35196/rfm.2025.2.163>
- López Astudillo, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Abadía López, J., Orozco, O. A., Sandoval, J. S., & Arenas, F. (2018). Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 1-17. <https://doi.org/10.14482/inde.36.1.10936>
- López, A. J., & Hernández, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(332), 459-496. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., & Shukla, P. R. (2022). Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of

- global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press.
- Mediavilla, M. (2022). Rachel Carson, pionera y referente en la lucha contra el cambio climático. <https://www.es.amnesty.org/en-que-estamos/blog/historia/articulo/rachel-carson-pionera-y-referente-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/#:~:text=Legado%2C%20logros%20y%20reconocimiento%20de%20Rachel%20Carson&text=%E2%80%9CPrimavera%20silenciosa%E2%80%9D%20impuls%C3%B3%20la%20primera,primer%20D%C3%ADa%20de%20la%20Tierra>
- México2. (2022). Impuestos al carbono en México: desarrollo y tendencias. Ciudad de México: Plataforma Mexicana de Carbono. <https://www.mexico2.com.mx/uploads/mexico/file/Impuestos%20al%20carbono%20en%20M%C3%A9xico%20-%20desarrollo%20y%20tendencias.pdf>
- Morales, R. A., Zorogastúa, P., De Mendiburu, F., & Quiroz, R. (2018). Producción mecanizada de maíz, camote y yuca en la Costa Desértica Peruana: Estimación de la huella de carbono y propuestas de mitigación. *Ecología aplicada*, 17(1), 13-21.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2023). Reducción de los gases de efecto invernadero. <https://www.iaea.org/es/temas/reduccion-de-los-gases-de-efecto-invernadero#:~:text=Por%20un%20lado%2C%20las%20actividades,qu%C3%ADmicos%2C%20plaguicidas%20y%20desechos%20animales>
- Organización de las Naciones Unidas (2024). Los alimentos y el cambio climático: Una dieta más sana por un planeta más saludable. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/food>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2023). Huella Hídrica y Gestión Eficiente de los Recursos Hídricos. <https://www.unesco.org/es/articles/huella-hidrica-y-gestion-eficiente-de-los-recursos-hidricos>
- Organización de las Naciones Unidas. (1987). World commission on environment and development. Our common future, 17(1), 1-91.
- Organización de las Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas. (1993). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n92/836/58/pdf/n9283658.pdf?toKen=YMZj168CNtE6IBxBmP&fe=true>
- Organización de las Naciones Unidas. (1998). Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. <https://unfccc.int/gcse?q=protocolo%20de%20kioto>

- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Organización de las Naciones Unidas. (2019). Cuarto informe sobre financiamiento para el cambio climático en América Latina y el Caribe, 2013-2016. <https://repositorio.cepal.org/items/facc727b-1e27-4eb9-b7b8-b73074629ead>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023a). Cultivo y comercialización de la guayaba. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-GUAYABA-Cultivo-Comercializacion.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023b). La Agenda para el Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Ortiz, C., & Delfín, O. (2011). Cambio climático y agricultura en Michoacán: certificación de huella de carbono como instrumento de competitividad. *Inceptum*, 6(10), 387-410.
- Páez-Barón, E. M., Corredor-Camargo, E. S., & Fonseca-Carreño, J. A. (2018). La Huella hídrica y la huella de carbono: herramientas para estimar el impacto de la ganadería bovina. *Pensamiento y Acción*, (24), 81-92.
- Parlamento Europeo. (2019) ¿Qué es la neutralidad de carbono y cómo alcanzarla para 2050? <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190926STO62270/que-es-la-neutralidad-de-carbono-y-como-alcanzarla-para-2050>
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312.
- Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan.
- Polanco, C. (2006). Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones. *Gestión y ambiente*, 9(2), 27-41.
- Porras, R. A. D., Hernández, R., Padilla, C. R., & Salazar, Y. C. (2000). Evaluación del ciclo de vida: una opción para la competitividad agroindustrial. *Economía y Sociedad*, 5(13), 19-36.
- Quiroga, R. (2001). Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. *cepal*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/9fdb0f55-a26d-4ad7-9d03-afae9f73ae5c/content>
- Renderos, R. (2016). Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar. *Research Gate*, 8-8.
- Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 47(1), 93-107.
- Rios, L. F. R., Moreno, D. B., & Bejarano, C. H. M. (2022). Huella hídrica verde y azul de la producción de caña de azúcar orgánica en la zona centro del

- Valle del Cauca. Ingeniería y Competitividad, 24(02), 13-13.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v24i02.11264>
- Ritchie, H. (2020). ¿Quieres reducir la huella de carbono de tus alimentos? Concéntrate en lo que comes, no en si tus alimentos son locales.
<https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local#article-citation>
- Rivera, C. (2023). Cambio climático: Acciones desde los recursos públicos.
<https://ciep.mx/cambio-climatico-acciones-desde-los-recursos-publicos/>
- Rizo-Mustelier, M., Vuelta-Lorenzo, D. R., & Lorenzo-García, A. M. (2017). Agricultura, desarrollo sostenible, medioambiente, saber campesino y universidad. Ciencia en su PC, (2), 106-120.
- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. Boletín IIE, 91-97.
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 29-34.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019a). La guayaba, poderosa y sabrosa.
<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-guayaba-poderosa-y-sabrosa?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019b). Zacatecas, entre los principales estados productores de guayaba.
<https://www.gob.mx/agricultura/zacatecas/articulos/zacatecas-entre-los-principales-estados-productores-de-guayaba?idiom=es#:~:text=En%20Zacatecas%2C%20se%20produce%20guayaba,de%20Mej%C3%ADa%2C%20Tabasco%20y%20Villanueva.>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Garantiza Agricultura producción y abasto de guayaba para esta temporada decembrina.
<https://www.gob.mx/agricultura/prensa/garantiza-agricultura-produccion-y-abasto-de-guayaba-para-esta-temporada-decembrina>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Conoce la huella hídrica de los cultivos y los alimentos. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
[https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conoce-la-huella-hidrica-de-los-cultivos-y-los-alimentos.](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conoce-la-huella-hidrica-de-los-cultivos-y-los-alimentos)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2008). Compendio de Estadísticas Ambientales 2008.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/gob-mx/publicaciones.html>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016a). Programa de ordenamiento ecológico regional estado de Aguascalientes.
https://www.aguascalientes.gob.mx/ssmaa/pdf/Agenda_Ambiental.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016b). Protocolo de Kioto sobre cambio climático. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017) ¿Qué es la COP sobre cambio climático? <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-cop-sobre-cambio-climatico>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021a). Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-especial-de-cambio-climatico-2021-2024>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021b). Programa de prueba del sistema de comercio de emisiones. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-de-prueba-del-sistema-de-comercio-de-emisiones-179414>
- Secretaría de Salud. (2000). Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2019). El poder de la guayaba. <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-poder-de-la-guayaba>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2022). Panorama Agroalimentario 2022. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. (2017). Generalidades de la Red Guayaba. <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/guayaba-psidium-guajava-l>
- Stiglitz, J.E. (2012). The Price of inequality. Editorial Taurus.
- United States Department of Agriculture. (2019). La producción agrícola y ganadera genera la liberación no intencional de gases de efecto invernadero (GEI). Los agricultores pueden hacer algo al respecto. [https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northeast/estrategias-rentables-para-reducir-los-gases-de-efecto-invernadero-agricolas#:~:text=Los%20agricultores%20pueden%20hacer%20algo,\(ma nejo%20de%20suelos%20agr%C3%ADcolas\).](https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northeast/estrategias-rentables-para-reducir-los-gases-de-efecto-invernadero-agricolas#:~:text=Los%20agricultores%20pueden%20hacer%20algo,(ma nejo%20de%20suelos%20agr%C3%ADcolas).)
- Valderrama, J. O., Espíndola, C., & Quezada, R. (2011). Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias. Formación universitaria, 4(3), 3-12.
- Valenzuela, R. (1991). El que contamina paga. Revista CEPAL, (45), 77-88. <https://repositorio.cepal.org/items/f02e77fd-8dfe-46be-a8aa-6d5150b80b79>
- Vallejo, L. (2009). Del crecimiento económico al desarrollo sostenible: una aproximación. Apuntes del CENES, 28(47), 99-116.
- Varian, H. R. (2010). Intermediate Microeconomics: A Modern Approach. Antoni Bosch
- Viteri, M. D. P., & Tapia, M. C. (2018). Economía ecuatoriana: de la producción agrícola al servicio. Revista Espacios, 39(32).

3. Evaluación de la huella de carbono en la producción de guayaba en México¹

Resumen

Cuantificar el Costo Económico (CE) de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la producción de guayaba (*Psidium guajava* L.) puede evidenciar su impacto social y corregir la distorsión de precios generada al no incorporar su costo real. Se realizaron ochenta y ocho encuestas para estimar el CE de las emisiones de CO₂e de la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones, la segunda mayor zona productora de México, con condiciones térmicas subóptimas para este cultivo. Se empleó la Metodología de Evaluación del Costo del Carbono Agrícola como propuesta técnica para internalizar el CE derivado la Huella de Carbono (HC) en productores tradicionales e industriales de guayaba. Las emisiones de CO₂e se estimaron según la metodología PAS 2050-1. Se encontró que los productores tradicionales presentaron una HC de 0.14 kg CO₂e kg⁻¹ y un CE de 0.04 kg⁻¹ de guayaba cosechada, donde los fertilizantes orgánicos constituyeron la principal fuente de emisiones. En contraste, en los sistemas industriales, las mayores emisiones se asociaron al uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados, registrándose una HC de 0.12 kg CO₂e kg⁻¹ y un CE de 0.03 kg⁻¹ de guayaba cosechada. En términos comparativos, los sistemas industriales mostraron una mayor eficiencia económica y ambiental, al presentar menores emisiones de CO₂e y menores costos asociados por unidad de producto. No obstante, el CE vinculado a las emisiones de CO₂e evidenció variaciones en función del tipo de productor y del municipio de origen.

Palabras clave: costo económico, costo ambiental, huella de carbono.

Introducción

El cultivo de guayaba (*Psidium guajava* L.) se posiciona como uno de los productos hortofrutícolas de relevante comercialización en el mundo (Servicio de Información

¹ Revista Chapingo Serie Zonas Áridas

Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2022). Su importancia radica en la amplia aceptación que tiene entre la población mundial, gracias a su significativo aporte de vitaminas y minerales que contribuyen al fortalecimiento del sistema inmunológico (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2019).

El cultivo de guayaba se encuentra distribuido en gran parte del territorio mexicano, ya sea en cultivo, traspacios o silvestre (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas [SNICS], 2017), con mayor concentración en los estados de Michoacán, Aguascalientes y Zacatecas, que son también los principales productores (SIAP, 2022). Estas condiciones contribuyeron a que, en 2023, México se consolidara como el tercer mayor productor mundial de guayaba, al registrar una producción de $406,082.02 \text{ t}^{-1}$, con un valor económico de 288,832,175 MXN, lo que representa un incremento del 59.8% en volumen y del 265.8% en valor en comparación con el año 2000 (SIAP, 2025). Durante el mismo periodo, la superficie sembrada creció un 16.6% (SIAP, 2025).

A pesar de la importancia productiva y económica de la guayaba en México, esta actividad agrícola no queda exenta de los impactos ambientales. Se estima que para el 2021, alrededor del 30% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) fueron causadas por la agricultura, emisiones que están directamente vinculadas al cambio climático (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2023).

Por lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2021) estableció acciones específicas para reducir las emisiones de GEI agrícola a través del Programa Especial de Cambio Climático (PECC), el cual se deriva del Plan Nacional de Desarrollo. Cabe destacar que dichas acciones se alinean con los compromisos internacionales del país en relación con el cambio climático, como el Acuerdo de París (SEMARNAT, 2020).

La problemática de las emisiones de GEI en el sector agrícola, consideradas externalidades negativas, se agudiza cuando sus efectos negativos son de carácter social. Es decir, quienes las generan no se hacen responsables por los impactos ni asumen las consecuencias indirectas que transmiten al resto de la sociedad (Stiglitz, 2013). Además, dichas externalidades distorsionan el sistema de precios, pues, como señala Pigou (2017), no reflejan el costo real debido a la ausencia de un mercado definido para su regulación.

Dado que las emisiones de GEI asociadas a la producción agrícola constituyen un factor determinante en la dinámica del cambio climático, además de contribuir a la distorsión del sistema de precios y a la generación de externalidades sociales negativas, resulta de mayor importancia el estudio de ese problema. En este sentido, la presente investigación tuvo por objetivo estimar el CE de las emisiones de CO₂e de la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones. Lo anterior con el fin de aportar un estudio con argumentos sólidos que sean de utilidad tanto para productores como para los responsables del diseño e implementación de políticas agroambientales.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se llevó a cabo en la región Calvillo-Cañones, ubicada en los estados de Zacatecas y Aguascalientes. Los productores encuestados, tanto tradicionales como industriales, se ubicaron en los municipios de Apozol, Calvillo y Jalpa.

El área de estudio se seleccionó bajo dos criterios específicos: i) es una de las principales regiones productoras de guayaba en México (SIAP, 2024); ii) la zona de producción presenta condiciones de piso térmico subóptimo para este cultivo (SIAP, 2019). En esta región, las huertas de guayaba presentan gran variedad genética. El análisis contempló dos tipos de variedades de guayaba: criollas, cultivadas por productores tradicionales, y mejoradas, empleadas por productores industriales.

