

TESIS DE MAESTRÍA ACADÉMICA

Eficiencias económica-ambiental de fincas ganaderas
bovinas en Mesoamérica

Harold Isaías Guerrero



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Eficiencias económica-ambiental de fincas ganaderas bovinas en Mesoamérica

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Economía, Desarrollo y Cambio Climático

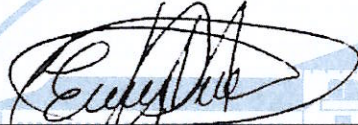
Presenta
Harold Isaías Guerrero

Turrialba, Costa Rica
2024


Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN ECONOMÍA, DESARROLLO
Y CAMBIO CLIMÁTICO**

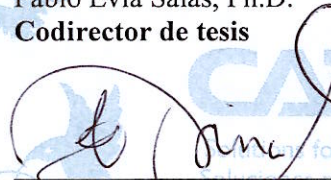
FIRMANTES:



Felipe Peguero Pérez, Ph.D.
Codirector de tesis



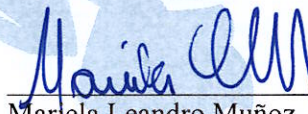
Pablo Evia Salas, Ph.D.
Codirector de tesis



Cristóbal Villanueva Najarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Andrés Vega Fonseca, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, Escuela de Posgrado



Harold Isaias Guerrero
Candidato

Agradecimiento

Al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT), por otorgarme la beca y la oportunidad de lograr esta meta que formaba parte de mi plan de vida y educación.

A mi comité, por su guía y excelente apoyo. Al Dr. Felipe Peguero, Dr. Pablo Ernesto Evia, Dr. Cristóbal Villanueva y el Sr. Andrés Vegas por su disponibilidad, orientación, guía y enseñanza en el desarrollo de este proyecto.

A CATIE por brindarme la oportunidad para conocer muchas personas, sus cultura y tradiciones. Una nueva familia en diversos países de América.

A los compañeros y compañeras de estudios que, a pesar de muchos tropezones y dolor de cabeza, fueron parte de la experiencia de vida en el CATIE.

Dedicatoria

A mi madre, hermanos, tíos y amigos, quienes son la base que me impulsan para seguir adelante.

A Josefina Espaillat (mamá Josefina), quien previo a esta etapa y en el transcurrir de mi formación académica, me ha brindado su gran apoyo.

A tía Luz Insania Alcántara, quien ha sido mi fuente de inspiración a lo largo de mi vida y el motor para que cada día continúe estudiando una más.

A todos y cada una de las personas que de manera incondicional hicieron posible el cumplimiento de esta meta.

Resumen

La ganadería en Mesoamérica enfrenta desafíos significativos en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia económica. Este estudio se enfocó en analizar la eficiencia económica y ambiental de fincas ganaderas bovinas en la región, con el fin de identificar factores determinantes de su desempeño y proponer recomendaciones en la mejora de su sostenibilidad. Se contextualizó la importancia de promover sistemas de producción ganadera sustentables en Mesoamérica, destacando la falta de estudios exhaustivos sobre la ineficiencia en el sector ganadero y la necesidad de implementar estrategias de intervención basadas en enfoques como la agricultura climáticamente inteligente. La metodología se basó en el análisis de datos recopilados en fincas intervenidas por el CATIE en varios países de la región, considerando variables relacionadas con la producción, las emisiones de CO₂eq y la eficiencia económica-ambiental. Se utilizó un indicador específico para evaluar la relación entre ingresos y emisiones de las fincas ganaderas. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los países en términos de eficiencia económica y ambiental, así como en la producción y emisiones de gases de efecto invernadero. El análisis detallado de estas variables permitió identificar patrones y tendencias que reflejan la situación actual de las fincas ganaderas en Mesoamérica. Las conclusiones resaltaron la importancia de integrar la eficiencia económica y ambiental en las decisiones de manejo de las fincas ganaderas, así como la necesidad de promover prácticas agrícolas sostenibles y políticas que impulsen un desarrollo ganadero responsable y adaptado a los desafíos actuales. Se destacaron recomendaciones para mejorar la sostenibilidad del sector, incluyendo la adopción de tecnologías eficientes, la capacitación de los productores y el acceso a mercados justos y equitativos.

Palabras claves: Economía, ambiente, emisiones de gases de efecto invernadero, Sistemas de producción ganadera, sostenibilidad.

Abstract

Livestock farming in Mesoamerica faces significant challenges in terms of environmental sustainability and economic efficiency. This study focused on analyzing the economic and environmental efficiency of cattle farms in the region, in order to identify determining factors of their performance and propose recommendations to improve their sustainability. The importance of promoting sustainable livestock production systems in Mesoamerica was contextualized, highlighting the lack of exhaustive studies on inefficiency in the livestock sector and the need to implement intervention strategies based on approaches such as climate-smart agriculture. The methodology was based on the analysis of data collected on farms intervened by CATIE in several countries of the region, considering variables related to production, CO₂eq emissions and economic-environmental efficiency. A specific indicator was used to assess the relationship between income and emissions of livestock farms. The results showed significant differences between countries in terms of economic and environmental efficiency, as well as in greenhouse gas production and emissions. The detailed analysis of these variables allowed the identification of patterns and trends that reflect the current situation of cattle farms in Mesoamerica. The conclusions highlighted the importance of integrating economic and environmental efficiency into the management decisions of livestock farms, as well as the need to promote sustainable agricultural practices and policies that promote responsible livestock development adapted to current challenges. Recommendations to improve the sustainability of the sector were highlighted, including the adoption of efficient technologies, training of producers, and access to fair and equitable markets.

Keywords: Economy, environment, greenhouse gas emissions, livestock production systems, sustainability.

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
2	Materiales y métodos.....	4
2.1	Descripción del área de estudio.....	4
2.2	Diseño y sitios de muestreos.....	4
2.2.1	<i>Metodología para estimar el indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas</i>	5
2.2.2	<i>Estimación de ingreso por finca</i>	5
2.2.3	<i>Estimación de emisiones de CO₂eq totales por finca</i>	6
2.2.3.1	<i>Estimación de las emisiones de CH₄ por fermentación entérica</i>	6
2.2.3.2	<i>Estimación de las emisiones de CH₄ por producción de excretas</i>	7
2.2.3.3	<i>Estimaciones de las emisiones del N₂O por las producciones de las excretas.</i>	7
2.2.3.4	<i>Estimaciones de las emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles.</i>	7
2.2.3.5	<i>Estimación de la emisión de CO₂ por uso de electricidad.</i>	8
2.2.3.6	<i>Estimaciones totales por año de las emisiones de GEI para cada finca</i>	8
2.2.4	<i>Metodología para determinar los factores socioeconómicos, biofísicos y productivos que explican las ineficiencias en fincas ganaderas.</i>	8
3	Resultados.....	10
3.1	Armonización base de dato general	10
3.2	Propuesta de un indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas bovinas 11	
3.2.1	<i>Cálculo y utilidad del indicador US\$/t CO₂-eq</i>	11
3.3	Resultados descriptivos del Indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas bovinas.....	12
3.3.1	<i>Estadística descriptiva</i>	12
3.4	Resultados de la Frontera Estocástica de Producción (FSP)	21
3.4.1	<i>Estimaciones</i>	21
3.4.1.1	<i>Modelo de la frontera estocástica de producción</i>	21
3.4.1.2	<i>Validación de supuestos</i>	27
3.4.1.3	<i>Limitaciones en el estudio</i>	28
4	Conclusiones y Recomendaciones	29
4.1	Conclusiones	29
4.2	Recomendaciones	29
5	Bibliografía	30
Anexos		38

1 Introducción

La Región de Mesoamérica es una región económicamente reconocida a nivel internacional ubicada en la porción media del continente americano, reconocida por la OCDE y otras organizaciones económicas y de desarrollo. Es una región rica en biodiversidad, en ecosistemas frágiles y su relevancia cultural. Esta zona comprende las economías integradas de los países del Caribe, Centro América y México. La ganadería y las prácticas agrícolas son dos actividades de mucha importancia económica, social y ambiental en la región (Gudynas, 2015; Thomas, 2009; FAO, 2023; Gayubas, 2024; Kiss, 2024).

La región Mesoamericana se define como un "territorio económico", que busca impulsar la integración y el desarrollo desde el sureste mexicano hasta los países centroamericanos. Fue identificada por la OCDE y otras organizaciones para enfocar una región económica común, considerando su desarrollo en términos de su historia, cultura y geografía (Gayubas, 2024; Kiss, 2024). El sector ganadero, en la región mesoamericana, ha tenido una historia significativa y ha sido influenciado por las culturas y prácticas agrícolas prehispánicas. Tiene raíces históricas en la región andaluza y extremeña de España y se desarrolló en México durante la época de la colonización y se ha diversificado en diferentes sistemas productivos. La ganadería es una actividad tradicional en la región mesoamericana, con importantes aportes a la economía (Moscoso Díaz et al. 2018; Payés, 2018). Esta industria contribuye a crear empleo, mejorar la nutrición, impulsar la economía, reducir la pobreza y proporcionar seguridad alimentaria en toda la región, especialmente en las regiones rurales (FAO, 2023). La ganadería representa 1.3% de Producto Interno Bruto (PIB). Dentro del sector agropecuario, la ganadería bovina representa aproximadamente el 20% del PIB agrícola (Acosta y Díaz, 2014).