La región Calvillo-Cañones se caracteriza por un clima templado con verano seco y temperaturas moderadas, clasificado como Csb según el sistema climático de Köppen, modificado por García (2004). El guayabo es sensible a las bajas temperaturas, presentando un umbral mínimo de temperatura de 8.4 °C durante la etapa de producción (Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical [IIFT], 2023). De octubre a marzo, la región presenta registros de temperatura mínima con valores iguales o inferiores a 0.0 °C (Comisión nacional del Agua [CONAGUA], 2024), lo que representa un riesgo significativo para el cultivo.

Tamaño de muestra

Para recopilar los datos, se utilizaron las técnicas de observación participante y encuesta. Se diseñó un cuestionario que permitió registrar las cantidades de materias primas utilizadas en el proceso productivo. El instrumento fue dividido en siete secciones: i) identificación de la unidad productiva (9 preguntas), ii) etapa de propagación (8 preguntas), iii) siembra (8 preguntas), iv) manejo primer año (10 preguntas), v) manejo segundo año (10 preguntas), vi) etapa de producción-tercer año (7 preguntas) y vii) cosecha, selección y empaque (4 preguntas).

El tamaño de la muestra se calculó utilizando la fórmula propuesta por Aguilar-Barojas (2005), con base en una muestra para poblaciones finitas con representación municipal. El tamaño de muestra se dio por la fórmula:

$$n = \frac{Z^2 N p q}{(N - 1) d^2 + Z^2 p q}$$

Donde n representa el tamaño de la muestra (88 encuestas), mientras que N corresponde al tamaño total de la población, equivalente a 1,007 unidades de producción de guayaba reportadas en el Censo Agropecuario 2022 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024). El nivel de confianza fue del 95% ($Z = 1.959$), el parámetro d indica el nivel de precisión absoluta (0.1), p se refiere a la proporción estimada del fenómeno en la población de referencia (0.5) y q denota la proporción de individuos en la población de referencia que no presentan dicho fenómeno (0.5).

La distribución de las encuestas se realizó mediante la técnica de muestreo en cadena, útil en contextos de difícil acceso, en la cual se selecciona a un participante que refiere a otros hasta completar la muestra (Arrogante, 2022). Este tipo de muestreo tiende a reflejar las proporciones más visibles dentro del grupo de estudio, dado que se basa en redes de referencia entre los propios participantes. En este caso, la mayor presencia y cohesión social de los productores tradicionales facilitó su identificación y participación. Como

resultado, se obtuvo una muestra compuesta por un 60% de productores tradicionales y un 40% de productores industriales.

Se aplicó una ponderación post-estratificada con base en la distribución poblacional de productores tradicionales (29.9%) e industriales (70.1%). Los factores de expansión se calcularon como la razón entre la proporción poblacional y la proporción observada en la muestra. En consecuencia, se asignaron ponderadores de 0.496 para productores tradicionales y 1.763 para productores industriales, corrigiendo el desbalance derivado del muestreo en cadena, consistente con las recomendaciones de Lohr (2022). Las estimaciones reportadas incorporaron dichos ponderadores para garantizar la representatividad poblacional.

Estimación de las emisiones de CO₂e

Se utilizó la metodología PAS 2050-1, desarrollada conforme a las normas BS ISO 14040 y BS ISO 14044 establecidas por Organización Internacional de Normalización, la cual permite evaluar y registrar las emisiones de GEI de un producto hortofrutícola desde la plantación hasta el momento en que el producto está listo para salir del sitio de producción (British Standards Institution [BSI], 2012).

Para convertir en CO₂e las diferentes emisiones de los GEI, se multiplicó el GEI por su Potencial de Calentamiento Global para un horizonte temporal de 100 años. Considerando el rendimiento medio de cada tipo de productor con un α del 0.05, la unidad de medida en esta investigación fue de kg de CO₂e emitidos por cada kg⁻¹ de guayaba cosechada. Se utilizó la siguiente fórmula de conversión:

$$E = Na * fe$$

Donde E representa la cantidad de emisiones de GEI, Na el nivel de actividad de la fuente estimada, y fe el factor de emisión (Frohmann et al., 2012).

Factores de emisión (FE)

Conforme a la PAS 2050-1, la estimación de emisiones se basó en datos que reflejaron las condiciones temporales y geográficas del sistema, priorizando factores de emisión locales o nacionales (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2008), como los reportados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y SEMARNAT. En ausencia de estos, se emplearon datos secundarios de fuentes internacionales como el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

La estimación de las emisiones de CO₂e se llevó a cabo considerando el tipo de productor (tradicional o industrial) correspondiente a cada uno de los municipios analizados. Las fuentes de emisión identificadas para cada tipo de productor fueron clasificadas de acuerdo con su procedencia en categorías descritas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Fuentes y factores de emisión utilizados en el cálculo de la huella de carbono del cultivo de guayaba.

Categoría - Concepto	Fuente de emisión	Unidad	FE: kg CO ₂ e	Referencia
A1 Fertilizantes sintéticos nitrogenados	Sulfato de amonio	kg CO ₂ e kg ⁻¹	0.45	MITECO (2025)
	Nitrato de potasio	kg CO ₂ e kg ⁻¹	0.28	MITECO (2025)
	Nitrato de calcio	kg CO ₂ e kg ⁻¹	0.32	MITECO (2025)
	Triple 17	0.0125 kg N ₂ O kg ⁻¹ N		IPCC (2006)
A2 Fertilizantes orgánicos	*Composta sobre la base de peso húmedo	4 g de CH ₄ kg ⁻¹ de desechos tratados	0.1	IPCC (2006)
		0.3 g de N ₂ O kg ⁻¹ de desechos tratados	0.0894	IPCC (2006)
A3 Productos fitosanitarios	Delfan plus	kg CO ₂ e kg ⁻¹	0.33	ECOINVENT (2016)

	Switch	kg CO ₂ e kg ⁻¹	10.6	ECOINVENT (2016)
	Borneo	kg CO ₂ e kg ⁻¹	16.6	ECOINVENT (2016)
A4 Residuos inorgánicos	Plástico propileno	kg CO ₂ e kg ⁻¹	1.34	ECOINVENT (2016)
	Cartón	kg CO ₂ e kg ⁻¹	1.04	Climatic (2025)
A5 Emisiones indirectas de N ₂ O	**Hojarasca	0.6 g de N ₂ O kg ⁻¹	0.1788	IPCC (2006)
A6 Emisiones indirectas CH ₄	**Hojarasca	10 g de CH ₄ kg ⁻¹	0.25	IPCC (2006)
A7 Emisiones indirectas CO ₂	Desinfectante	kg CO ₂ e L ⁻¹	0.59	SEABOARD (2024)
	Residuos de poda	kg CO ₂ e kg ⁻¹	1.89	MITECO (2025)
A8 Aplicación de enmiendas calizas	Cal	kg CO ₂ e kg ⁻¹	0.12	IPCC (2006)
A9 Fuentes móviles	Gasolina	kg CO ₂ e L ⁻¹	2.322	INECC (2014)
	Diésel	kg CO ₂ e L ⁻¹	2.596	INECC (2014)
	Aceite automotriz	kg CO ₂ e L ⁻¹	2.91	INECC (2014)
A10 Fuentes fijas	Energía eléctrica	t CO ₂ e MWh ⁻¹	0.438	SEMARNAT (2024)

*Descomposición aeróbica; ** descomposición anaeróbica.

Nota: Se utilizaron factores de conversión de 28 kg CO₂e kg⁻¹ de CH₄ y 265 kg CO₂e kg⁻¹ de N₂O, de acuerdo con el INECC (2018).

Pruebas estadísticas

Se aplicaron pruebas estadísticas (α del 0.05) con SPSS v27 para analizar las diferencias en las emisiones de CO₂e entre los distintos grupos de Fuentes Emisoras según el Tipo de Productor. Dichas fuentes se expresan como medias $\pm$ desviación estándar (SD). Las diferencias entre los grupos se analizaron mediante el análisis de varianza (ANOVA), bajo la hipótesis nula (H_0) de que las medias entre grupos son iguales si $P\text{-value} > \alpha$, y la hipótesis alterna (H_a) de que existen diferencias significativas entre las medias si $P\text{-value} < \alpha$ (Wackerly *et al.*, 2010; Azuela, 2020). Para identificar específicamente entre qué grupos se presentan diferencias significativas, se utilizó la prueba post hoc de Tukey (1949). En este caso, la H_0 fue que no existen diferencias estadísticas significativas entre los contaminantes según el municipio ($P\text{-value} > \alpha$), mientras que la H_a planteó que sí existen diferencias estadísticas entre los contaminantes ($P\text{-value} < \alpha$).

Estimación del Costo Ambiental Agrícola (CAA)

El CAA se elaboró a partir de los resultados de la estimación de la HC, se multiplicó por el impuesto nacional de México al carbono. En particular, se usó la cobertura de impuestos subnacional a los GEI del estado de Zacatecas, mismo que actualmente es de 250 MXN (Banco Mundial, 2023). Este valor se empleó exclusivamente como precio sombra para la valoración económica de las emisiones, dado que no existe un impuesto directo aplicado a las emisiones de GEI en este sector en México.

El procedimiento metodológico utilizado para cuantificar el Costo Ambiental Agrícola asociado a la Huella de Carbono (CAA: HC) de la producción de guayaba en la zona de estudio se presenta en la Figura 1. Este procedimiento se sustentó en la Metodología de Evaluación del Costo del Carbono Agrícola (MECCA), adoptada como propuesta técnica, la cual considera la identificación de las secciones productivas y la valoración económica de las actividades generadoras de emisiones de GEI, desde la preparación inicial del cultivo hasta la salida del producto agrícola de la unidad de producción.

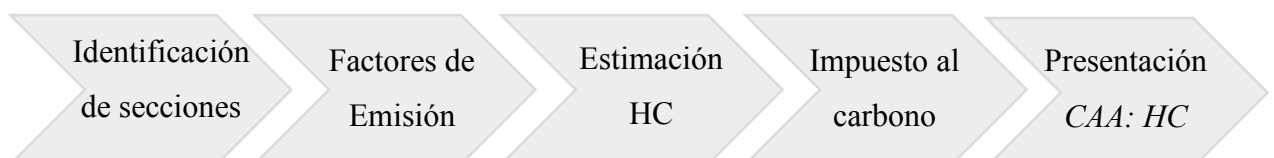


Figura 1. MECCA: Procedimiento metodológico para cuantificar el costo económico de las emisiones de CO₂e de productos agrícolas.

El CAA: HC fue estimado mediante una fórmula que integra tanto las emisiones directas como indirectas asociadas a las actividades productivas, y a los impuestos al carbono. La fórmula utilizada se expresa como:

$$CAA: HC = \left(\sum_{i=1}^k (A_i * FE_i) + \sum_{j=1}^N (A_j * FE_j) \right) * TC$$

Donde el lado izquierdo de la formula representa el valor económico de la HC asociada a la producción agrícola. El lado derecho se divide en dos componentes. El primero corresponde a la estimación de la HC agrícola, la cual debe estimarse mediante metodologías específicas para el sector. En esta etapa, los *FE* expresan la relación entre la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera y la unidad de actividad productiva, ya sea directa (*i*) o indirecta (*j*).

En este sentido, los *A_i* representan al dato de la *i*-ésima actividad productiva que genera emisiones directas de GEI, como el consumo de combustible, energía eléctrica, fertilizantes sintéticos u orgánicos, productos fitosanitarios, residuos inorgánicos y otros insumos comerciables, los cuales deben registrarse según sus unidades de medida (kg, L, KWh, entre otros).

Por su parte, *A_j* corresponde a la *j*-ésima actividad productiva que genera emisiones indirectas, tales como la aplicación de materia orgánica para proteger a los cultivos de factores climáticos, residuos de poda, o el consumo de energía eléctrica y de combustibles que no entran directamente en el proceso productivo; estos también deben expresarse en unidades físicas equivalentes.

El segundo componente (*TC*) se refiere a los tributos aplicables a las emisiones de carbono. Estos impuestos, al igual que los *FE*, deben ajustarse a lo estipulado por cada jurisdicción, ya sea nacional o subnacional. Finalmente, la presentación CAA debe integrarse en los costos de producción como Costo Sostenible, bajo el subconcepto *Costo Ambiental Agrícola-Huella de Carbono (CAA: HC)*.

Resultados y discusión

Validación de las pruebas estadísticas para las emisiones de CO₂eq

Los resultados del ANOVA, ilustrados en el cuadro 2 y 3, señalaron que las fuentes de emisión presentaron diferencias estadísticamente significativas. Entre los grupos, las diferencias ($P\text{-value} < 0.05$) estuvieron determinadas por las fuentes A2 (fertilizantes orgánicos) para los productores tradicionales. Las A5 (emisiones indirectas de N₂O) y A6 (emisiones indirectas de CH₄) para ambos tipos de productores; y las A9 (fuentes móviles), observadas solo en productores industriales. Lo anterior, podría atribuirse a la heterogeneidad en las prácticas productivas asociadas a estas fuentes o a la baja variabilidad territorial de su emisión. Este análisis guarda similitud con el de Morales et al. (2018), ya que, a pesar de haberse llevado a cabo en una región específica, las emisiones de GEI en dos de sus localidades mostraron diferencias significativas, lo que subraya la influencia de factores locales en el comportamiento ambiental de los sistemas agrícolas.