Lo anterior representa algunos puntos clave sobre el desarrollo de la ganadería en la región:

- La ganadería en Mesoamérica se caracterizó por la cría de animales como cerdos, vacas, pollos, borregos, etc. y se enfocaba en la generación de alimentos para consumo humano. El sector ganadero se desarrolló en diferentes sistemas productivos, desde los altamente tecnificados hasta los de economía tradicional (Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017).
- La ganadería en Mesoamérica ha tenido un impacto significativo en el medio ambiente. En el pasado, la concentración de ganado en áreas específicas, como el Huastecapan y el Papaloapan, causó efectos ecológicos negativos, como el pisoteo y el ramoneo. Sin embargo, los sistemas de pastoreo y manejo trashumante ayudaron a mitigar estos efectos (Barrera Bassols, 1996).

A pesar de los aportes económicos significativos, el sector ganadero tiene un impacto ambiental significativo y multifacético. Según el informe de Steinfeld et al. (2009), la contribución mundial del sector ganadero, que engloba el vacuno, ovino, caprino, porcino y avícola, representaron el 18% de las emisiones de gases de efectos invernaderos (GEI). Solo la industria vacuna representó el 62% del total global emitido del sector en general (FAO, 2023). Además, existen otras externalidades negativas al ambiente asociadas con la actividad ganadera, tales como:

- La ganadería ocupa una gran cantidad de tierra, lo que puede llevar a la destrucción de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad (Agrocampo, 2022).
- El estiércol no controlado puede contaminar el suelo, el agua y la atmósfera, afectando la salud humana y causando enfermedades (Agrocampo, 2022; Chavarrías, 2007).
- La producción de estiércol se incrementa con la creciente demanda de carne y leche, lo que, a su vez, aumenta la contaminación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023; Chavarrías, 2007).
- La ganadería es responsable de las emisiones deferidas a las actividades reconocidas como óxido nitroso, dióxido de carbono y metano, lo que contribuye significativamente al cambio climático (FAO, 2023; Chavarrías, 2007).
- La deforestación tropical también es un factor importante, aportando entre un 20 y un 25% de las emisiones (FAO, 2021; Chavarrías, 2007).
- La ganadería puede contribuir a la pérdida de biodiversidad al destruir ecosistemas y reducir la variedad de especies de forrajes favoritas (FAO, 2021; Chavarrías, 2007).
- El pastoreo excesivo y la erosión del suelo pueden causar la degradación de la tierra, reducir su fertilidad y estructura (FAO, 2021; Agrocampo, 2022).

La ganadería es un sector estratégico y fundamental para América Latina y el Caribe (ALC), que representa una importante fuente de alimentos básicos y un pilar clave para la economía de la región (Agronews, 2014). Como resultado, ALC se ha convertido en la región que más exporta carne bovina y de ave a nivel mundial (Álvarez Kalverkamp y Ledger (Eds.), 2014). Sin embargo, el sector ganadero es un importante impulsor de la deforestación porque la mayoría de los bosques eventualmente se convierten en pastizales (Hecht, 1993; Kaimowitz, 1995). El deterioro de los bosques forestales se debe, en parte, a la expansión del sector agrícola y ganadero, lo cual contribuyó al 26% de la pérdida mundial de cobertura arbórea entre 2001 y 2015 (Curtis et al. 2018; Goldman et al., 2020; Weisse y Goldman, 2021). No obstante, este rápido desarrollo también ha generado importantes desafíos y riesgos para la sostenibilidad ambiental y social.

La ganadería es responsable del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la región, una de las principales causas del calentamiento global. Otros problemas ambientales incluyen la degradación de la tierra por sobrepastoreo, la deforestación para expansión de pastizales y cultivos, y la contaminación asociada a sistemas ganaderos intensivos (Deloitte Ecuador, 2021). A pesar de los impactos ambientales negativos, el sector ganadero tiene mucho potencial de mejorar sus eficiencias ambientales, para mitigar estos impactos, es necesario adoptar prácticas sostenibles, como la integración de la producción ganadera, el establecimiento y la asociación de árboles en fincas, adopción en los sistemas silvopastoriles, la adopción de prácticas compatibles con la ganadería climáticamente inteligente y la reducción de la producción de estiércol y gases de efecto invernadero (FAO, 2023; Moscoso Díaz et al. 2018; Milesi, 2016). Por su parte, Ibrahim et al. (2010) señala que la región está aumentando su predisposición por el uso y mejora de pastos y manejo de sistemas silvopastoriles, que pueden aumentar la eficiencia medioambiental reduciendo las emisiones de GEI y secuestrando carbono.

Para enfrentar estos desafíos es crucial que los países de ALC promuevan sistemas de producción ganadera sustentables, que consideren los potenciales impactos ambientales y sociales. La ganadería se maneja con muchos niveles de ineficiencias en la región. Gran parte de esta práctica de manera extensiva, caracterizada por el bajo nivel de productividad, reproducción, adopción tecnológica, entre otras; agrava la problemática por la falta de capacidades técnicas de los productores, el bajo conocimiento de buenas prácticas ganaderas, poca asistencia técnica, deficiencias en el acceso al financiamiento competitivo (Milesi, 2016). Las ineficiencias del sector ganadero en la región mesoamericana se conocen de manera anecdótica. Se evidencian pocos estudios que estén relacionados con analizar los factores que determinan la ineficiencia en el sistema ganadero de la región, lo cual es clave para implementar estrategias de intervención con enfoques como la agricultura climáticamente inteligente donde ésta pueda contribuir a equilibrar la productividad, sostenibilidad y mitigación del cambio climático en el sector.

Por otro lado, la utilidad del estudio permitiría la implementación de políticas públicas y estrategias innovadoras, que permitan aprovechar las oportunidades económicas de la ganadería de manera responsable y sostenible desde un adecuado diagnóstico sobre la ineficiencia económica y ambiental en la región Mesoamericana; además la investigación intenta crear un indicador de eficiencia ambiental que permita evaluar ambas dimensiones de manera simultánea y con ellos identificar factores que determinan las ineficiencias de estos sistemas productivos de ganadería (SPG) en la región. Al evaluar estas dimensiones en el sector ganadero se lograría implementar prácticas eficientes en la producción, el uso sostenible de recursos naturales y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo información confiable y veraz al conocer el grado de eficiencia económica-ambiental de una finca en la región Mesoamericana e informar a los gerentes de proyectos y/o gobiernos locales sobre el desarrollo sostenible y la reducción de impactos negativos en el medio ambiente.

El presente estudio tuvo como objetivo analizar los factores que determinan la eficiencia económica y ambiental, para facilitar la toma de decisiones de fincas con ganaderas bovinas en la región de Mesoamérica. En concreto, se analizaron las siguientes preguntas de investigación ¿Cuál es el nivel de eficiencia económica que tienen las fincas ganaderas? ¿Cuál es la distribución del indicador de eficiencia económica-ambiental (US\$ /t CO₂-eq) entre fincas y sistemas productivos y nivel de intensificación? ¿Cuál es la correlación entre el indicador de eficiencia-económica y las variables disponibles, considerando su análisis descriptivo? ¿Cuáles son los factores que más explican las ineficiencias económicas-ambientales en las fincas ganaderas de Mesoamérica?

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción del área de estudio

Esta investigación se fundamentó en datos de fincas intervenidas e investigadas por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanzas (CATIE) en la Unidad de Ganadería y Manejo del Ambiente (GAMMA) en Mesoamérica, específicamente, como un plan piloto para conocer su eficiencia en Honduras, Nicaragua, Costa Rica, México, Panamá y en República Dominicana (Figura 1). Base de datos de fincas ganaderas que han participado en proyectos implementados por la Unidad de Ganadería, en el período 2015–2023.

Figura 1. *Mapa Mesoamérica*



2.2 Diseño y sitios de muestreos

Las bases de datos generales se construyen a partir de varios proyectos como un plan piloto implementados por CATIE en Mesoamérica. En México, a través del proyecto BIOPASO (Biodiversidad y Paisajes Ganaderos Agrosilvopastoriles Sostenibles), se generó una base de datos de 743 fincas monitoreadas. En República Dominicana y Panamá a través del proyecto CCAC (Coalición Clima y Aire Limpio) se levantó información en 62 y 64 fincas, y a través del proyecto FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) se recolectaron datos para Costa Rica de 17 fincas, y Nicaragua 298 fincas, para Honduras a través del proyecto Paisaje Ganadero se recolectaron datos de 58 fincas, la cual constan en general con 1 204 observaciones, respectivamente.

2.2.1 Metodología para estimar el indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas

En este estudio se consideró eficiencia económica-ambiental de una finca ganadera como la relación entre los ingresos y las emisiones de la finca. Una finca con mayor eficiencia se define como aquella máxima de sus ingresos totales con el mínimo de emisiones de CO₂-eq. Por tanto, el indicador de eficiencia económica-ambiental está definido por la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{IT}{ET} \quad (1)$$

Donde:

IE = Indicador de eficiencia económica-ambiental en US\$/t CO₂-eq.

IT = Ingreso total de la finca en US\$.

ET = Emisiones totales de la finca en Toneladas de CO₂-eq.

Con se indicó en la ecuación 1, el índice de US\$/t Co₂-eq representa proxi de eficiencia económica y ambiental de las fincas, es decir, qué tan eficiente es la finca ganadera en generar ingresos por cada tonelada de CO₂-eq emitida. A mayor sea este índice, más eficiente es la finca desde un panorama económico-ambiental. Una vez obtenido el indicador de eficiencia económica-ambiental para cada finca, se procedió a realizar un análisis de estadística descriptiva para hacer comparaciones de media entre los grupos. Por ejemplo, se analizó cómo varía este indicador en función al sistema de producción (leche, carne y doble propósito), por país, por ubicación geográfica, por región (húmeda o seca).

2.2.2 Estimación de ingreso por finca

Para obtener el nivel de ingreso por fincas se calculó en función de la producción total proveniente de leche, carne y venta de animales vivos. Una vez obtenidos estos rubros se multiplicaron por sus respectivos precios de ventas. La sumatoria de estos ingresos dieron el nivel de ingreso producido por finca ganadera bovina. Para este cálculo se aplicó la siguiente ecuación:

$$NI = IPL + IPC + IVGV \quad (2)$$

Donde:

NI = Nivel total de ingreso de la finca.

IPL = Ingreso total por producción de leche de la finca.

IPC = Ingreso total por producción de Carne de la finca.

IVGV = Ingreso total por venta de ganado vivos de la finca.

2.2.3 Estimación de emisiones de CO₂-eq totales por finca

En las emisiones por finca fueron consideradas las fuentes de emisión como fermentación entérica, manejo del estiércol o excretas, los fertilizantes nitrogenados usados en las pasturas, transporte y electricidad. Estos se basan en las bases de datos proporcionadas por GAMMA-GANADERIA, donde se clasificaron las fuentes identificadas para los respectivos GEI (CH₄, N₂O y CO₂). Para la estimación de las emisiones de los distintos sistemas de producción bovina evaluados en los diferentes países se utilizó la herramienta GEI-CATIE, generada por la unidad GAMMA-GANADERIA (Vega et al. 2016), herramienta basada en las ecuaciones del IPCC (2006) y la cual aborda dos de las aproximaciones para la contabilización de GEI como lo son el Nivel 1 (Tier 1) donde se utilizan factores de emisión por default generados por IPCC (2006) y el Nivel 2 (Tier 2), donde se utilizan características más específicas de los animales y de alimentación, además de utilizar factores de emisión generados en dichos países. El Nivel 1 toma en cuenta las emisiones de N₂O y CO₂ generadas por el uso de fertilizantes y herbicidas sucesivamente y las emisiones de N₂O procedentes del manejo de excretas y un Nivel 2 que tomó en cuenta las emisiones de CH₄ procedentes de la fermentación entérica y el manejo de excretas y las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles fósiles y energía.

2.2.3.1 Estimación de las emisiones de CH₄ por fermentación entérica

Se utilizaron los factores de emisión definidos por el IPCC (2006) y factores generados en los países en referencia (IMN, 2022), se obtuvo la estimación de las emisiones de CH₄ procedentes de la fermentación entérica. El inventario de animales de cada explotación, desglosado en categorías de animales, sirve de base para el cálculo. Las categorías incluyen terneros (0-1 años), hembras en desarrollo (1-3 años), machos en crecimiento (1-3 años), hembras maduras (mayores de 3 años) y reproductores (mayores de 3 años). Una vez realizado el inventario de animales, se calcularán las emisiones de CH₄ mediante una ecuación 3 (Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

$$E_{CH_4} = \frac{(\sum CA_C \times FE_{CH_4}) \times PCG_{CH_4}}{1000} \quad (3)$$

Donde:

E_{CH_4} = Son las emisiones de CH₄ (t CO₂-eq/año).

CA_C = Es el total anual de animales de categoría.

FE_{CH_4} = Para cada grupo de animales es el factor de emisión de CH₄ (kg CH₄/animal/año).

PCG_{CH_4} = Potencial de calentamiento global CH₄ (PCGCH₄= 28).

El valor resultante, que representa en t CO₂-eq, representa la emisión de CH₄ por fermentación entérica anual.

2.2.3.2 Estimación de las emisiones de CH₄ por producción de excretas

La ecuación 4, recomendada por el IPCC (2006), y como se citó en Paustian et al. (2006), se utilizó para calcular las emisiones de CH₄ resultantes de las heces animales, utilizando los factores de emisión establecidos el IPPC o factores de emisión de cada país (IMN, 2022; Molina-Castro y Calderón-Jiménez, 2021; Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

$$E_{CH_4} = \frac{PT \times FE_{CH_4} \times PCG_{CH_4}}{1000} \quad (4)$$

Donde:

E_{CH_4} = Son las Emisiones anual t CO₂-eq de CH₄.

PT = es la población total (animales por año).

FE_{CH_4} = Para el ganado bovino es el factor de las emisiones de CH₄ (kg CH₄/animal/año).

PCG_{CH_4} = El potencial del calentamiento global del CH₄ ($PCG_{CH_4} = 28$).

El resultado de multiplicar por el PCG del metano para obtener los datos en CO₂ equivalente, y el valor se convierte en tonelada métrica para obtener un número que permita las comparaciones.

2.2.3.3 Estimaciones de las emisiones del N₂O por las producciones de las excretas.

También se aplicó la ecuación 5 del IPCC (2006, como se citó en Paustian et al., 2006) para a fin de obtener las emisiones del N₂O procedente de los excrementos animales (Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

$$E_{N_2O} = \frac{PT \times TE_N \times FE_{N_2O} \times PCG_{N_2O} \times 365}{1000} \quad (5)$$

Donde:

E_{N_2O} = Las emisiones del N₂O (t CO₂-eq/año).

PT = Significa población total (animales por año).

TE_N = Representa la tasa de excreciones de nitrógeno, expresadas en Kg N/1000 Kg masa animal por día.

FE_{N_2O} = Es el factor de emisiones de N₂O (Kg N₂O/animal/año).

PCG_{N_2O} = El potencial del calentamiento global de N₂O ($PCG_{N_2O} = 310$).

2.2.3.4 Estimaciones de las emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles.

En función del tipo y calidad del combustible utilizado en la explotación, se aplicaron los factores de emisión establecido por el IPPC para los países (IMN, 2022; Molina-Castro y Calderón-Jiménez, 2021) para obtener las estimaciones de las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles. La ecuación 6 (Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

$$E_{CO_2} = \frac{CTC * FE_{CO_2} * PCG_{CO_2}}{1000} \quad (6)$$

Donde:

E_{CO_2} = Las emisiones del CO₂ (t CO₂-eq/año).

CTC = El consumo total del combustible al año (litros).

FE_{CO_2} = El factor de las emisiones del CO₂ (kg CO₂-eq/litro).

PCG_{CO_2} = El potencial del calentamiento global del CO₂ ($PCG_{CO_2} = 1$).

2.2.3.5 Estimación de la emisión de CO₂ por uso de electricidad.

El factor de emisión para el consumo de electricidad (kg CO₂-eq/kWh), definido por el IPCC (2006) y la ecuación 7, se utilizó para derivar las estimaciones de las emisiones de CO₂ causadas por el uso de electricidad. Para realizar este cálculo, es necesario conocer el total de kWh utilizados anualmente por cada explotación en consumo eléctrico. (Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

$$E_{CO_2} = \frac{CTE \times FE_{CO_2} \times PCG_{CO_2}}{1000} \quad (7)$$

Donde:

E_{CO_2} = Las emisiones del CO₂ (t CO₂-eq/año)

CTE = El consumo total de energía eléctrica por año (kWh)

FE_{CO_2} = El factor de las emisiones del CO₂ (kg CO₂-eq/kWh)

PCG_{CO_2} = El potencial del calentamiento global del CO₂ ($PCG_{CO_2} = 1$)

2.2.3.6 Estimaciones totales por año de las emisiones de GEI para cada finca

El total de los resultados de cada fuente se aplicará una vez que se hayan calculado independientemente las emisiones de cada una de las fuentes de emisión de las explotaciones. Esto es posible gracias a que todas las emisiones de las fuentes se miden en las mismas unidades, y el total anual de emisiones de gases de efectos invernadero se expresa en toneladas de CO₂ equivalentes (t CO₂-eq) (Vega *et al.* 2016), basada en la metodología del IPCC (2006).

2.2.4 Metodología para determinar los factores socioeconómicos, biofísicos y productivos que explican las ineficiencias en fincas ganaderas.

Partiendo del concepto de eficiencia de la productividad, una finca ganadera debe encontrar la forma más eficaz de utilizar los recursos que dispone para la producción. Múltiples estudios han determinado diversos factores, que explican la ineficiencia de los sistemas ganaderos para alcanzar un nivel específico de producción dado una cantidad determinada de insumos. Esto significa utilizar la menor cantidad de insumos, optimizando la producción y reduciendo los gastos (Arias *et al.* 2008; Lotero Cadavid, 1979; Martínez-Melo *et al.* 2013; Benítez *et al.* 2008). Por su parte, Kalirajan y Obwona (1994) señalan tres argumentos por el

cual es importante medir la eficiencia: (a) muestra la eficiencia relativa en distintas unidades de producción; (b) permite identificar las variables que generan desviaciones en las unidades de producción; y (c) permite crear políticas para elevar el nivel de eficiencia.

Numerosos estudios han utilizado enfoques paramétricos y no paramétricos para evaluar la eficiencia técnica en diversos ámbitos, como deporte, educación, salud, medio ambiente, productividad, recursos naturales, transporte, sector público, energía eléctrica, turismo y las finanzas (Bravo-Ureta y Pinheiro, 1997; Palacios y Flores-Ortega, 2012). Estas técnicas se conocen comúnmente como la Frontera Estocástica de Producción (FEP) y el "Análisis Envoltante de Datos" (DEA) (Charnes et al. 1978; Farrell, 1957).