Cuadro 2. Emisiones de CO₂e en sistemas tradicionales de producción.

Fuente de emisión	Productor			P-Valor
	Apozol	Calvillo	Jalpa	
	kg CO ₂ e ha ⁻¹	kg CO ₂ e ha ⁻¹	kg CO ₂ e ha ⁻¹	
A1	299.7a ± 9.4	296.6a ± 14.8	298.1a ± 14.0	0.448
A2	507.0b ± 14.0	499.3a ± 16.9	505.1ab ± 14.2	0.026*
A3	23.6a ± 1.5	23.3a ± 1.7	23.6a ± 2.1	0.743
A4	135.2a ± 8.1	133.7a ± 6.0	134.7a ± 8.7	0.580
A5	127.9a ± 10.7	371.3b ± 13.3	463.4c ± 9.2	< 0.001*
A6	149.3a ± 10.5	488.8b ± 13.9	617.4c ± 16.2	< 0.001*

A7	4.4a ± 0.4	4.2a ± 0.9	4.2a ± 0.8	0.570
A8	10.0a ± 1.3	9.7a ± 1.5	9.9a ± 1.2	0.500
A9	278.1a ± 9.8	279.0a ± 8.7	280.0a ± 8.5	0.564
A10	0.0024a ± 0.0	0.0055a ± 0.0	0.0033a ± 0.0	0.658

Nota: Las medias con letras diferentes, por fila, son significativamente diferentes al nivel de significancia del 5% según el *P-value* (Tukey 1949).

Abreviaturas: A1, fertilizantes sintéticos; A2, fertilizantes orgánicos; A3, productos fitosanitarios; A4, residuos inorgánicos; A5, emisiones indirectas de N₂O; A6, emisiones indirectas de CH₄; A7, emisiones indirectas de CO₂; A8, aplicación de calizas; A9, fuentes móviles; A10, fuentes fijas.

* Significativo al nivel de probabilidad de 0.05.

Cuadro 3. Emisiones de CO₂e en sistemas industriales de producción.

Fuente de emisión	Productor			P-Valor*
	Apozol kg CO ₂ e ha ⁻¹	Calvillo kg CO ₂ e ha ⁻¹	Jalpa kg CO ₂ e ha ⁻¹	
A1	323.4a ± 12.0	321.0a ± 11.9	324.7a ± 13.6	0.452
A2	169.6a ± 8.2	171.9a ± 8.6	172.4a ± 8.6	0.324*
A3	28.7a ± 1.4	28.1a ± 1.3	28.5a ± 1.8	0.217*
A4	174.9a ± 6.2	175.6a ± 5.7	176.1a ± 6.0	0.709
A5	143.3a ± 7.4	428.2b ± 14.1	544.1c ± 14.2	< 0.001*
A6	167.4a ± 6.9	560.0b ± 17.9	730.0c ± 17.3	< 0.001*
A7	6.9a ± 1.1	6.8a ± 1.2	7.1a ± 1.6	0.612
A8	12.2a ± 1.9	11.7a ± 1.4	12.0a ± 1.7	0.5
A9	303.4a ± 9.2	333.5b ± 11.2	335.9b ± 13.2	< 0.001*
A10	0.0024a±0.0	0.0026a ± 0.0	0.0028a ± 0.0	0.589

Nota: Las medias con letras diferentes, por fila, son significativamente diferentes al nivel de significancia del 5% según el *P-value* (Tukey 1949).

* Significativo al nivel de probabilidad de 0.05.

La prueba post hoc (Cuadro 2 y 3) indicó que las emisiones de la fuente A2 (fertilizantes orgánicos) de los productores tradicionales Apozol fueron significativamente mayores que las de los productores tradicionales de Calvillo. No obstante, las emisiones de los productores tradicionales de Jalpa no mostraron diferencias significativas en comparación con las emisiones de los productores tradicionales de Apozol ni con las emisiones de los productores tradicionales de Calvillo. Respecto a las emisiones A9 (fuentes móviles) de los productores industriales de Calvillo y Jalpa no presentaron diferencias significativas entre sí, pero sí fueron significativamente mayores en comparación con las emisiones de los productores industriales de Apozol. En este contexto, tanto los productores tradicionales e industriales de Jalpa destacaron como los más contaminantes, lo que podría explicarse por un uso más intensivo de insumos o una producción a mayor escala. Por el contrario, los productores tradicionales e industriales de Apozol parecen adoptar prácticas más sostenibles o con un impacto ambiental reducido.

Estos resultados subrayan la influencia de factores locales en el comportamiento ambiental de los sistemas agrícolas, particularmente en la HC. La diferencia observada puede atribuirse a la implementación de prácticas sostenibles orientadas a mejorar la eficiencia y uso de insumos, lo que permitió reducir las emisiones asociadas. Este comportamiento coincide con lo señalado por Fajardo y Cadenas (2022), quienes encontraron efectos similares al demostrar que la adopción de estrategias de manejo agrícola más eficientes contribuyó a mitigar la HC.

En relación con las fuentes de emisión A5 (emisiones indirectas de N_2O) y A6 (emisiones indirectas de CH_4), se observaron diferencias significativas entre los tres grupos de productores tradicionales y los tres industriales. Lo que pone de manifiesto diferencias significativas en las estrategias de manejo o en las tecnologías empleadas por cada productor.

Entre los sistemas de producción tradicional, los productores de Jalpa presentaron las mayores emisiones de A5 (emisiones indirectas de N_2O) y A6 (emisiones indirectas de CH_4), seguido por productores de Calvillo y, en menor medida, los productores de Apozol. Un patrón similar se registró entre los sistemas productivos industriales, donde los productores de Jalpa mostraron las emisiones más altas, seguido por los productores de

Calvillo y Apozol, respectivamente (Cuadro 2 y 3). Los hallazgos revelan que las fuentes A2 (fertilizantes orgánicos), A5 (emisiones indirectas de N_2O), A6 (emisiones indirectas de CH_4) y A9 (fuentes móviles) permitieron distinguir productores según sus niveles de emisión. Especialmente la fuente A5 (emisiones indirectas de N_2O) presentó una organización jerárquica clara para ambos tipos de productores, lo que indicó su potencial como indicador sensible del impacto ambiental diferenciado por territorio.

Impacto de las condiciones de piso térmico sobre las emisiones de CO_2e

Los sistemas de producción tradicional de Apozol, Calvillo y Jalpa emitieron mayores cantidades de $\text{CO}_2\text{e ha}^{-1}$ que los productores industriales. Las causas que determinaron estos resultados fueron que los primeros utilizan A2 (fertilizantes orgánicos) en sus actividades productivas de fertilización, los cuales emitieron una media de 26.1% de los GEI; mientras que los A1 (fertilizantes sintéticos nitrogenados), empleados por los segundos, emitieron una media de 18%.

Emisiones unitarias de CO_2e de productores tradicionales

Para el análisis de los productores tradicionales de Apozol y Calvillo, las mayores emisiones fueron generadas por las emisiones A2 (fertilizantes orgánicos); análisis similar que obtuvo Yuan et al. (2017), donde evidenciaron que el impacto total de los fertilizantes orgánicos puede superar al de fertilizantes químicos. Cabe destacar que la A6 (emisiones indirectas de CH_4), originadas por la aplicación de materia orgánica (hojarasca y residuos de poda), representaron la segunda fuente más importante de emisiones dentro del grupo de los productores tradicionales de Calvillo. Este es un hallazgo relevante, ya que contradice la percepción de la FAO (2003), de que el uso de enmiendas orgánicas conlleva beneficios ambientales. Sin embargo, en este caso, los resultados mostraron que, dependiendo de las condiciones de uso y manejo, estas prácticas pueden contribuir de manera considerable a las emisiones de GEI, tal como también lo reportaron Thangarajan

et al. (2013). En el caso específico de los productores tradicionales de Jalpa, la A2 fue incluso la principal fuente de emisiones de $\text{CO}_2\text{e ha}^{-1}$, con un 26.4% (Figura 2).

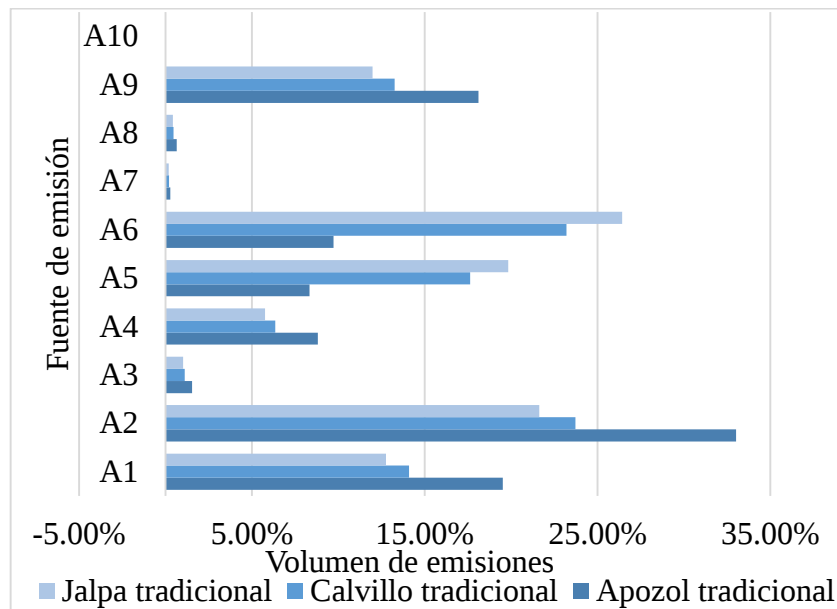


Figura 2. Volumen de emisiones de $\text{CO}_2\text{e ha}^{-1}$ por fuente de emisión tradicional.

Emisiones unitarias de CO_2e de productores industriales

En el sistema de producción industrial de Apozol, la mayor proporción de emisiones de $\text{CO}_2\text{e ha}^{-1}$ provino de la fuente A1 (fertilizantes sintéticos nitrogenados). A pesar de que no se identificaron diferencias estadísticamente significativas, las emisiones representaron el 24.3 % del total, lo que justificó una atención particular en su análisis (Figura 3). Este resultado es comparable con los de Andrade et al. (2015) y Guallasamin y Simón-Baile (2018), donde los fertilizantes nitrogenados fueron la fuente con mayor HC agrícola. Para los productores industriales de Calvillo y Jalpa, las A6 (emisiones indirectas de CH_4) fueron las que presentaron mayor HC ha^{-1} , seguido de las A5 (emisiones indirectas de N_2O). Este patrón se asocia con el aumento de emisiones de CO_2e en zonas con condiciones de piso térmico adverso.

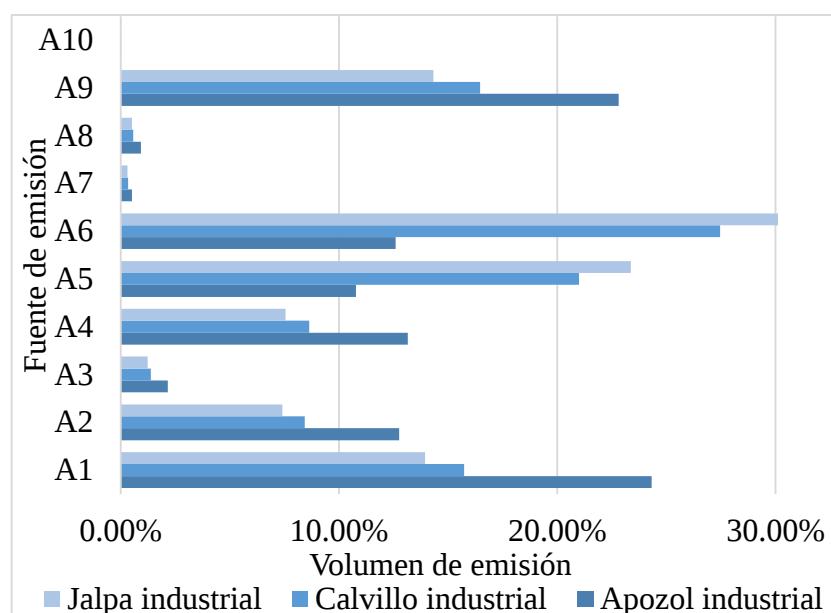


Figura 3. Emisiones de CO₂e ha⁻¹ por fuente de emisión industrial.

Emisiones totales de CO₂e

Los resultados mostraron una variabilidad en las emisiones de CO₂e ha⁻¹ de guayaba cosechada entre los distintos sistemas de producción analizados (Cuadro 4). En los sistemas tradicionales e industriales, el mayor valor se observó en los productores de Jalpa, seguidos por los productores de Calvillo y Apozol. La HC promedio en la región fue de 0.13 kg CO₂e kg⁻¹ de guayaba cosechada (0.14 y 0.12 CO₂e kg⁻¹ para tradicionales e industriales respectivamente). Estos hallazgos sugirieron que, si bien los sistemas industriales tienden a ser más eficientes en términos de emisiones por unidad de producto, existen diferencias relevantes incluso dentro de cada tipo de sistema. Estos resultados contrastan a los obtenidos por Carranza et al. (2016) al señalar que, a comparación de los sistemas modernos de producción agrícola, los sistemas tradicionales fueron los que emitieron menores cantidades de carbono, en particular por la adopción de prácticas sostenibles para el saneamiento de malezas.

Cuadro 4. Emisiones totales de la producción de guayaba.

	Productor tradicional			Productor industrial			Promedio	Promedio
	Apozol	Calvillo	Jalpa	Apozol	Calvillo	Jalpa	Tradicional	Industrial
kg CO ₂ e ha ⁻¹	1535.27	2105.83	2336.38	1329.74	2039.62	2327.97	1992.49	1899.11
HC kg ⁻¹	0.11	0.15	0.17	0.08	0.12	0.14	0.14	0.12
CE kg ⁻¹	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03

Los resultados obtenidos para la región Calvillo–Cañones evidencian una HC significativamente menor en comparación con referencias internacionales. En particular, la producción de guayaba en la zona de estudio registró un valor considerablemente inferior al promedio reportado para frutas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2024) (0.9 kg CO₂e kg⁻¹) y al valor documentado para cítricos por Ritchie (2020) (0.3 kg CO₂e kg⁻¹).

Desde una perspectiva comparativa, los resultados posicionan a la región como un sistema con baja intensidad de emisiones por unidad de producto, lo cual representa una ventaja competitiva en el contexto de mercados que incorporan criterios de sostenibilidad y HC. No obstante, es importante considerar que las diferencias metodológicas, los límites del sistema y las fuentes de datos pueden influir en la magnitud de los valores reportados, por lo que se recomienda cautela en la comparación directa y la adopción de enfoques estandarizados.

Desde la preparación inicial, hasta que el producto es retirado de la entidad productora, las mayores emisiones totales de CO₂e ha⁻¹ corresponden a los productores de Jalpa. Para los productores tradicionales de Jalpa, lo anterior es determinado tanto por las actividades que se realizan en la región para tratar de mitigar los efectos que las heladas provocan en el cultivo de guayaba, principalmente por la aplicación de hojarasca, como por el tipo de fertilización utilizada (A2, fertilizantes orgánicos). En el caso de los productores industriales de Jalpa, las emisiones significativamente más altas correspondieron a las fuentes A5 (emisiones indirectas de N₂O) y A6 (emisiones indirectas de CH₄). En

contraste, las emisiones totales significativamente más bajas se registraron en los sistemas tradicionales e industriales de Apozol, lo que evidenció una variación significativa entre municipios y tipo de productor, atribuible a las diferencias en las características de los productores entrevistados y en las condiciones térmicas de sus respectivas áreas de producción.

Costo económico de la huella de carbono

El análisis del CAA: HC reveló diferencias relevantes entre los sistemas de producción de guayaba en la región de estudio (Cuadro 4). El CAA: HC para los productores tradicionales, considerando un rendimiento de $14,065 \text{ kg ha}^{-1}$, y una HC de $0.14 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de guayaba cosechada, fue de 0.04 MXN kg^{-1} ; lo equivalente a $498.6 \text{ MXN ha}^{-1}$. Los productores industriales presentaron un CAA: HC menor (0.03 MXN kg^{-1} de guayaba cosechada), correspondiente a $468.6 \text{ MXN ha}^{-1}$, con mayores rendimientos ($16,443.3 \text{ kg ha}^{-1}$) y una HC más baja ($0.12 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$). Estos resultados indicaron que los sistemas industriales fueron más eficientes económica y ambientalmente, al emitir menos $\text{CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de guayaba cosechada y presentar un menor costo por tonelada emitida, destacando la utilidad de integrar indicadores económicos en la evaluación ambiental agrícola.

Con un tipo de cambio de 17.79 MXN por USD al 26 de marzo del 2026 (Banco de México, 2026), y en concordancia con los lineamientos propuestos por el Banco Mundial (2017), que establecen un impuesto al carbono en un rango de 40 a 100 USD $\text{t}^{-1} \text{ CO}_2\text{e}$ para el periodo 2020-2030 como medida de mitigación del cambio climático, en la presente investigación se estimó que los productores de la región analizada requerirían entre 1.4 y 1.8 ha^{-1} para cubrir el costo del impuesto ambiental equivalente bajo un escenario conservador de mercados de carbono. Asimismo, se determinó que serían necesarias entre 3.6 y 4.5 ha^{-1} para cumplir con la meta asociada a un escenario ambicioso de política climática internacional. Estos datos permiten dimensionar el peso económico que representa el costo ambiental de las emisiones en relación con la superficie cultivada, y sugieren que el sistema productivo de guayaba en la región posee la capacidad de absorber

un incremento en el impuesto al carbono sin comprometer de manera inmediata su viabilidad económica.

Conclusiones

El costo económico asociado a la HC de la producción de guayaba en la región Calvillo–Cañones presentó una variabilidad significativa en función del tipo de productor y del municipio de origen.

De acuerdo con la metodología utilizada en esta investigación, el CAA: HC es considerado privado; no obstante, dado que la HC representa una externalidad, es crucial evitar que la totalidad del costo recaiga sobre los productores, ya a que esto podría comprometer la sostenibilidad del sector, derivando en pérdida de producción o incluso en el abandono del cultivo. En cambio, para futuras investigaciones, se sugiere abordarlo como un costo social, pues su origen responde a actividades necesarias para el desarrollo regional. En este contexto, la gobernanza podría jugar un papel clave en la gestión eficiente de los costos sociales, al promover el diálogo, establecer regulaciones y desarrollar estrategias que reduzcan los efectos negativos en la sociedad.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo del presente manuscrito.

Referencias

Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco*, 11(1-2), 333-338.
<https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf>

- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Varona, J. P. (2015). Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 6(1), 19-28. <https://doi.org/10.22490/21456453.1260>
- Arrogante, Ó. (2022). Técnicas de muestreo y cálculo del tamaño muestral: Cómo y cuántos participantes debo seleccionar para mi investigación. *Enfermería intensiva*, 33(1), 44-47. <https://doi.org/10.1016/j.enfi.2021.03.004>
- Azuela, J. (2020). Análisis de la Varianza con SPSS. Departamento de Fomento Editorial de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. https://www.researchgate.net/publication/342453546_Analisis_de_la_Varianza_con_SPSS
- Banco de México. (2026). *Portal del mercado cambiario*. <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tip&idioma=sp>
- Banco Mundial. (2017). *Fijación del precio del carbono*. <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/carbon-pricing>
- Banco Mundial. (2023). *Ingresos sin precedentes derivados de la fijación del precio del carbono en el mundo: casi USD 100 000 millones*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/05/23/record-high-revenues-from-global-carbon-pricing-near-100-billion>
- British Standards Institution (BSI). (2012). *Assessment of life cycle greenhouse gas emissions from horticultural products*. BSI. https://www.vegetableclimate.com/wp-content/uploads/2013/10/Horticulture-products-carbon-footprint-New-Zealandsmallpdf.com_.pdf
- Carranza, G., Guzmán, G. I., Aguilera, E., De Molina, M. G., & García-Ruiz, R. (2016). Contribución de las variedades tradicionales de trigo a la mitigación del cambio climático en agroecosistemas mediterráneos de secano. *Agroecología*, 11(2), 7-22. <https://digitum.um.es/server/api/core/bitstreams/93209604-bd32-4834-8a10-11a1e74b5926/content>

- Climatic. (2025). *EMISSION FACTOR: Corrugated board*.
<https://www.climatiq.io/data/emission-factor/093bc821-ae6e-48db-b3e2-00955ff526bf?utm>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Normales Climatológica por Estado*. CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ags>
- Ecoinvent. (2016). *Data with purpose. ecoinvent is a trusted global resource for environmental data*. <https://ecoinvent.org/>
- Fajardo, P., & Cadenas R. (2022). Huella de carbono del cultivo de banano (*Musa paradisiaca*) en la hacienda La Victoria, provincia de El Oro. *Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 6(45), 167-178.
<https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol6iss45.2022pp167-178>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2003). *Agricultura Orgánica, Ambiente y Seguridad Alimentaria: Agricultura orgánica y cambios climáticos*. FAO. <https://www.fao.org/4/y4137s/y4137s00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2008). *Guide to PAS 2050-How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services*. FAO. <https://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/library/details/en/c/266040/?utm>
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N., & Olmos, X. (2012). *Huella de carbono y exportaciones de alimentos: Guía práctica*.
<https://repositorio.cepal.org/items/eb68b127-52f0-4c8a-9381-712f29eb4cda>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.^a edición digital). Instituto de Geografía-UNAM.
<https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251>
- Guallasamin, K., & Simón-Baile, D. (2018). Huella de carbono del cultivo de rosas en Ecuador comparando dos metodologías: GHG Protocol vs. PAS 2050. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (24), 27-56.
<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.24.2018.3091>

- Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT). (2023). *Cultivo y comercialización de la guayaba*. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. IIFT <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-GUAYABA-Cultivo-Comercializacion.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. INECC. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. INECC. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Censo Agropecuario (CA) 2022*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/#tabulados>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Lohr, S. L. (2022). *Sampling: Design and Analysis* (3.^a edición digital). Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429298899>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). *Calculadoras*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.html>
- Morales, R. A., Zorogastúa, P., De Mendiburu, F., & Quiroz, R. (2018). Producción mecanizada de maíz, camote y yuca en la Costa Desértica Peruana: Estimación de la huella de carbono y propuestas de mitigación. *Ecología aplicada*, 17(1), 13-21. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v17i1.1169>
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2023). *Reducción de los gases de efecto invernadero*. OIEA. <https://www.iaea.org/es/temas/reduccion-de-los-gases-de-efecto->

invernadero#:~:text=Por%20un%20lado%2C%20las%20actividades,qu%C3%A
Dmicos%2C%20plaguicidas%20y%20desechos%20animales.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2024). Los alimentos y el cambio climático: Una dieta más sana por un planeta más saludable. ONU. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/food>

Pigou, A. C. (2017). *The Economics of Welfare* (1.^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351304368>

Ritchie, H. (2020). *¿Quieres reducir la huella de carbono de tus alimentos? Concéntrate en lo que comes, no en si tus alimentos son locales.* <https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local#article-citation>

SEABOARD. (2024). *Huella de carbono.* <https://www.seaboard.com.ar/negocio/nuestra-sostenibilidad/huella-de-carbono>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2019). *La guayaba, poderosa y sabrosa.* SADER. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-guayaba-poderosa-y-sabrosa?idiom=es>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Aprueba Comisión Intersecretarial el PECC 2020-2024 y refrenda los compromisos de México ante el Acuerdo de París.* SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/aprueba-comision-intersecretarial-el-pecc-2020-2024-y-refrenda-los-compromisos-de-mexico-ante-el-acuerdo-de-paris>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024.* SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-especial-de-cambio-climatico-2021-2024>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024). *Registro Nacional de Emisiones.* SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). *El poder de la guayaba.* SIAP. <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-poder-de-la-guayaba>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Panorama Agroalimentario 2022*. SIAP. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Producción Agrícola*. SIAP. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. SIAP. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2017). *Generalidades de la Red Guayaba*. SNICS. <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/guayaba-psidium-guajava-l>
- Stiglitz, J.E. (2013). *The Price of inequality*. Editorial Taurus. <https://doi.org/10.1111/npqu.11358>
- Thangarajan, R., Bolan, NS, Tian, G., Naidu, R. y Kunhikrishnan, A. (2013). Papel de la aplicación de enmiendas orgánicas en las emisiones de gases de efecto invernadero del suelo. *Ciencia del Medio ambiente total*, 465, 72–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031>
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2), 99-114. <https://doi.org/10.2307/3001913>
- Wackerly, D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. (2010). *Estadística matemática con aplicaciones* (7.^a ed.). Cengage Learning. [https://www.cimat.mx/ciencia_para_jovenes/bachillerato/libros/\[Wackerly,Mendenhall,Scheaffer\]Estadistica_Matematica_con_Aplicaciones.pdf](https://www.cimat.mx/ciencia_para_jovenes/bachillerato/libros/[Wackerly,Mendenhall,Scheaffer]Estadistica_Matematica_con_Aplicaciones.pdf)
- Yuan, J., Sha, Z. M., Hassani, D., Zhao, Z., & Cao, L. K. (2017). Assessing environmental impacts of organic and inorganic fertilizer on daily and seasonal greenhouse gases effluxes in rice field. *Atmospheric Environment*, 155, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.007>

4. Impacto económico-ambiental de la producción de guayaba en el centro-norte de México²

Economic-environmental impact of guava production in north-central Mexico

Marco Andrés López-Santiago¹ (<https://orcid.org/0000-0002-7683-631X>), José Martín Ibarra-Hernández^{2*} (<https://orcid.org/0000-0003-3301-0646>), Blanca Isabel Sánchez-Toledano³ (<https://orcid.org/0000-0002-3460-334X>), Ramón Valdivia-Alcalá² (<https://orcid.org/0000-0003-0434-3169>)

¹Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio-Chihuahua, km 40, C.P. 35230. Bermejillo, Durango, México.

²Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, CP 56230. Chapingo, Estado de México. México.

³Campo Experimental Zacatecas (CEZAC) del INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo, km 24.5, C.P. 98500. Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México.