Para este estudio en particular, se utilizó la FEP, una técnica paramétrica descrita por Aigner et al. (1977); Meeusen y van Den Broeck, (1977); esta técnica consiste en aplicar herramientas econométricas, en particular, el método de máxima verosimilitud para modificar las formas funcionales de la producción (Fisher, 1922). Según Aigner et al. (1977), ofrece un marco útil para evaluar la eficiencia técnica de los sistemas de producción y señala las causas de la ineficiencia. Utilizando un modelo creado por Battese y Coelli (1995) se determinará la eficiencia técnica (ET) de las explotaciones de ganado vacuno por país. Este enfoque sugiere estimar la ineficiencia técnica asociada junto con una frontera de producción que tenga en cuenta diferentes insumos.

En otros estudios, han utilizado como salida (*output*) o variable dependiente, los ingresos totales. Sin embargo, en este caso se utilizan los ingresos totales por tonelada de CO₂ equivalente (US\$/t CO₂-eq). Como insumos (*inputs*) se usan las variables de producción, según la disponibilidad de variables en las bases de datos. Por ejemplo, la superficie (X_1), las unidades animales (X_2), la unidad de trabajo humano (X_3), los gastos totales (X_4), entre otras variables. A continuación, se describe en la ecuación 8, el método de la función de producción de frontera estocástica que se aplica:

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) + \beta_3 \ln(X_3) + \beta_4 \ln(X_4) + \dots + \beta_n \ln(X_n) + (V_i - U_i) \quad (8)$$

Donde:

i representan las unidades de producción; $\ln(Y_i)$ representa el logaritmo natural del indicador de eficiencia económica de la finca i en (US\$/t CO₂-eq). Las variables dependientes X_1 hasta X_n representan las variables de insumos que determinan la eficiencia económica-ambiental de la finca, donde los parámetros β_1 a β_n son los coeficientes de repuesta y β_0 el intercepto.

Los vectores β representan los parámetros que hay que estimar y representan las elasticidades de la frontera del producto en relación con los insumos. Todos los errores aleatorios independientes e idénticamente distribuidos de las unidades de decisión del mismo tipo $N \sim (0, \sigma_v^2)$, están representados por los términos V_i .

Como se ve en la ecuación 9, U_i son las consecuencias de la ineficiencia técnica relacionadas.

$$U_i = \delta_0 + \delta_1 C_1 + \delta_2 C_2 + \dots + \delta_m C_m + W_i \quad (9)$$

Donde las variables dependientes C_1 hasta C_n representan las variables de ineficiencia (características de la finca, sistema de producción y variables socioeconómica y tecnológica), donde los parámetros δ_1 y δ_n son los coeficientes que explican la ineficiencia.

Una frontera de producción estocástica se define por un componente de error que consta de dos tipos de errores: un componente de error de una cola que representa la ineficiencia y se distribuye según una distribución exponencial o seminormal, y otro componente de error que se distribuye según una distribución normal, representando shocks aleatorios (Meeusen y Van Den Broeck, 1977). Su ecuación:

$$Y = f(X; \beta) * V * ET \quad (10)$$

Donde:

Y es un vector $N \times 1$ de los outputs de producción de cada una de las N unidades de producción,

X es el vector $N \times (K+1)$ de los K inputs de producción de cada una de las N unidades de producción con unos en la primera columna,

β es el vector $(K+1) \times 1$ de los parámetros de la frontera de producción,

V es un vector $[e-v_i] N \times 1$ cuando se supone una tecnología de producción. ET un vector $[e-v_i] N \times 1$ de eficiencias técnicas de cada una de las N unidades de producción, donde V_i es la ineficiencia técnica que toma cualquier valor real.

Los residuos que representan el efecto de los shocks aleatorios en la producción se agrupan en V un vector $[e-v_i] N \times 1$, donde cada elemento de V_i puede tomar cualquier valor real. Por otro lado, se tiene la eficiencia técnica de cada una de las N unidades productivas representadas por ET un vector $[e-v_i] N \times 1$, donde cada elemento V_i indica la ineficiencia técnica que toma valores mayores o iguales a 0. Cada unidad de producción se designa con el subíndice i.

El software econométrico STATA 2009 (v14) se utilizó para la estimación del modelo de frontera de producción.

3 Resultados

3.1 Armonización base de dato general

La muestra proveniente de una base de datos de la Unidad de Ganadería y Manejo Ambiental (GAMMA) del CATIE como un plan piloto de diferentes proyectos, las cuales están compuestas por productores ganaderos de seis (6) países que conforman la región mesoamericana, para este análisis nos centramos en los siguientes: Costa Rica, Honduras, México, Nicaragua, Panamá y República Dominicana. A continuación, en la tabla 1 se describen las distribuciones de las observaciones y sus fuentes.

Tabla 1. Fuente y distribución de las observaciones para el análisis de eficiencia económica ambiental de fincas ganadera bovinas en Mesoamérica.

País	No. Observaciones	Fuente
Costa Rica	17	Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO)
Honduras	20	Paisaje Ganadero
México	114	Biodiversidad y Paisajes Ganaderos Agrosilvopastoriles Sostenibles (BIOPASOS)
Nicaragua	295	Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO)
Panamá	62	Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC)
República Dominicana	63	Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC)

Todas las bases de datos proveniente del plan piloto para Mesoamérica fueron unidas por variables en común, a partir de ello se generó una base de datos global con 571 observaciones y 36 variables en común existentes. Luego se utilizó el software Stata14 para la limpieza y habilitación de la base de datos a formatos dta para su posterior análisis estadístico (ver anexo B).

3.2 Propuesta de un indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas bovinas

En el contexto de la crisis climática actual, la sostenibilidad de las prácticas agrícolas y ganaderas se ha convertido en un tema central para los investigadores y los formuladores de políticas. En este sentido, el indicador de US\$/t CO₂-eq se propone como un medio para cuantificar la eficiencia económica en relación con el impacto ambiental de las operaciones ganaderas. Especialmente, permite evaluar cuanto ingreso genera una finca por cada tonelada de CO₂ equivalente emitida. Este indicador es crucial, porque aborda dos aspectos fundamentales de la sostenibilidad: la viabilidad económica y la responsabilidad ambiental. Gerber et al. (2013); Palma-García et al. (2022), sobre la sustentabilidad de la ganadería sugieren que la intensificación de prácticas agrícolas que reduzcan la intensidad de emisiones de GEI por unidad de producto es tanto posible como necesaria. Además, estudios como el de Havlík et al. (2014), exploran escenarios de mitigación de emisiones en la ganadería, resaltando la importancia de indicadores, que vinculen directamente las emisiones con los ingresos económicos.

3.2.1 Cálculo y utilidad del indicador US\$/t CO₂-eq

El cálculo del indicador Ingreso US\$/t CO₂-eq es directo y se fundamenta en la relación entre los ingresos totales anuales de una finca y su total de emisiones de CO₂ equivalente durante el mismo periodo. Este indicador, al proporcionar un valor numérico que refleja la cantidad de dinero generado por unidad de emisiones de CO₂, ofrece a los propietarios y a los formuladores de políticas una herramienta valiosa para evaluar y mejorar la sostenibilidad de

prácticas ganaderas. Además, Steinfeld et al. (2006), al incentivar una mayor transparencia en la medición y reporte de emisiones y al correlacionar estos datos con indicadores económicos, se puede motivar a los productores a implementar prácticas, que logren un equilibrio más favorable entre la producción y la sostenibilidad ambiental.

Hasta donde se sabe los estudios de eficiencias con SFA no usan esta variable (ingreso US\$/t CO₂-eq). La investigación en este campo tiende a centrarse más en la eficiencia de la producción y costos utilizando inputs y outputs más tradicionales relacionados directamente con aspectos financieros y operacionales de las empresas. Los análisis de frontera estocástica (SFA) se emplean, generalmente, para evaluar la eficiencia técnica y económica, considerando variables como capital, mano de obras, y otros inputs directos, así como los outputs de producción. Estos modelos se utilizan para identificar la “frontera” de máxima producción posible dados ciertos inputs, y para estimar la ineficiencia relativa de las unidades productivas comparadas con esta frontera de máxima eficiencia.

3.3 Resultados descriptivos del Indicador de eficiencia económica-ambiental en fincas ganaderas bovinas

Las actividades de producción, el problema que se va a analizar y la disponibilidad de los datos influyen en la selección de las variables que representan los “outputs” y los “inputs” estos representan uno de los componentes más cruciales en los análisis de eficiencia.

Coincidiendo con Vergés (2012), la heterogeneidad en los estudios de eficiencias es uno de los problemas en lo cual se enfrenta un investigador con mucha frecuencia. Debido a que en cada país los sistemas ganaderos bovinos poseen características particulares muy diferentes una de otras.

3.3.1 Estadística descriptiva

Las variables tomadas en consideración para el presente trabajo están asociadas al proceso productivo y la tecnología de producción, la cantidad producida, las emisiones de CO₂-eq y la generación de un indicador de eficiencia económica ambiental (US\$/t CO₂-eq), el cual se obtuvo del total de ingresos entre el total de emisiones de CO₂-eq. A continuación, se describe los análisis de las variables disponibles según cada país.