*Autor de correspondencia: martinibarrakhan@gmail.com

Artículo científico

Recibido: xx de xxx 202x

Aceptado: xx de xxx 202x

RESUMEN. México destaca mundialmente en la producción de guayaba (*Psidium guajava* L.), resultado de la coordinación entre productores y gobierno; a nivel nacional, la región Calvillo-Cañones concentra 30% de la producción nacional de guayaba y 0.27% del valor agrícola nacional. No obstante, el costo económico asociado al impacto ambiental de esta actividad no suele incorporarse en la valoración de su dinamismo económico. El objetivo fue comparar los beneficios económicos de la producción de guayaba con los costos económicos (CE) derivados de su huella de carbono (HC) y huella hídrica gris (HH_{gris}) en la región Calvillo-Cañones. La HC se estimó mediante la metodología PAS2050-1, y la HH conforme al enfoque de Water Footprint Network. El CE de la HC se calculó con base en el impuesto ambiental vigente en Zacatecas, mientras que el CE de la HH_{gris} se estimó según la tarifa pagada por productores regionales. Los resultados mostraron que, pese a la reducción de la superficie cosechada, el valor de la producción de guayaba en la región aumentó 1 369%. Simultáneamente, el CE asociado a su HC disminuyó 45.72%, fijándose en MXN 0.032 kg⁻¹ de guayaba cosechada. Se estimó que producir un kilogramo de guayaba requirió en promedio 2 504.34 L⁻¹ de agua, fijándose en MXN 0.028 kg⁻¹ de guayaba cosechada. El costo económico ambiental total

² Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

representó el 1.04% del valor económico promedio generado por ha cosechada. Se concluyó que el valor económico generado por la producción de guayaba superó los CE asociados a su HC y HH_{gris}.

Palabras clave: huella de carbono, huella hídrica, costo ambiental, región Calvillo-Cañones.

ABSTRACT. Mexico stands out worldwide in the production of guava (*Psidium guajava* L.), a result of the coordination between producers and government; at the national level, the Calvillo-Cañones region concentrates 30% of the national production of guava and 0.27% of the national agricultural value. However, the economic cost associated with the environmental impact of this activity is not usually incorporated into the assessment of its economic dynamism. The objective was to compare the economic benefits of guava production with the economic costs (CE) derived from its carbon footprint (HC) and water footprint (HH_{gris}) in the Calvillo-Cañones region. The HC was estimated using the PAS2050-1 methodology, and the HH according to the Water Footprint Network approach. The CE of the HC was calculated based on the environmental tax in force in Zacatecas, while the CE of the HH_{gris} was estimated according to the rate paid by regional producers. The results showed that, despite the reduction in the harvested area, the value of guava production in the region increased by 1 369%. Simultaneously, the CE associated with its HC decreased by 45.72%, settling at MXN 0.032 kg⁻¹ of harvested guava. It was estimated that producing one kilogram of guava required an average of 2 504.34 L⁻¹ of water, based on MXN 0.028 kg⁻¹ of harvested guava. The total environmental economic cost represented 1.04% of the average economic value generated per hectare harvested. It was concluded that the economic value generated by guava production exceeded the CE associated with its HC and HH_{gris}.

Keywords: carbon footprint, water footprint, environmental cost, Calvillo-Cañones region.

INTRODUCCIÓN

En México, aproximadamente 32.1 millones de ha se destinan al uso agrícola, lo que representa el 16.33% del territorio nacional (INEGI 2023). Dentro de esta superficie, la producción de guayaba ocupa una proporción reducida (0.08%), pero con relevancia económica, al generar un valor cercano a MXN 2.29 mil millones, equivalente al 0.27% del valor total de la producción agrícola (SIAP 2026). Este cultivo ha experimentado un proceso de intensificación y tecnificación que ha fortalecido su inserción en mercados internacionales, posicionando a México como uno de los principales productores a nivel mundial (SIAP 2024, SADER 2022). No obstante, el análisis de su desempeño se ha centrado predominantemente en indicadores productivos y económicos, mientras que sus implicaciones ambientales han sido abordadas de manera fragmentaria.

Desde la perspectiva de la economía ambiental, las actividades agrícolas, incluida la producción de guayaba, generan externalidades negativas sobre el medio ambiente (Smith y Siciliano 2015), además de distorsiones económicas derivadas de fallas de mercado y asignación ineficiente de precios (Pigou 1932), así como costos sociales que

no son asumidos por quienes las producen (Stiglitz 2012). Sin embargo, aún existe información limitada sobre la cuantificación y valoración económica de las externalidades ambientales derivadas de la producción de guayaba, las cuales permanecen parcialmente ocultas y no internalizadas dentro de la estructura económica del cultivo, particularmente aquellas asociadas con las emisiones de CO₂e y la contaminación potencial del agua. Bajo este contexto, los sistemas económicos actuales continúan subvalorando el capital natural y los servicios ecosistémicos que sostienen la producción agrícola y el bienestar humano (Bateman y Mace 2020, Costanza 2024).

En México, el sector agrícola contribuye con aproximadamente el 14% de las emisiones nacionales de GEI y concentra cerca del 77% del uso de agua dulce (INECC 2018, SADER 2024), lo que evidencia la magnitud potencial de dichas externalidades. En este contexto, la región Calvillo-Cañones destaca como una de las principales zonas productoras de guayaba, caracterizada por altos niveles de tecnificación en condiciones agroclimáticas restrictivas. Estas condiciones han incentivado un uso intensivo de insumos, particularmente fertilizantes nitrogenados y agua, cuyos impactos ambientales, incluyendo emisiones de CO₂e y contaminación de acuíferos (González y Camacho 2017). Sin embargo, persiste una limitación importante en los estudios existentes: la ausencia de evaluaciones integradas que vinculen de manera explícita los beneficios económicos del cultivo con la valoración monetaria de sus costos ambientales, especialmente a escala regional y para cultivos específicos como la guayaba.

Esta brecha es relevante porque la toma de decisiones en política agrícola y gestión productiva continúa basada en indicadores económicos convencionales que omiten dichas externalidades, lo que puede conducir a una sobreestimación de la rentabilidad real de la actividad. En consecuencia, resulta necesario avanzar hacia enfoques que integren métricas ambientales, como la huella de carbono (HC) y la huella hídrica (HH) con herramientas de valoración económica, a fin de evaluar de manera más completa el desempeño del sistema productivo.

En este sentido, el objetivo de esta investigación fue comparar los beneficios económicos de la producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones con los costos económicos (CE) asociados a su HC y HHgris, con el fin de determinar si el valor agregado generado por esta actividad compensa los costos ambientales que produce. De esta manera, el estudio contribuyó a la discusión sobre la internalización de externalidades en sistemas agrícolas mediante la generación de evidencia empírica regional y la monetización de externalidades ambientales en un sistema productivo de importancia nacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La región Calvillo–Cañones, integrada por los estados de Aguascalientes y Zacatecas, constituye la segunda zona productora de guayaba en México (SIAP 2024) y se

caracteriza por un alto nivel de tecnificación (SIAP 2019). Se ubica al oeste del estado de Aguascalientes y al suroeste de Zacatecas, a una altitud que oscila entre 1 237 y 1 817 m s. n. m respectivamente (INEGI 2024a). Presenta temperaturas promedio que varían de 8.1 °C en los meses más fríos hasta 31.3 °C en los más cálidos. Durante el periodo de octubre a marzo, se registran heladas, con temperaturas mínimas iguales o inferiores a 0 °C (CONAGUA 2024). La región está conformada por el municipio de Calvillo en Aguascalientes, junto con los municipios de Apozol, Huanusco, Jalpa, Juchipila, Moyahua de Estrada, Nochistlán de Mejía, Tabasco y Villanueva en Zacatecas (SADER 2019).

Tamaño de muestra y fuentes de información

Con el fin de recabar información del área de estudio y precisar la estimación del CE asociado a las emisiones de GEI y al consumo hídrico en la región, se recopilieron datos mediante la técnica de observación participante y encuesta mediante un cuestionario estructurado diseñado para registrar las cantidades de materias primas utilizadas a lo largo del proceso productivo. El instrumento se organizó en siete secciones: identificación de la unidad productiva, propagación, siembra, manejo durante el primer y segundo año, etapa de producción (tercer año) y cosecha, selección y empaque. Complementariamente, se incorporó información del SIAP (2026), del cual se obtuvieron datos sobre volumen de producción, precio medio rural y superficie cosechada (ha).

Con base en las 1 007 unidades de producción de guayaba en la región Calvillo-Cañones (N) registradas por el INEGI (2024b), se determinó un tamaño de muestra (n) de 88 encuestas, estimado mediante la fórmula propuesta por Aguilar-Barojas (2005). Se consideró un nivel de confianza del 95% (Z), una precisión absoluta de 0.1 (d), la proporción estimada de individuos que presentan el fenómeno en la población 0.5 (p), y una proporción que no lo presenta ($q = 1 - p$):

$$n = \frac{Z^2 N p q}{(N - 1) d^2 + Z^2 p q}$$

La muestra se obtuvo mediante muestreo en cadena; de acuerdo con Arrogante (2022), se trata de una técnica apropiada para contextos de difícil acceso. En este estudio se caracterizan por la dispersión geográfica de los productores, su localización en comunidades y localidades rurales (INEGI 2020), así como la limitada disponibilidad de marcos muestrales actualizados, en la que los propios participantes remiten a otros posibles encuestados hasta completar el tamaño muestral. De este procedimiento se derivó una muestra integrada por 35 entrevistas correspondientes a productores de guayaba de Aguascalientes y 53 a productores de Zacatecas.

Con el fin de ajustar la distribución de la muestra a la estructura poblacional de productores de guayaba en Aguascalientes y Zacatecas, se aplicó una ponderación post-estratificada. Este procedimiento permitió corregir el desbalance generado por el muestreo en cadena, de acuerdo con el enfoque propuesto por Lohr (2021), incorporando los pesos de expansión en las estimaciones y análisis presentados.

Los ponderadores para cada estrato (Wh) se estimaron mediante la relación entre la proporción poblacional (Nh/N) y la proporción observada en la muestra (nh/n). Donde Nh es el número total de unidades reales en la población dentro de ese grupo, y nh es el número de observaciones obtenidas en la muestra para ese grupo.

En Aguascalientes, la muestra representó el 40% (35) de las observaciones, mientras que en la población correspondía al 86% (866), obteniéndose un ponderador de 2.162; esto indicó que dicho estrato se encontraba subrepresentado y, por tanto, sus observaciones incrementaron su peso analítico. Por el contrario, Zacatecas representó el 60% (53) de la muestra, aunque únicamente constituía el 14% (141) de la población (1 007), generando un ponderador de 0.232, lo que refleja una sobrerrepresentación y la consecuente reducción de su influencia estadística.

Los factores de expansión (Fh) se obtuvieron mediante la expresión:

$$Fh = (nh/Nh)^{-1} * Wh$$

obteniéndose valores de 24.74 para Aguascalientes y 2.66 para Zacatecas. Estos factores indican el número de unidades poblacionales representadas por cada observación muestral dentro de cada estrato, permitiendo extrapolar los resultados de la muestra a la población total de estudio.

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las cantidad de emisiones de CO_2e generadas durante la producción de guayaba se estimó utilizando la metodología PAS 2050-1, diseñada específicamente para la evaluación de productos hortofrutícolas (Frohmann *et al.* 2012, BSI 2012). Adicionalmente, se cuantificó la emisión de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), uno de los principales gases asociados a las actividades agrícolas y con una contribución directa al cambio climático (IPCC 2007). Para ello, se usó la fórmula adaptada propuesta por Frohmann *et al.* (2012):

$$E: CO_2e, CH_4, N_2O = Na * Fe$$

Donde $E: CO_2e, CH_4, N_2O$ representa la emisión estimada de CO_2e , CH_4 y N_2O medidos en t^{-1} , Fe el factor de emisión correspondiente y Na el nivel de actividad de la fuente evaluada (BSI 2012, Frohmann *et al.* 2012).

Evaluación económica de las emisiones de CO_2e

Se elaboró una base de datos para registrar anualmente el valor económico (VE) en términos reales de la producción de guayaba, calculado como el producto de la cantidad producida por el precio medio rural real (PMRR), a precios constantes de 2018 y correspondiente a cada año del periodo 1990-2024. El PMRR se obtuvo mediante la siguiente fórmula, adaptada de Froyen (2013):

$$PMRR_i = \frac{PMR_i}{\left(\frac{IPC_i}{100}\right)}$$

Donde PMR_i representa el precio medio rural a precios corrientes del año i , e IPC_i corresponde al índice de precios al consumidor para el mismo año, obtenido del Banco Mundial (2025a).

Por su parte, el costo económico (CE) asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero se estimó mediante el producto entre el volumen total de emisiones expresadas en CO₂e y la tasa vigente del impuesto subnacional a GEI correspondiente al estado de Zacatecas; dicha tasa se encuentra establecida actualmente en MXN 250 (Gobierno de Zacatecas, 2025).

Pruebas estadísticas y econométricas

Con los valores de VE y CE, se estimaron regresiones para identificar la tendencia de las emisiones de CO₂e durante el periodo analizado, utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$$

Donde β_0 es el coeficiente de intersección y β_1 es el coeficiente de pendiente; es decir, son parámetros desconocidos pero constantes, denominados coeficientes de regresión (Gujarati y Porter 2010).

Para determinar si existe relación entre el VE y el CE, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson (r), el cual cuantifica la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas (X , Y) dentro de un conjunto de datos de tamaño N (Pagano, 2006). El r está dado por la fórmula:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{N}}{\sqrt{[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}][\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N}]}}$$

A fin de estimar la proporción de la variabilidad total de Y explicada por X (VE y CE), se utilizó el coeficiente de determinación (r^2), el cual se obtiene al elevar al cuadrado el valor obtenido de r (Pagano, 2006).

Huella hídrica

La estimación de la HH total, definida como un indicador que permite evaluar el uso del agua tanto de manera directa como indirecta en un proceso productivo (Vanham, 2016), se desarrolló con la metodología Water Footprint Network, de acuerdo con los lineamientos descritos en Hoekstra *et al.* (2021). Los componentes verde, azul y gris de la HH, presentados en $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$, son:

$$HH = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}}$$

Donde HH_{verde} representa el volumen de agua de lluvia almacenada en el suelo y consumida por el cultivo vía evapotranspiración, y se calcula como la relación entre el uso de agua del cultivo (UAC_{verde}), obtenido a través de la acumulación de evapotranspiración diaria (ET, mm d^{-1}) y su rendimiento (t ha^{-1}). El rendimiento fue de 15.44 t ha^{-1} para Aguascalientes y de 15.16 t ha^{-1} para Zacatecas, de acuerdo con datos de campo.

Para expresar la UAC_{verde} en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, se calcula multiplicando la evapotranspiración diaria acumulada por el factor 10; este valor corresponde al periodo de crecimiento del cultivo, el cual se define como el intervalo de tiempo, expresado en días (pcc), durante el cual la planta se desarrolla (Hoekstra *et al.* 2021). HH_{azul} corresponde al volumen de

agua superficial y subterránea utilizada en riego y consumida por evapotranspiración, la cual se estimó mediante un procedimiento análogo:

$$HH_{verde} = \frac{UAC_{verde}}{(t \text{ ha}^{-1})} = \frac{10 * \sum_{d=1}^{pcc} ET_{verde}}{(t \text{ ha}^{-1})}$$

$$HH_{azul} = \frac{UAC_{azul}}{(t \text{ ha}^{-1})} = \frac{10 * \sum_{d=1}^{pcc} ET_{azul}}{(t \text{ ha}^{-1})}$$

La HH_{gris} representa el volumen de agua necesario para la dilución de los agroquímicos empleados en el cultivo (Hoekstra *et al.* 2021); se estimó considerando la tasa de aplicación de agroquímicos (TA), la fracción de lixiviación por escorrentía superficial (ρ), la concentración máxima permitida (C_{max} , kg m^{-3}) del agroquímico, la concentración natural (C_{nat} , kg m^{-3}) del agroquímico y el rendimiento del cultivo:

$$HH_{gris} = \frac{(\rho \times TA) / (C_{max} - C_{nat})}{(t \text{ ha}^{-1})}$$

Los valores de C_{max} se definieron con base en los límites máximos permisibles de constituyentes químicos asociados a fertilizantes nitrogenados (Tabla 1) para la calidad del agua establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud 2000); estos compuestos representan algunos de los contaminantes agrícolas de mayor relevancia en los recursos hídricos (FAO 2026a). Ante la ausencia de información específica para C_{nat} , se asumió un valor igual a cero, siguiendo la recomendación de Hoekstra *et al.* (2021).

Tabla 1. Fertilizantes nitrogenados empleados en la producción de guayaba.

Fertilizante	Característica	Aguascalientes (TA, kg ha^{-1})	Zacatecas (TA, kg ha^{-1})	C_{max} (kg m^{-3})
Nitrato de potasio	Nitrato	95.36	83.25	0.01
Nitrato de calcio	Nitrato	95.36	83.25	0.01
Sulfato de amonio	Sulfato	95.36	83.25	0.4

Evaluación económica de la huella hídrica

Dado que este componente no se incorpora en los costos de producción, se estimó el CE asociado a la HH_{gris} . Para ello, el cálculo se realizó multiplicando el volumen de agua requerido para diluir los agroquímicos empleados, por la tarifa pagada por los productores locales (MXN 0.17 m^{-3}), valor obtenido mediante trabajo de campo. Adicionalmente, dicho volumen se valoró utilizando la tarifa de recaudación de agua aplicada en Calvillo de MXN 6.15 (Instituto del Agua del Estado de Aguascalientes 2022), con el fin de evaluar la viabilidad económica del sector guayabero regional en un escenario sin subsidios al agua destinada al uso agrícola.

Internalización del costo ambiental

Para la cuantificación monetaria del impacto ambiental asociado a la producción de guayaba, se estimaron e integraron los costos económicos derivados de la HC y de la

HH_{gris}, con el propósito de determinar el costo ambiental total atribuible al sistema productivo.

Procesamiento de datos

Para la estimación de las emisiones de GEI y su evaluación económica, los datos fueron procesados en el software Eviews y SPSS versión 27 (IBM Corp 2020). Los resultados se expresaron como medias, los cuales se obtuvieron con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). Dado que la región abarca dos entidades federativas destacadas en la producción de guayaba en México, para efectos analíticos se denominó Aguascalientes al segmento correspondiente dentro de ese estado y Zacatecas al sector ubicado en dicha entidad.

Para la estimación de los componentes verde y azul de la HH se empleó el software CropWAT 8.0, el cual permite estimar los requerimientos hídricos de los cultivos a partir de variables climáticas, edáficas y de evapotranspiración (Bouraima *et al.* 2015). En conjunto con los parámetros agronómicos del cultivo, como fechas de siembra y cosecha, profundidad radicular y características del suelo, se incorporaron promedios mensuales de variables climáticas de los últimos seis años, incluyendo temperatura mínima y máxima (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m s^{-1}) e insolación (h), reportados por la CONAGUA (2026). Para Aguascalientes se empleó la estación meteorológica 1011-Malpasso, mientras que para Zacatecas se utilizó la estación CHIZC-El Chique. Para la estimación de la HH_{gris}, los datos fueron procesados en el programa Excel.

RESULTADOS

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero

El análisis de las emisiones de metano y óxido nitroso durante el periodo estudiado evidenció una tendencia general decreciente, acompañada de fluctuaciones más pronunciadas en Aguascalientes (Tabla 2). En dicha zona, las emisiones de metano se redujeron en 38.7%, mientras que en Zacatecas la disminución alcanzó 65.5%. De forma similar, las emisiones de óxido nitroso presentaron una reducción de 33.3% en Aguascalientes y de 66.7% en Zacatecas.

Tabla 2. Evolución de las emisiones de metano y óxido nitroso 1990-2024.

Año	ha cosechadas		Producción de guayaba (t)		Emisión CH ₄ (t)		Emisión N ₂ O (t)	
	Ags	Zac	Ags	Zac	Ags	Zac	Ags	Zac
1990	7198	4464	114928	52139	106.38	55.26	6.10	3.14
1992	7188	4597	115005	54747	106.23	56.90	6.09	3.23
1994	6939	4971	108433	54016	102.55	61.53	5.88	3.50
1996	7594	5088	119083.3	56596	112.23	62.98	6.44	3.58
1998	3392	1351	48221	13495	50.13	16.72	2.88	0.95
2000	6551	5019	94372.9	44154	96.81	62.13	5.55	3.53

2002	6724	4954	101762	43574.9	99.37	61.32	5.70	3.49
2004	6846	5026	107869	44412	101.17	62.21	5.80	3.54
2006	6833	4708	109093	47968.4	100.98	58.28	5.79	3.31
2008	6643	3115	104959.4	28784.5	98.17	38.56	5.63	2.19
2010	6734	3842	108148.04	48222.38	99.52	47.56	5.71	2.70
2012	6218	3468.8	95770.2	46902.92	91.89	42.94	5.27	2.44
2014	6187.2	3040.12	98189.2	49863.94	91.44	37.63	5.24	2.14
2016	6188.2	3019.5	94845	46707.84	91.45	37.38	5.25	2.12
2018	6188.3	2883.5	68368.5	49480.97	91.45	35.69	5.25	2.03
2020	4170.9	1944	62897.1	32252.48	61.64	24.06	3.54	1.37
2022	5682	1667	84824	30886.8	83.97	20.63	4.82	1.17
2024	4415	1505	66559.5	23824.02	65.25	18.63	3.74	1.06

Ags: Aguascalientes, Zac: Zacatecas.

En Aguascalientes y Zacatecas se presentaron tendencias descendentes en las emisiones de CO₂e a lo largo del periodo 1990-2024 (Figura 1). Aguascalientes registró una reducción del 42.1%, mientras que Zacatecas presentó una disminución más pronunciada, del 54.3%; aunque en ambos casos se observaron fluctuaciones significativas.

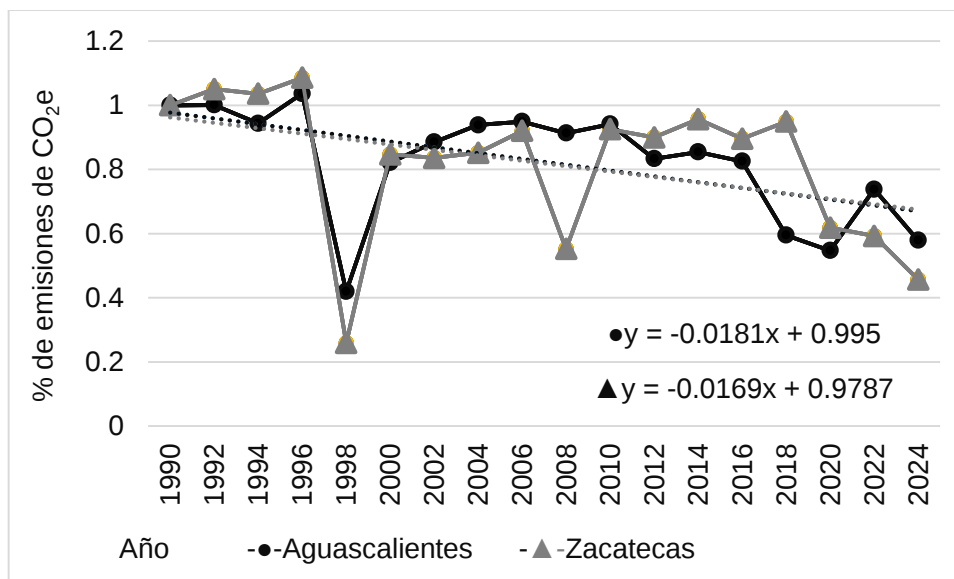


Figura 1. Evolución de las emisiones de CO₂e en la producción de guayaba en Aguascalientes y Zacatecas entre 1990 y 2024.

En Aguascalientes, las emisiones de CO₂e alcanzaron su punto más alto en 1996 (más de 16 mil t⁻¹ de CO₂e) y luego disminuyeron gradualmente, con una caída importante hacia 2018-2024, presentando una media de 12 775 ± 650 t. En Zacatecas, las emisiones fueron menores durante el periodo, con una media de 5 376 ± 353 t; se observó una

fuerte reducción en 1998 y una tendencia descendente sostenida a partir de 2010, llegando a su nivel más bajo en 2024 (3 mil t). Parte de esta evolución puede explicarse por la reducción gradual de las superficies cosechadas. Entre 1990 y 2024, la superficie de guayaba disminuyó 38.66% en Aguascalientes y 66.28% en Zacatecas (SIAP 2026), lo que impactó directamente en los niveles de producción y, en consecuencia, en la cantidad de emisiones de CO₂e.

Evaluación económica-ambiental de la huella de carbono

La Figura 2 y 3 muestran la evolución del VE de la producción de guayaba y del CE asociado a las emisiones de CO₂e en Aguascalientes y Zacatecas, respectivamente, durante el periodo 1990-2024. El valor de la producción de guayaba en Aguascalientes creció de MXN 19 millones en 1990 a MXN 499 millones en 2022, aunque con caídas como la del 31.7% entre 2016 y 2018, seguida de una recuperación parcial. En Zacatecas, también se observó un aumento sustancial desde MXN 14.27 millones en 1990 hasta un pico de MXN 360.47 millones en 2018, para luego descender hasta MXN 155.03 millones en 2024, lo que sugiere variaciones en condiciones productivas relacionadas con mercado, clima o recursos.

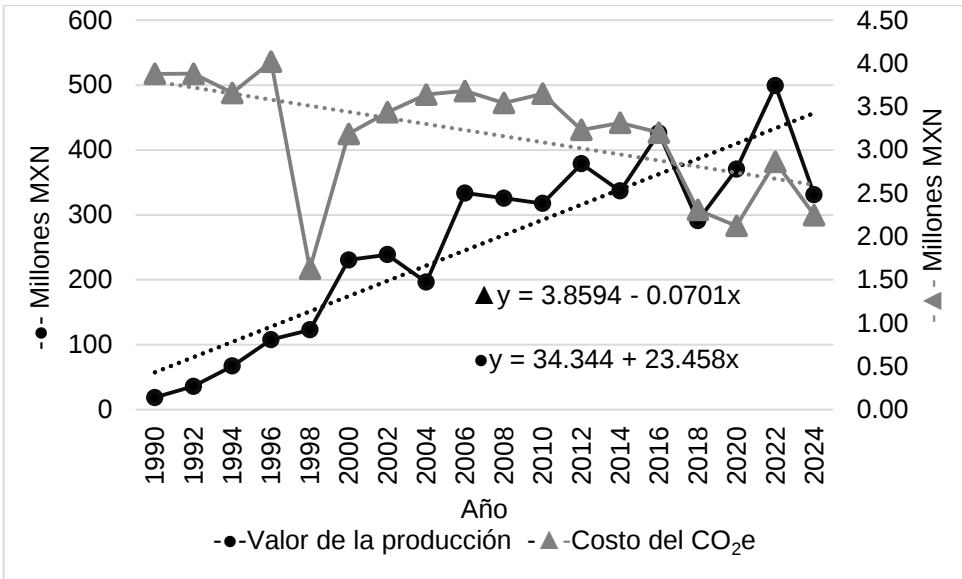


Figura 2. Comparativo del valor económico de la producción de guayaba y el costo económico de las emisiones de CO₂e en Aguascalientes.