Según la tabla 2, Costa Rica se destaca por tener una excelente cantidad de área total de bosque en comparación con otros países; produce una cantidad significativa de leche por finca y por hectárea y genera un total de ingresos considerable, aunque no tan alto como en México o Panamá. Por otro lado, Honduras tiene una mayor área de forraje en comparación con otros países, produce una gran cantidad de leche por finca, con una cantidad ligeramente menor por hectárea y genera un total de ingresos significativo, comparable a Costa Rica. De acuerdo con los resultados de la tabla 2, México destaca por tener una mayor área total de bosque, además, produce una cantidad considerable de leche y carne por finca y por hectárea y, genera los mayores ingresos totales en comparación con los otros países mencionados. En contraste, Nicaragua tiene una mayor área total de finca y de pastoreo en comparación con otros países, produce una cantidad modesta de leche y carne por finca y por hectárea; por lo cual, genera un total de ingresos relativamente bajo en comparación con México o Panamá.

Por otra parte, y de acuerdo con la tabla 2, Panamá destaca por tener una mayor carga animal; genera una cantidad significativa de ingresos totales, siendo uno de los mayores entre los países mencionados. Mientras que República Dominicana tiene la mayor cantidad de unidad y carga animales, produce una cantidad muy alta de leche por finca y por hectárea y genera el mayor total de ingresos en comparación con los otros países. En general, cada país muestra fortalezas y debilidades en diferentes categorías, lo que refleja la diversidad económica y ambiental de la región.

En términos de producción lechera, según la tabla 2, Costa Rica parece ser el más eficiente, ya que produce la mayor cantidad de leche por hectárea, seguido por la República Dominicana, Honduras y México; Nicaragua y Panamá están por debajo en esta categoría. En cuanto a la producción de carne, Honduras es el líder en términos de producción por finca y por hectárea, seguido por Costa Rica y México; sin embargo, en términos de ingreso total, República Dominicana destaca con la mayor cantidad de ingresos generados, seguido por México y Panamá. Costa Rica se ubicaría en quinto lugar en esta categoría. Para evaluar el nivel de emisiones de todas las fuentes de emisiones en los sistemas ganaderos, se considera el término de emisiones de CO₂ equivalente en promedio por año. En este sentido, Nicaragua muestra la menor cantidad de emisiones, seguido por Costa Rica y Panamá. Por otro lado, México, Honduras y la República Dominicana presentan los indicadores más altos de emisiones de CO₂ equivalente.

En contraste, Reyes Reyes (2021), señala que México es el principal emisor de gases de efecto invernadero en la producción ganadera de estos países, contribuyendo con el 1,3% del total mundial, también tenía el mayor aporte de emisiones per cápita en 2015, representando el 80,4% de las emisiones per cápita de Latinoamérica y el Caribe. Guatemala, Honduras y Nicaragua tienen un aporte mucho menor en comparación, contribuyendo con menos del 0,1% del total mundial en emisiones GEI. Costa Rica, por su parte, ha experimentado un aumento en sus emisiones per cápita en 2018, llegando a 2,58 t CO₂-eq per cápita. A pesar de este incremento, su contribución a las emisiones per cápita de Latinoamérica y el Caribe era del 56%, sin especificar su aporte al total mundial de emisiones GEI.

Para analizar cuál país es más eficiente en términos de emisiones de CO₂ por cada unidad de producción de leche, carne e ingresos totales, se examinó el indicador de emisiones de CO₂ por cada tonelada producida en cada país. Según los datos proporcionados en la tabla 2, destaca en términos de ingresos totales y emisiones de CO₂, República Dominicana muestra la mayor eficiencia, con un indicador de 1,210.97 US\$/t CO₂-eq. A pesar de tener altas emisiones de CO₂ en relación con sus ingresos totales, República Dominicana puede estar generando una mayor cantidad de ingresos con una menor cantidad de emisiones de CO₂ en comparación con los otros países. Nicaragua destaca en eficiencia en la producción de leche y carne en términos de emisiones de CO₂, mientras que República Dominicana muestra eficiencia en la relación entre ingresos totales y emisiones de CO₂. Cada país muestra áreas de fortaleza en diferentes aspectos de su producción agropecuaria según emisiones de CO₂.

Tabla 2. Promedios de principales variables numéricas según el país.

<i>Variables\Países</i>	<i>Costa Rica</i>	<i>Honduras</i>	<i>México</i>	<i>Nicaragua</i>	<i>Panamá</i>	<i>República Dominicana</i>
<i>edad productor (años)</i>	57.18 ^(*)	56.15	51.50	48.05	52.92	54.48
<i>altitud (m.s.n.m)</i>	508.00 ^(*)		456.32		185.11	103.31
<i>área forrajera (ha)</i>	0.36	47.15	1.01	0.92	0.58	1.90 ^(*)
<i>área total bosque (ha)</i>	8.12	7.12	14.75^(*)	7.51	7.87	0.95
<i>área total finca (ha)</i>	30.11	54.28	45.02	82.21^(*)	35.99	28.77
<i>área total pastoreo (ha)</i>	29.30	47.81	39.40	72.32^(*)	27.52	25.71
<i>unidad animal (unidad)</i>	42.65	64.15	32.36	67.97	55.27	118.67^(*)
<i>carga animal (unidad)</i>	1.67	1.65	1.18	0.95	2.93	10.30^(*)
<i>inventario animal (unidad)</i>	15.12	99.00 ^(*)	4.64	17.07	8.69	37.22
<i>cant leche prod finca/ha/año</i>	33,698.12	89,333.75	41,679.39	23,205.37	19,285.48	145,973.77 ^(*)
<i>cant leche prod ha</i>	1,436.85	2,082.21	1,821.57	505.50	1,507.72	14,187.68 ^(*)
<i>cant carne prod finca/ha/año</i>	20,208.82	28,324.50^(*)	2,774.60	0.00	543.11	401.17
<i>cant carne prod ha</i>	801.73	3,599.80 ^(*)	119.51	0.00	35.28	102.48
<i>total, ingreso (us\$)</i>	28,772.42	48,750.94	66,400.90	6,265.45	57,101.89	289,502.34^(*)
<i>emisiones CO₂-eq/año</i>	90.10	111.23	183.36	89.29	93.65	223.65
<i>indicador (US\$/tCO₂-eq)</i>	313.15	466.48	358.40	78.82	681.69	1,210.97^(*)

Fuente: Elaboración propia. Nota. (*) significa el resultado más alto comparado frente a los otros países en su respectiva variable.

En el anexo A, se muestra la correlación de las variables numéricas; se observa que existe una fuerte correlación negativa entre el indicador (US\$/t CO₂-eq) y la altitud (-0.927), esto sugiere que la altitud puede tener un efecto significativo en el valor del indicador, posiblemente por diferencias en las emisiones de dióxido de carbono a diferentes altitudes o a otros factores relacionados con la selección del sistema productivo y tipo de ganado con la altitud. Cuando la altitud aumenta, es decir, a medida que se eleva en la atmósfera, es más efectivo en términos de costos reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se debe a que, a mayor altitud, la concentración de gases como el dióxido de carbono se reduce y, por lo tanto, se requiere menos esfuerzo y costos para reducir las emisiones en comparación con altitudes más bajas donde la concentración de gases es mayor. En relación con ello, la altitud tiene un impacto directo en los niveles de emisiones de gases contaminantes, ya que, al aumentar la altitud sobre el nivel del mar, la densidad del aire atmosférico disminuye y su composición se ve afectada debido a la reducción de la presión barométrica. (Nagpure et al. 2010; Soares y Sodré, 2002; Lapuerta et al. 2006; Agudelo et al. 2009; Arroyo Terán et al. 2020)

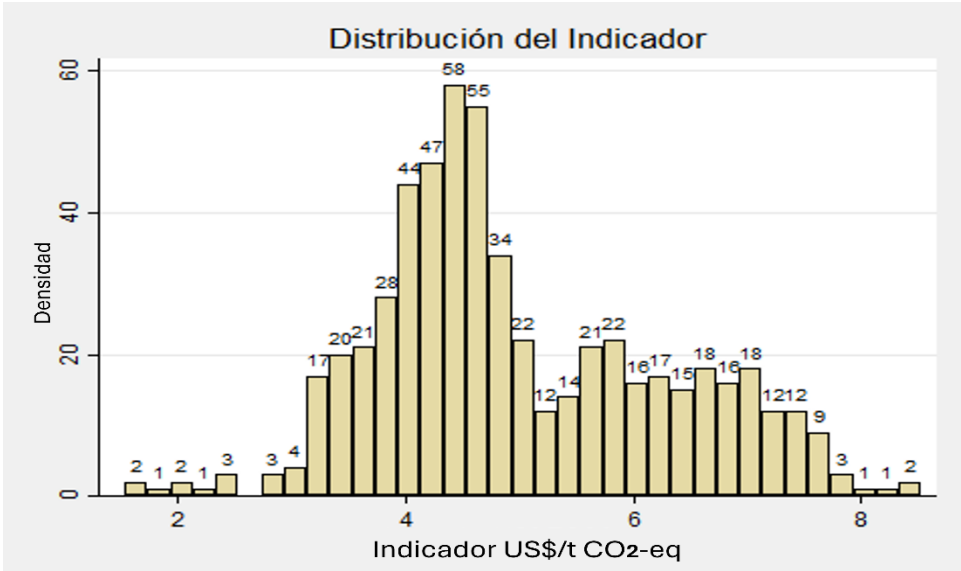
Asimismo, se evidencia una correlación positiva del indicador de eficiencia económica ambiental con la unidad y la carga animal (0.747 y 0.935 respectivamente). Esto refleja que optimizar la densidad del ganado es una estrategia efectiva para mejorar la productividad y la eficiencia económica ambiental de las fincas. De igual modo, este indicador evidencia correlación positiva con la cantidad de leche producida y el total de ingreso. De acuerdo con el ingeniero agrónomo Elizondo (2024), el número de animales que un productor puede mantener en su finca de manera rentable está estrechamente relacionado con la carga animal. Esta carga, determinada por factores como la calidad del pasto, el clima y la topografía, es fundamental para garantizar una utilización sostenible de los recursos naturales. Una carga animal adecuada evita la sobreexplotación y la erosión del suelo, permitiendo una productividad saludable a largo plazo y, por lo tanto, una mayor rentabilidad para los productores que la gestionan eficazmente.