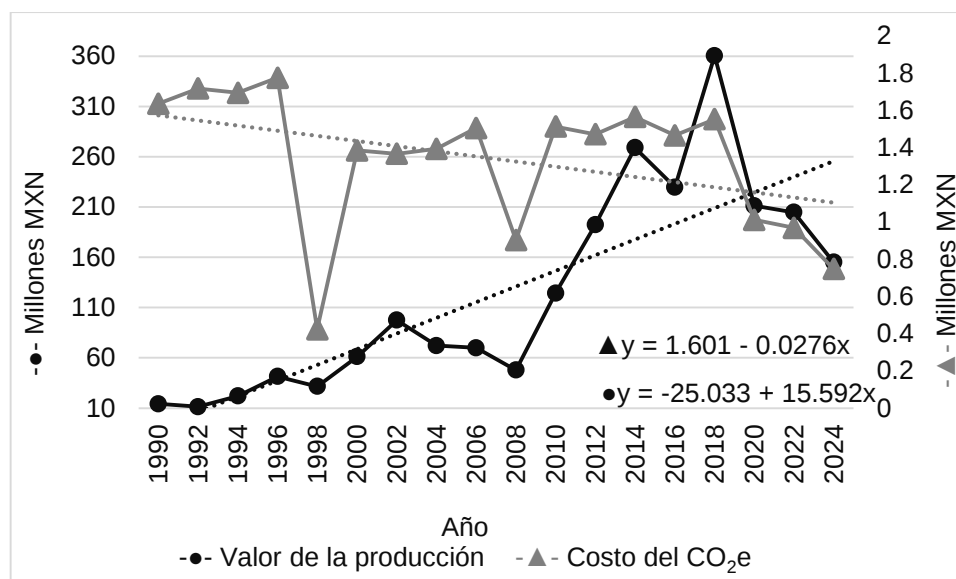


Figura 3. Comparativo del valor económico de la producción de guayaba y el costo económico de las emisiones de CO₂e en Zacatecas.

El costo económico de las emisiones de CO₂e mostró estabilidad relativa, aunque con diferencias: en Aguascalientes se mantuvo entre MXN 3.19 millones y MXN 4.02 millones durante las primeras décadas, pero entre 2018 y 2024 cayó cerca de 47% hasta situarse entre MXN 2.12 millones y MXN 2.86 millones; en Zacatecas predominó un rango de MXN 1.37 millones a MXN 1.78 millones, con descensos atípicos como el de 1998 (76% respecto a 1996). Se consolidó una tendencia descendente asociada con menores emisiones, registrándose un CE de MXN 0.032 kg⁻¹ de guayaba cosechada. Considerando un rendimiento promedio regional de 15.2 t ha⁻¹, el CE asociado con las emisiones de CO₂e fue de MXN 489.6 ha⁻¹, equivalente al 8.53% del VE promedio generado por tonelada y al 0.56% del VE promedio generado por hectárea. Se observó una relación débil entre el VE y el CE, con valores de $r = -0.335$ para Aguascalientes y $r = -0.025$ para Zacatecas; es decir, no se encontró evidencia de que el VE influya en el CE, ya que los coeficientes de determinación fueron $r^2 = 0.122$ y $r^2 = 0.001$, respectivamente. En ambos casos, la relación entre el VE de la producción de guayaba y su CE de las emisiones mostró que el crecimiento económico no siempre estuvo acompañado de un aumento proporcional en el costo ambiental.

Evaluación económica-ambiental de la huella hídrica

Tras la incorporación de las variables climáticas y parámetros del cultivo de guayaba en el software CropWAT 8.0, se obtuvo un valor promedio de evapotranspiración de 4.02 mm d⁻¹ para Aguascalientes y de 4.19 mm d⁻¹ para Zacatecas. Con base en los valores de precipitación mensual estimados mediante el método por defecto del software, se encontró un valor de UAC_{verde} de precipitación efectiva de 1 409.7 mm para Aguascalientes y 1 142.1 mm para Zacatecas. Asimismo, se obtuvo un valor de UAC_{azul} de precipitación efectiva de 1 857.9 mm y 2 229.3 mm, respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Aguascalientes: } HH_{\text{verde}} &= \frac{10 * 1409.7}{15.44} = 913.02 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \\ \text{Zacatecas: } HH_{\text{verde}} &= \frac{10 * 1142.1}{15.16} = 739.7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \\ \text{Aguascalientes: } HH_{\text{azul}} &= \frac{10 * 1857.9}{15.44} = 1203.3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \\ \text{Zacatecas: } HH_{\text{azul}} &= \frac{10 * 2229.3}{15.16} = 1443.85 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \end{aligned}$$

En la estimación de la HH_{gris} se consideró una fracción de lixiviación para fertilizantes nitrogenados de $p = 0.10$, conforme a lo propuesto por Chapagain *et al.* (2006). Con base en este valor, junto con la tasa de aplicación, el rendimiento y las concentraciones naturales y máximas permisibles de los agroquímicos empleados en la producción de guayaba en Aguascalientes y Zacatecas, se obtuvieron valores de HH_{gris} total de 125.07 y 111.19 $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ de guayaba cosechada, respectivamente (Tabla 3); es decir, para diluir los agroquímicos empleados en la región, se necesitaron en promedio 118.14 $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$.

Tabla 3. HH_{gris} de los fertilizantes nitrogenados empleados en la producción de guayaba.

Fertilizante	Aguascalientes $HH_{\text{gris}} \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$	Zacatecas $HH_{\text{gris}} \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$
Nitrato de potasio	61.76	54.91
Nitrato de calcio	61.76	54.91
Sulfato de amonio	1.54	1.37

Una vez estimados los componentes verde, azul y gris de la HH para Aguascalientes y Zacatecas, se calculó la HH total, obteniéndose valores de 2 491.52 $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ y 2 517.15 $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$, respectivamente. Estos resultados indican que, en la región Calvillo–Cañones, la producción de un kilogramo de guayaba requirió, en promedio, 2 504.34 L de agua por kilogramo de fruto producido (L kg^{-1}), valor que supera el promedio mundial de 1 800 L kg^{-1} , aunque se mantiene dentro del intervalo reportado internacionalmente, que oscila entre 1 430 L kg^{-1} para China y 2 860 L kg^{-1} para Tailandia (Hoekstra y Water Footprint Network 2020), países destacados en la producción de este cultivo (FAO 2026b, Tridge 2026). La Figura 4 muestra la distribución porcentual de la contribución de cada componente de la HH en la región de estudio, en comparación con el promedio global reportado en Mekonnen y Hoekstra (2011).

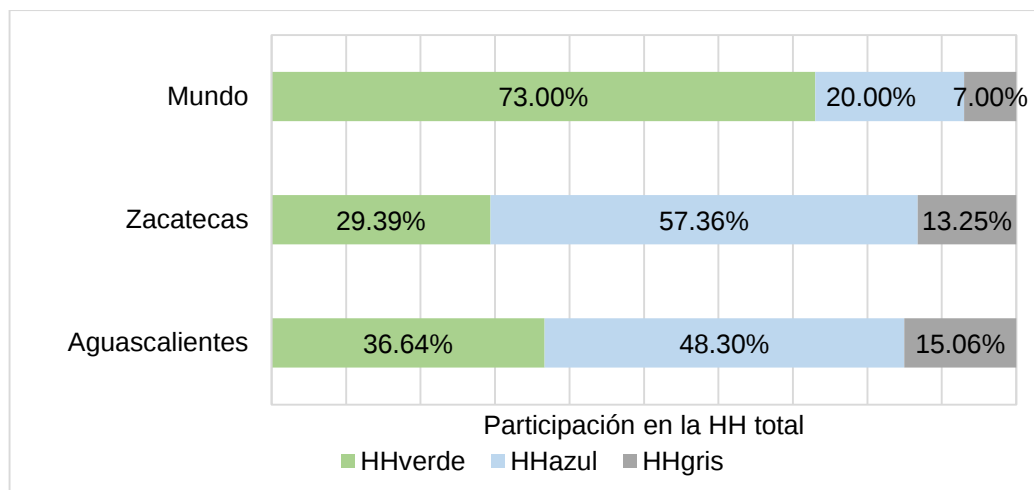


Figura 4. Distribución porcentual de los componentes de la huella hídrica en la producción de guayaba en la región Calvillo–Cañones y el promedio mundial.

Una vez obtenido el volumen de HH_{gris} , se determinó que, al estimar su CE en la producción de guayaba, este ascendió a $MXN\ 0.028\ kg^{-1}$ cosechado. Es decir, considerando un rendimiento promedio regional de $15.2\ t\ ha^{-1}$, el CE asociado a este componente alcanzaría $MXN\ 425.74\ ha^{-1}$, lo que equivale al 7.41% del VE promedio generado por tonelada ($MXN\ 5741.35\ t^{-1}$) y al 0.48% del VE promedio generado por hectárea ($MXN\ 87,842.68\ ha^{-1}$).

Al respecto, el IMCO (2023) señala que las tarifas por servicios de agua para uso agropecuario en México no reflejan el costo real de provisión de los organismos operadores. Bajo este contexto, al valorar la HH_{gris} utilizando el costo de recaudación aplicado en Calvillo de $MXN\ 6.15\ m^{-3}$, el CE asociado a este componente ascendería a $MXN\ 15\ 401.68\ ha^{-1}$, equivalente al 17.53% del VE promedio generado por ha de guayaba cosechada.

Costo ambiental internalizado

El costo económico ambiental de la producción de guayaba en la región Calvillo–Cañones fue de $MXN\ 915.34\ ha^{-1}$, equivalente al 15.94% del valor real promedio generado por tonelada, y al 1.04% del VE promedio generado por hectárea cosechada.

DISCUSIÓN

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero

El análisis de las emisiones de metano y óxido nitroso durante el periodo estudiado evidenció una tendencia decreciente en la región. Esto sugiere que, si bien se observó una tendencia estructural decreciente, la consolidación y estabilidad de dicha trayectoria dependerán de la continuidad de estrategias de gestión ambiental orientadas a sostener la reducción de emisiones en el largo plazo. Al respecto, De Silva *et al.* (2026) sostienen que una de las estrategias para mitigar las emisiones de metano

en la agricultura consiste en la implementación de técnicas de riego mejorado; no obstante, advierten que la efectividad de esta medida es específica a cada contexto; es decir, dependerán de condiciones ambientales, prácticas de manejo particulares y eficiencia de las políticas agrícolas.

En esta línea, Wong *et al.* (2023) recomiendan la adopción de técnicas de producción ecológicas por parte de los agricultores, al tiempo que señalan que ciertos esquemas de subsidios pueden incrementar las emisiones de GEI. Por su parte, Zhang *et al.* (2024) encontraron que el diseño de políticas agrícolas puede contribuir a reducir las emisiones del sector, siempre que estas se orienten hacia enfoques de agricultura tecnificada. Estas dos posturas indican que la eficacia ambiental de la política agrícola está condicionada por su estructura de incentivos.

Se presentaron tendencias descendentes en las emisiones de CO₂e a lo largo del periodo 1990-2024, donde parte de estas reducciones pueden atribuirse a la incorporación de mejoras tecnológicas en la producción de guayaba (SIAP 2024). Este efecto fue más evidente en Zacatecas, donde el rendimiento por hectárea aumentó 35.53%, mientras que en Aguascalientes se mantuvo en $15.18 \pm 0.27 \text{ t ha}^{-1}$ (SIAP 2026). Esta tendencia coincide con lo señalado por el INIFAP (2024), que reconoce a la tecnología agrícola como un mecanismo eficaz para disminuir la HC. No obstante, como advierten Mendoza (2012) y Borja *et al.* (2018), la adopción tecnológica se concentra en productores con mayores recursos, generando una tecnificación desigual y diferencias en las emisiones de CO₂e.

Evaluación económica-ambiental de la huella de carbono

El costo económico de las emisiones de CO₂e mostró una tendencia estructural decreciente. Dicha reducción sugiere mejoras en la eficiencia productiva, posiblemente vinculadas con avances biotecnológicos que elevaron el rendimiento por hectárea; el cual aumentó alrededor de 35% en el periodo analizado (SIAP 2026). Esto coincide con lo reportado por Valera-Montero *et al.* (2017), quienes destacan que la biotecnología permite identificar y seleccionar genotipos superiores con mayor potencial productivo. De igual forma, se alinean con la evidencia reportada por Yang *et al.* (2024) y Zheng *et al.* (2014), quienes señalaron que incrementos en el rendimiento reducen las emisiones por unidad de producto y mejoran la eficiencia ambiental.

Tanto en Aguascalientes como en Zacatecas, el valor de la producción aumentó, mientras el costo de las emisiones se mantuvo estable o incluso disminuyó, lo que sugiere una menor intensidad de emisiones por unidad económica. Estos hallazgos contrastan los reportados por el Banco Mundial (2025b) para México, donde se señala que las emisiones de CO₂e por unidad de valor económico generado presentaron variaciones mínimas. Es decir, esta divergencia sugiere que los procesos de mejora tecnológica y optimización productiva de guayaba fueron más dinámicos en la región Calvillo-Cañones que en el promedio nacional agregado.