Por lo anterior, estos resultados se podrían deber a varios factores, como la densidad del ganado puede afectar directamente la eficiencia de la producción. Mantener una alta densidad de ganado puede llevar a una mayor producción de leche, lo cual está correlacionado con el total de ingresos. A medida que la cantidad de leche producida aumenta, también lo hace el ingreso total de la finca, además, una mayor carga animal en la finca puede llevar a una mayor eficiencia en el uso de recursos, ya que se maximiza la capacidad de producción en una determinada  rea. Esto puede traducirse en una mejora en la eficiencia económica ambiental, ya que se produce más con menos recursos, lo que reduce la emisión de gases de efecto invernadero por unidad de producción.

Un dato importante que genera curiosidad para una investigación más profunda se deriva de la correlación negativa que se puede ver con las variables uso del suelo que a mayor sean tanto el área total, de pastoreo como la de bosques reduce el nivel de eficiencia del indicador económico ambiental. Esto podría indicar que la conservación de bosques, aunque ecológicamente beneficiosa, puede ser vista como menos eficiente desde una perspectiva de producción exclusiva.

Asimismo, en la figura 2, la distribución presenta una clara asimetría positiva, lo que significa que el 60% de las fincas se encuentran en la parte inferior del rango de valores del indicador menores a 5 dólares por tonelada de CO₂ equivalentes. El valor central de la distribución se encuentra alrededor de los 5-6 US\$/t CO₂-eq. Esto indica que, en promedio, las fincas ganaderas analizadas generan alrededor de 5-6 dólares por cada tonelada de CO₂ equivalente emitida. Aunque la distribución muestra una amplia dispersión, lo que indica una gran variabilidad de la eficiencia económica-ambiental entre las fincas. Existen fincas con valores muy bajos de indicador (alrededor de 2 US\$/t CO₂-eq), lo cual sugiere una baja eficiencia económica y otra con valores mucho más altos (alrededor de 8 US\$/t CO₂-eq), que indica una mayor eficiencia económica y un menor impacto ambiental. Esto puede deberse a que los ganaderos emplean diferentes niveles de intensificación, así como sistemas de producción que les permite obtener mayor productividad en la producción de leche en sus fincas. Sin embargo, para Pezo (2019), uno de los elementos clave para determinar el grado de intensificación de una explotación ganadera es la procedencia y cantidad de los recursos y materiales que utiliza para operar, especialmente los alimentos, la energía y los fertilizantes. En términos generales, se considera que la ganadería es más intensiva cuanto mayor es el empleo de insumos provenientes de fuentes externas a la explotación o al entorno natural circundante. En este escrito, al referirse a la intensificación, se refiere a la perspectiva del origen y la cantidad de los insumos utilizados. De esa manera, las explotaciones más intensivas requieren un mayor uso de insumos externos (piensos, maquinaria y combustibles fósiles), lo que les permite alcanzar niveles elevados de producción y precios bajos en sus productos. Asimismo, ejercen un impacto en los ecosistemas naturales al provocar problemas de contaminación del suelo y del agua a través del vertido de residuos (principalmente compuestos de nitrógeno y fósforo) y de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Pezo, 2019).

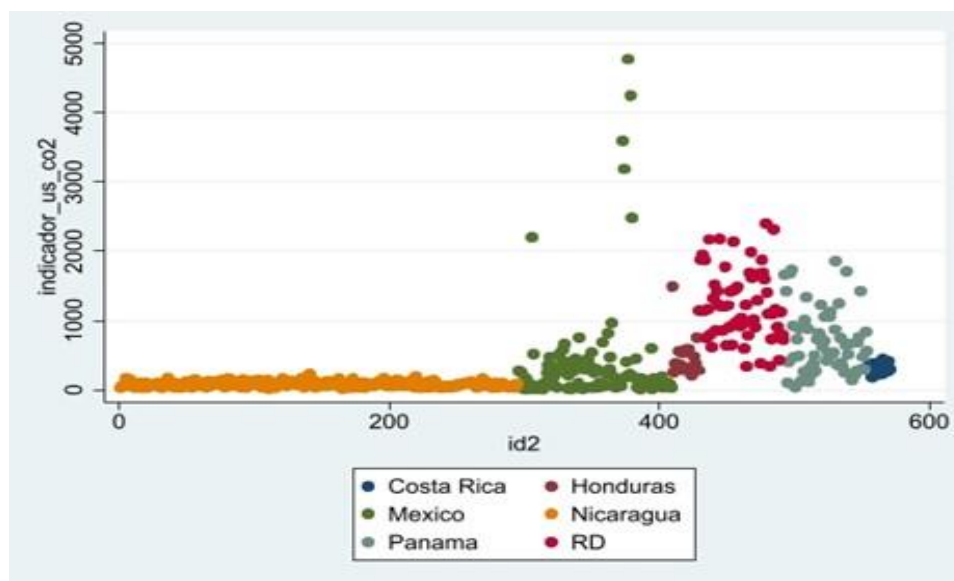
Figura 2. Distribución de indicador de eficiencias en función de los ganaderos o fincas



La figura 3 muestra la dispersión de la producción ganadera por país evidencia que en México hay algunas fincas con producciones significativamente mayores, con valores del indicador que alcanzan los 4000. Esto indica que en México existen fincas con una gran cantidad de ingresos por tonelada de emisiones de CO₂ relacionadas con la producción ganadera. Por eso, los aspectos ambientales sobre todo las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector bovino en México son importantes y requieren medidas efectivas para mitigar y adaptarse al cambio climático. Según INECC (2018), también como se citó en Monterroso Rivas (2022), el sector también contribuye con el 10.3% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el país. Asimismo, aproximadamente el 43% de la superficie ganadera muestra signos de degradación debido al sobrepastoreo, como indicó SEMARNAT (2014, y Monterroso Rivas, 2022).

Por otro lado, en República Dominicana y Panamá se observan valores más bajos, alrededor de 1800 a 2000 unidades del indicador US\$/t CO₂-eq, lo que sugiere una menor emisión de gases de efecto invernadero en comparación con las fincas mexicanas. Este análisis refleja la variabilidad en las prácticas ganaderas y su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero en distintos países. Esto puede deberse a que, en República Dominicana con sistemas de doble propósito como punta de lanza en su industria ganadera, este país caribeño ha sabido marcar su presencia en el ámbito productivo, pero la producción de leche no es el único aspecto en el que República Dominicana se destaca. También ha implementado tecnologías avanzadas para mejorar la calidad y productividad del ganado bovino en su territorio, demostrando un compromiso con el cuidado del medio ambiente y la sostenibilidad de su industria agropecuaria, al implementar el programa “Promoviendo la Gestión Ganadera Climáticamente Inteligente en la República Dominicana” (GANACLIMA-RD) (Valerio, 2021, Gomes Nogueira y Oddone, 2017). Mientras que, en Panamá, los aspectos productivos de la ganadería son diversos, destacando la presencia de sistemas de doble propósito y cría. Sin embargo, se señala una baja tecnificación y productividad en este sector en comparación con otros países. En cuanto a los aspectos ambientales, se observa un esfuerzo por implementar proyectos que fomenten la ganadería sostenible y fortalezcan la resiliencia ante el cambio climático en Panamá. Estas iniciativas buscan equilibrar la actividad ganadera con la preservación del entorno natural.

Figura 3. Dispersión de indicador de eficiencias en función del país



Así mismo, la figura 4 presenta que el nivel de intensificación convencional es el de mayor utilización por los ganaderos de la muestra, pues más del 61% de ellos lo utilizan. Sin embargo, de acuerdo con la figura 5, este nivel de intensificación aporta ínfimamente al indicador. Siendo el nivel de intensificación estabulado aquel que posee un mayor indicador promedio respecto a los demás niveles. Por eso, para Barrera-Bassols (1996), y como se citó en Huerta et al. (2018), es necesario aumentar la intensidad de esta actividad (mediante la cría de ganado en establos) y al mismo tiempo, se mejora la calidad de sus productos.

Figura 4. Uso de niveles de intensificación por fincas

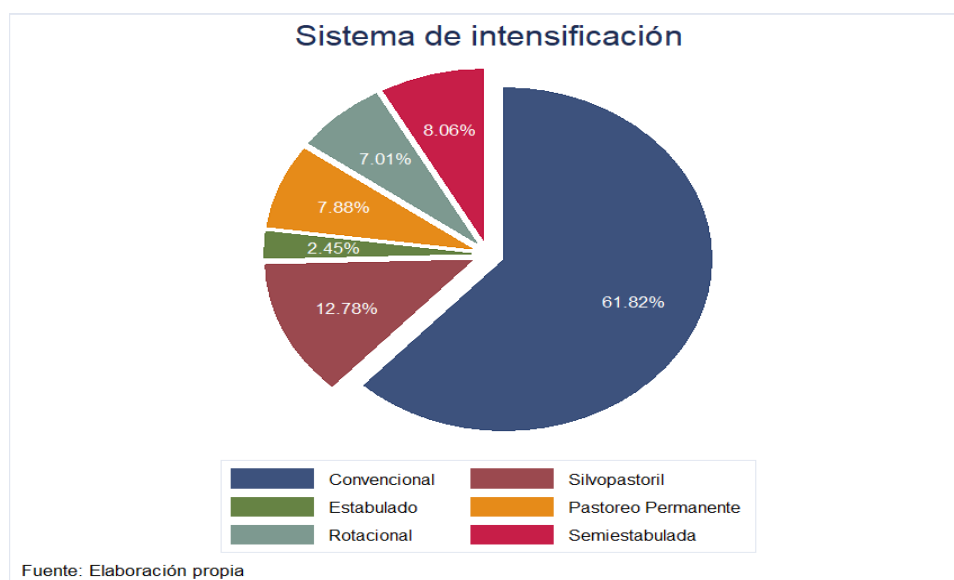
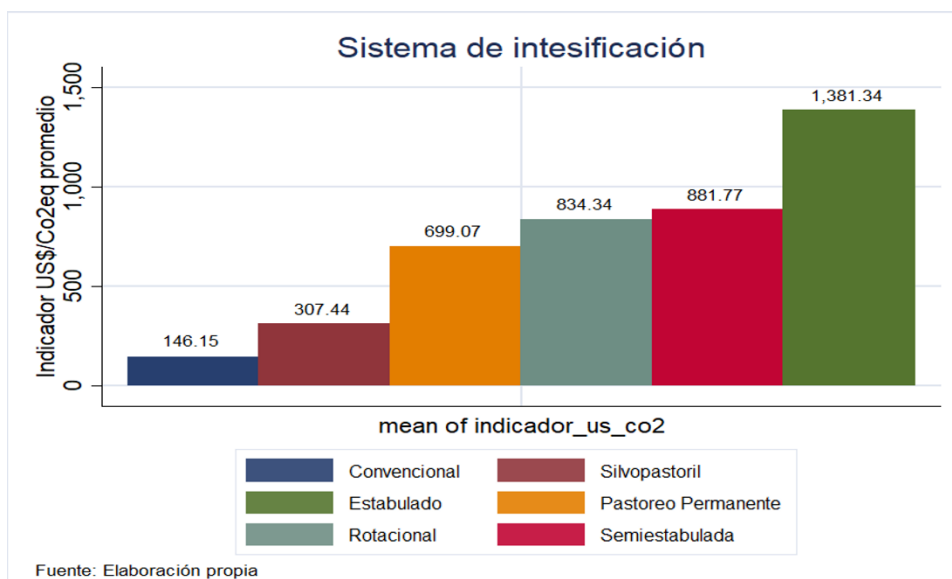


Figura 5. Indicador de eficiencia promedio en función del nivel de intensificación



En cuanto al uso de sistemas de producción, se observan diversos usos como la lechería extensiva, doble propósito y carne. No obstante, el sistema de producción de lechería especializada presenta el mayor indicador de eficiencia (figura 6). En contraste, con la investigación de Fariña et al. (2022), en la región de Centroamérica y el Caribe, predominan los sistemas de producción de doble propósito, con granjas familiares de pequeña escala que van desde 5 a 50 vacas, donde la pastura es un elemento fundamental en la alimentación del ganado. Destaca Costa Rica en esta área, con rebaños más grandes en promedio y una creciente proporción de lecherías especializadas.

Figura 6. Distribución de los sistemas de producción en las fincas evaluadas

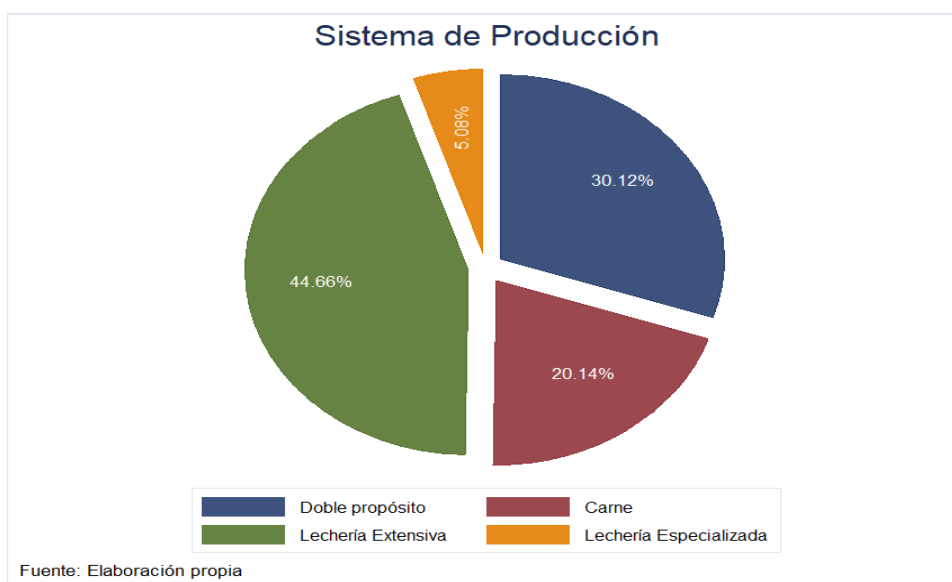
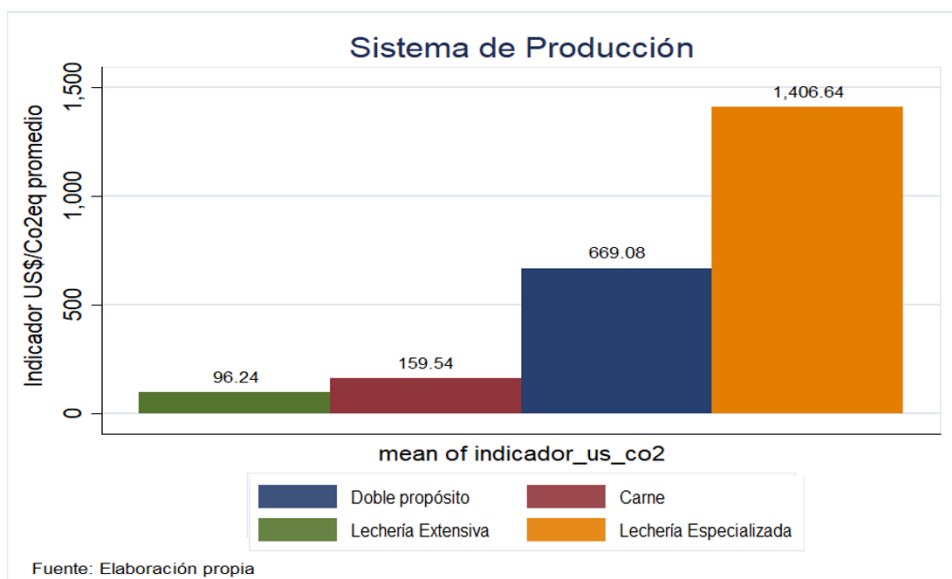
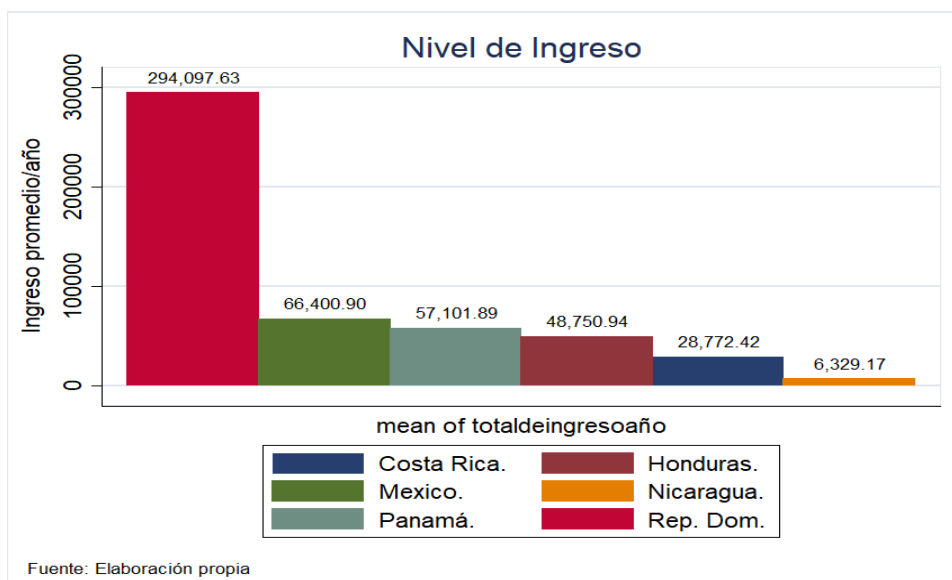