Evaluación económica-ambiental de la huella hídrica

Se determinó que el principal componente del consumo hídrico en la producción de guayaba corresponde al agua de riego, proveniente tanto de fuentes subterráneas como superficiales, seguido del aporte de agua pluvial. Este resultado contrasta con lo reportado por Mekonnen y Hoekstra (2011), quienes señalan que, a escala global, la mayor proporción del consumo hídrico en la producción de este cultivo se atribuye a la HH_{verde}.

La discrepancia en el principal componente de consumo hídrico entre la región Calvillo-Cañones y el promedio mundial en la producción de guayaba puede atribuirse a las condiciones agroclimáticas de Aguascalientes y Zacatecas, cuyos rangos térmicos no son óptimos para el cultivo (SIAP 2019). De acuerdo con IIFT (2023), el desarrollo óptimo del guayabo se alcanza bajo precipitaciones anuales de 1 000 mm a 2 000 mm anuales; sin embargo, en la región productora la precipitación media es de 667.1 mm anuales (CONAGUA 2024), lo que evidencia que el riego constituye el principal mecanismo para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo.

Respecto al CE de la HH_{gris} bajo, dada a la reducida tarifa pagada por los productores locales frente al costo real de provisión del recurso hídrico, el resultado sugiere que, sin subsidios implícitos o explícitos al agua de riego, los costos de producción aumentarían sustancialmente. Lo anterior comprometería la rentabilidad y viabilidad económica de la actividad bajo las condiciones actuales; ello coincide con lo señalado por Hellegers *et al.* (2022), quienes documentan que los efectos positivos de los subsidios al agua de riego se reflejan en el desempeño económico del sector agrícola.

Balance entre viabilidad económica e impacto ambiental

El costo ambiental estimado, aunque reducido por ha, evidenció por tonelada que los impactos ambientales constituyen un componente relevante del proceso productivo de guayaba. Este resultado indica que la actividad mantiene viabilidad económica incluso incorporando externalidades ambientales. Sin embargo, la magnitud del costo por unidad producida subraya la necesidad de implementar estrategias de mitigación que incrementen la eficiencia ambiental sin afectar la competitividad. En este sentido, Sponagel *et al.* (2025) señalan que determinadas innovaciones tecnológicas poseen el potencial de disminuir los costos ambientales de manera costo-efectiva.

CONCLUSIONES

Se evidenció que las variaciones en el valor productivo no se acompañaron necesariamente de incrementos proporcionales en los costos por emisiones. Además, de que el componente dominante del consumo hídrico correspondió a la HH_{azul}, evidenciando una fuerte dependencia de fuentes hídricas gestionadas.

Se concluyó que el valor económico, generado por la producción de guayaba, superó los costos económicos asociados a su HC y HH, lo que confirma una relación estructuralmente favorable entre rentabilidad agrícola y presión ambiental.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia de ninguna índole.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Barojas S (2005) Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco*, 11(1-2): 333-338.
- Arrogante Ó (2022) Técnicas de muestreo y cálculo del tamaño muestral: Cómo y cuántos participantes debo seleccionar para mi investigación. *Enfermería intensiva*, 33(1): 44-47. <https://doi.org/10.1016/j.enfi.2021.03.004>
- Banco Mundial (2025a) Inflación, precios al consumidor (% anual) - México. <https://datos.bancomundial.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG?end=2024&locations=MX&start=1990>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2026.
- Banco Mundial (2025b) Carbon intensity of GDP. [https://data.worldbank.org/indicador/EN.GHG.CO2.RT.GDP.PP.KD?utm](https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.RT.GDP.PP.KD?utm). Fecha de consulta: 10 de enero de 2026.
- Bateman IJ, Mace GM (2020) The natural capital framework for sustainably efficient and equitable decision making. *Nature Sustainability*, 3(10), 776-783. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0552-3>
- Borja M, Vélez A, Ramos JL (2018) Tipología y diferenciación de productores de guayaba (*Psidium guajava* L.) en Calvillo, Aguascalientes, México. *Región y sociedad*, 30(71). <https://doi.org/10.22198/rys.2018.71.a402>
- Bouraima AK, Zhang W, Wei C (2015) Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 58-64. [10.3965/j.ijabe.20150802.1290](https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150802.1290)
- BSI (2012) Assessment of life cycle greenhouse gas emissions from horticultural. British Standards Institution. https://www.vegetableclimate.com/wp-content/uploads/2013/10/Horticulture-products-carbon-footprint-New-Zealandsmallpdf.com_.pdf. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2025.
- Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HH, Gautam R (2006) The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1): 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
- CONAGUA (2024) Normales Climatológica por Estado. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>. Fecha de consulta: 08 de noviembre de 2025.
- CONAGUA (2026) Estaciones Climatológicas. Comisión Nacional del Agua. <https://sih.conagua.gob.mx/climas.html?utm>. Fecha de consulta: 12 de enero de 2026.
- Costanza R (2024) Misconceptions about the valuation of ecosystem services. *Ecosystem Services*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101667>

- De Silva AGSD, Al-Musawi ZK, Samuel A, Malwalage SM, Ramanathan T, Kulmány IM, Molnár Z (2026) Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Crops and Management Practices: The Impact of the Integrated Crop Emission Mitigation Framework on Greenhouse Gas Reduction. *Agronomy*, 16(1): 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy16010005>
- FAO (2026a) Agriculture: cause and victim of water pollution, but change is possible. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/land-water/news-archive/news-detail/en/c/1032702/>. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2026.
- FAO (2026b) FAOSTAT: Production Indices. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QI>. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2026.
- Frohmann A, Herreros S, Mulder N, Olmos X (2012) Huella de carbono y exportaciones de alimentos: Guía práctica (LC/W.503). <https://repositorio.cepal.org/items/eb68b127-52fo-4c8a-9381-712f29eb4cda>. Fecha de consulta: 14 de marzo de 2026.
- Froyen R (2013) Macroeconomics: theories and policies. 10a Edición. Editorial Pearson. New Jersey, USA. 30p.
- Gobierno de Zacatecas (2025) Ley de Hacienda del estado de Zacatecas. <https://www.congresoza.gob.mx/65/ley&cual=57>. Fecha de consulta: 07 de enero de 2026.
- González A, Camacho M (2017) Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8): 1733-1745.
- Gujarati D, Porter D (2010) Econometría. 5a Edición. Editorial Mc Graw Hill. D.F., México. 44p.
- Hellegers P, Davidson B, Russ J, Waalewijn P (2022) Irrigation subsidies and their externalities. *Agricultural Water Management*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107284>
- Hoekstra A, Chapagain A, Aldaya M, Mekonnen M (2021) Manual de evaluación de la huella hídrica. Editorial AENOR, Internacional, S.A.U. Madrid, España. 67p.
- Hoekstra A, Water Footprint Network (2020) The Water Footprint Assessment Tool. <https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/#product-gallery>. Fecha de consulta: 26 de enero de 2026.
- IBM Corp (2020) IBM SPSS Statistics for Windows. <https://www.ibm.com/mx-es/products/spss-statistics>. Fecha de consulta: 18 de enero de 2026.
- IIFT (2023) Cultivo y comercialización de la guayaba. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-GUAYABA-Cultivo-Comercializacion.pdf>. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2025.
- IMCO (2023) El costo del agua en México: Un análisis de tarifas y de sus impactos para la sociedad. Instituto Mexicano para la Competitividad. <https://agua.org.mx/wp->

- content/uploads/2023/09/%C2%BFCual-es-el-costo-real-del-agua-en-Mexico-IMCO.pdf?utm. Fecha de consulta: 10 de enero de 2026.
- INECC (2018) Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>. Fecha de consulta: 23 de noviembre de 2025.
- INEGI (2020) Panorama sociodemográfico de México: Zacatecas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198053.pdf. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2026.
- INEGI (2023) Resultados oportunos del Censo Agropecuario 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/8210>. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2025.
- INEGI (2024a) Archivo histórico de localidades geoestadísticas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/ahl/>. Fecha de consulta: 08 de enero de 2026.
- INEGI (2024b) Censo Agropecuario (CA) 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/#tabulados>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2025.
- INIFAP (2024) El auge de la agricultura inteligente: explorando las aplicaciones de drones. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/el-auge-de-la-agricultura-inteligente-explorando-las-aplicaciones-de-drones>. Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2025.
- Instituto del Agua del Estado de Aguascalientes (2022) Plan Hídrico Estatal 2021-2050. Aguascalientes: Gobierno del Estado de Aguascalientes. <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/NormatecaAdministrador/archivos/EDO-23-180.pdf>. Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2025.
- IPCC (2007) Informe del Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas: RT.2.1.1 Cambios en el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso atmosféricos. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1-1.html. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2025.
- Lohr SL (2021) Sampling: Design and Analysis. 3a Edición. Chapman & Hall/CRC. New York, USA. 145p. <https://doi.org/10.1201/9780429298899>
- Mekonnen MM, Hoekstra AY (2011) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5): 1577-1600. doi:10.5194/hess-15-1577-2011

- Mendoza P (2012) Guayaba: innovaciones tecnológicas en Zacatecas. Problemas del desarrollo, 43(169): 174-175.
<https://doi.org/10.22201/iiiec.20078951e.2012.169.30786>
- Pagano RR (2006) Estadística para las ciencias del comportamiento. 7a Edición. Editorial Thomson, D.F., México. 217p.
- Pigou AC (1932) The Economics of Welfare. 4a Edición. Editorial Macmillan. Londres, Inglaterra. 101p.
- SADER (2019) Zacatecas, entre los principales estados productores de guayaba. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/agricultura/zacatecas/articulos/zacatecas-entre-los-principales-estados-productores-de-guayaba?idiom=es#:~:text=En%20Zacatecas%2C%20se%20produce%20guayaba,de%20Mej%C3%ADa%2C%20Tabasco%20y%20Villanueva>. Fecha de consulta: 28 de enero de 2026.
- SADER (2022) Garantiza Agricultura producción y abasto de guayaba para esta temporada decembrina. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/agricultura/prensa/garantiza-agricultura-produccion-y-abasto-de-guayaba-para-esta-temporada-decembrina>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2025.
- SADER (2024) Conoce la huella hídrica de los cultivos y los alimentos. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/conoce-la-huella-hidrica-de-los-cultivos-y-los-alimentos>. Fecha de consulta: 17 de noviembre de 2025.
- Secretaría de Salud (2000) Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0. Fecha de consulta: 19 de enero de 2026.
- SIAP (2019) El poder de la guayaba. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cdgsiap/es/articulos/el-poder-de-la-guayaba>. Fecha de consulta: 14 de diciembre de 2025.
- SIAP (2024). Panorama Agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap>. Fecha de consulta: 03 de enero de 2026.
- SIAP (2026) Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2026.
- Smith LE, Siciliano G (2015) A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. Agriculture, Ecosystems & Environment, 209: 15-25.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.016>
- Sponagel C, Weik J, Witte F, Back H, Wagner M, Ruser R, Bahrs E (2025) Climate change mitigation potential and economic evaluation of selected technical adaptation

- measures and innovations in conventional arable farming in Germany. *Journal of Environmental Management*, (374).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123884>
- Stiglitz JE (2012) *The Price of inequality*. Editorial Taurus. Madrid, España. 93p.
- Tridge (2026) Fresh Guava Market Overview 2026. <https://www.tridge.com/market-overview/fresh-guava#production>. Fecha de consulta: 20 de febrero de 2026.
- Valera-Montero LL, Hernández-Dávila A, Silos-Espino H, Flores-Benítez S (2017) Variación genética en guayaba mediante RAPDs y descriptores morfológicos en Calvillo, Aguascalientes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1): 67-77.
- Vanham D (2016) Does the water footprint concept provide relevant information to address the water–food–energy–ecosystem nexus? *Ecosystem Services*, 17: 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.08.003>
- Wong SA, Rondione G, De Salvo C (2023) Agricultural support policies and GHG emissions from agriculture in Latin America: relationships and policy implications for climate change. *Revista Iberoamericana De Estudios De Desarrollo*, 12(2), 102-140. https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.783
- Yang X, Xiong J, Du T, Ju X, Gan Y, Li S,... Butterbach-Bahl K (2024) Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 15(1): 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
- Zhang Z, Jiang S, Shen B, Mei Y, Zhang X (2024) The carbon emission reduction effect of smart agricultural policy-evidence from China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8: 1-14. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1482834>
- Zheng H, Huang H, Yao L, Liu J, He H, Tang J (2014) Impacts of rice varieties and management on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: A meta-analysis. *Biogeosciences*, 11(13): 3685–3693. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3685-2014>

5. CONCLUSIONES GENERALES

Los costos económicos vinculados a la HC en la producción de guayaba de la región Calvillo–Cañones mostraron diferencias importantes según el tipo de productor y el municipio de procedencia. Asimismo, se observó que un mayor valor productivo no implicó necesariamente un incremento proporcional en los costos derivados de las emisiones.

El análisis evidenció que la HH_{azul} constituyó el principal componente del consumo hídrico en la producción de guayaba, lo que refleja una elevada dependencia de recursos hídricos provenientes de fuentes gestionadas.

Se determinó que el valor económico generado por la producción de guayaba fue superior a los costos económicos asociados tanto a la HC como a la HH, lo que indica una relación favorable entre la rentabilidad de la actividad agrícola y la presión ambiental ejercida.