Figura 7. Indicador de eficiencia promedio en función del sistema de producción



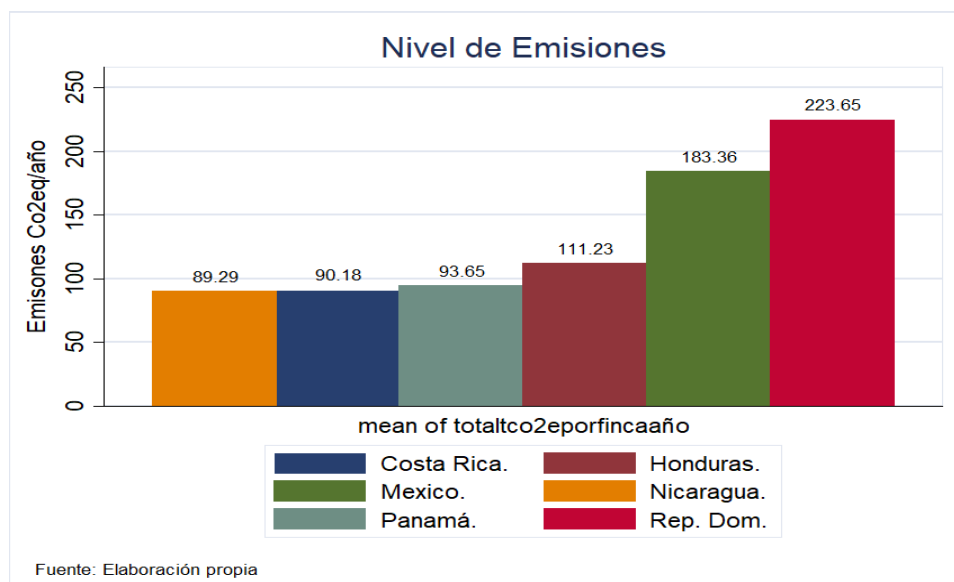
La figura 8 muestra el ingreso promedio por año del sector ganadero bovino por país, donde República Dominicana lidera con \$294,097.63, indicando una ganadería intensiva y posiblemente más rentable en función a los demás países. México (68,400.90) y Panamá (57,101.89) también tienen ingresos altos, sugiriendo un sector ganadero robusto. Honduras (48,750.94) y Costa Rica (28,772.42) tienen ingresos intermedios, posiblemente reflejado en prácticas más sostenibles. Nicaragua, con el ingreso más bajo (6,329.17), podría enfrentar desafío de ineficiencia y rentabilidad en su sector ganadero bovino. Sus diferencias reflejan variaciones en la gestión y desarrollo del sector entre países.

Figura 8. Nivel de ingreso promedio por finca por país (US\$)



La figura 9 muestra las emisiones promedio de CO₂.eq del ganado bovino por país. República Dominicana lidera con 223.65, indicando practicas ganaderas menos eficientes. México y Honduras también muestran emisiones altas (183.36 y 111.23 respectivamente). Panamá, Nicaragua y Costa Rica tienen menos emisiones (93.65, 89.29 y 90.18), sugiriendo mejoras en selección del ganado, cantidad y prácticas más sostenibles. Las diferencias reflejan variaciones en manejo del ganado y tecnología adoptadas.

Figura 9. Nivel de emisiones de CO₂.eq promedio por finca por país



Estos factores permiten explicar en gran medida las razones por las cuales los indicadores son heterogéneos entre países. En el siguiente apartado se procede a presentar los cálculos de los niveles de eficiencias económico ambiental a través de un modelo de frontera estocástica de producción.

3.4 Resultados de la Frontera Estocástica de Producción (FSP)

3.4.1 Estimaciones

3.4.1.1 Modelo de la frontera estocástica de producción

La especificación del modelo es la siguiente:

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \sum_{k=1}^m \beta_k \ln(X_i^k) + (V_i - U_i)$$

Donde:

$\ln(Y_i)$ representa el logaritmo natural del indicador de eficiencia económica de la finca i para un total de n fincas.

La variable X_i^k se refiere al insumo k de la finca i, siendo la cantidad total de insumos m. Los insumos representan la eficiencia económica – ambiental de cada finca y los parámetros β_0 y β_k es el intercepto y los coeficientes de cada insumo, respectivamente.

Los coeficientes estimados se exponen en la tabla 3, cabe señalar que las muestras fueron divididas entre países para observar si las estimaciones son diferenciadas por país, debido a que cada país posee diferentes características propias de su región:

Variables asociadas a la eficiencia de recursos:

La tabla 3 presenta que un aumento del 1% de la unidad animal (densidad de animales por hectáreas) conducirá a una disminución del (-0.233%) en la eficiencia económica ambiental. Esto sugiere que a mayor concentración de animales por unidad de área puede llevar a un sobreuso o manejo ineficiente de los recursos, esto se evidencia en estudios que han reportado asociaciones significativas entre la producción de los sistemas ganaderos y variables como la densidad animal (Cabrera et al. 2010; Cursack et al. 2010). También muestra que un aumento del 1% del área total de bosque conducirá con una disminución de (-0.091%) de la eficiencia de la finca. Esto puede interpretarse como un *trade-off* entre conservación de área forestal y producción agropecuaria en Mesoamérica. Coincidiendo con Xue et al. (2022), que la eficiencia varía significativamente entre diferentes sistemas de producción.

Además, tanto el área total de bancos forrajeros (ha) y área total de pastoreo (ha), estos coeficientes muestran efectos opuestos; mientras que el aumento del 1% en el área de bancos forrajeros conducirá a una disminución de la eficiencia (-0.101%), el incremento del 1% en área de pastoreo conducirá con un aumento de eficiencia (0.325%). esto refleja diferencias en cómo se manejan y utilizan estos recursos en las fincas ganaderas en Mesoamérica.

En cuanto a la producción, tanto la leche producida (ha) y la carne producida (ha), ambas variables muestran un efecto positivo (0.278 y 0.172, respectivamente), lo cual indica que un aumento 1% en la producción de leche y carne por hectárea conducirá fuertemente con una mayor eficiencia. Este resultado es esperable, ya que mayores rendimientos directamente implican una mayor eficiencia en el uso de los recursos.

Efectos de los sistemas de producción y niveles de intensificación

Los sistemas productivos presentan que el aumento del 1% en los sistemas de lechería especializada conducirá a un aumento de casi el 1% de la eficiencia económica ambiental más que los sistemas de producción doble propósito. Obviamente, estos sistemas aplican mejores prácticas y procesos más tecnificados de los sistemas comunes. También el aumento del 1% en los sistemas destinado a producción de carne conducirá a un aumento del 0.311% en la eficiencia económica ambiental más que los sistemas de producción doble propósito. En cuanto al sistemas de lechería extensiva los determinantes estimados de la eficiencia en las fincas muestran que a medida que aumenta en un 1%, la eficiencia económica ambiental se reducirá en -0.0622, más que los sistemas productivos de doble propósito; esta disminución es obvia debido a que en este tipo de sistemas tradicionales no se logra una mejor distribución de los recursos como se aplican en los sistemas de doble propósito.

El cuanto a los niveles de intensificación, todas las categorías (silvopastoriles, estabulados, pastoreo permanente, rotacional y semiestabulados) muestran coeficientes positivos y significativos, indicando que cualquier forma de intensificación conlleva a mejoras en la eficiencia en Mesoamérica.

Medidas de ineficiencias y Variabilidad

Tanto los términos sigma_u y sigma_v representan la desviación estándar de los términos de ineficiencia y aleatoriedad, respectivamente. Sigma_u extremadamente bajo (0.0097) sugiere que la ineficiencia es mínima en la muestra estudiada, lo cual es una señal positiva de prácticas efectivas entre las fincas. Sigma_v (0.6569) indica la variabilidad a factores no controlables, que es considerablemente más alta, reflejando posiblemente impactos ambientales o de mercado (ver tabla 3).

Tanto nuestros resultados como los hallazgos de Bahta et al. (2023), muestran que los términos sigma_u y sigma_v en el modelo indican mínima ineficiencia y alta variabilidad debido a factores no controlables, respectivamente, ellos sugieren que “comprender y ajustar las diferencias tecnológicas regionales es crucial para políticas efectivas”. Ambos estudios reconocen la importancia de diferenciar entre ineficiencia técnica y los choques aleatorios o extremos de la evaluación de eficiencia.

Tabla 3. Coeficientes estimados de máximo verosimilitud de las variables asociada a la eficiencia técnica

Variables	Parámetros	Coefficientes	Error Stad	P-valor
_constante	B ₀	2.492619	0.2867787	0.000***
unidad animal	B ₁	-0.2327666	0.0620706	0.000***
área total de bosque (ha)	B ₂	-0.0909336	0.0267373	0.001***
área total banco forrajeros (ha)	B ₃	-0.1013342	0.038038	0.008**
área total de pastoreo (ha)	B ₄	0.3246322	0.0625778	0.000***
Leche prod (kg/ha)	B ₅	0.2774628	0.0262705	0.000***
carne prod (kg/ha)	B ₆	0.1719336	0.0208205	0.000***
Sistemas productivos				
Carne	B ₇	0.3106568	0.1535197	0.043*
Lechería Extensiva	B ₈	-0.062226	0.0980225	0.526
Lechería Especializada	B ₉	0.7587307	0.1540604	0.000***
Nivel intensificación				
Silvopastoril	B ₁₀	0.5778493	0.1297535	0.000***
Estabulado	B ₁₁	1.452661	0.2019182	0.000***
Pastoreo Permanente	B ₁₂	1.876875	0.1290392	0.000***
Rotacional	B ₁₃	1.837974	0.129252	0.000***
Semiestabulada	B ₁₄	1.118261	0.1602762	0.000***

Usigma	δ_0	-9.276417	0.109446	0.000***
Vsigma	δ_0	-0.840455	0.0846136	0.000***
sigma_u	δ_1	0.009675	0.0005294	0.000***
sigma_v	δ_2	0.6568973	0.0277912	0.000***

Significativo al nivel ***

p<0.01

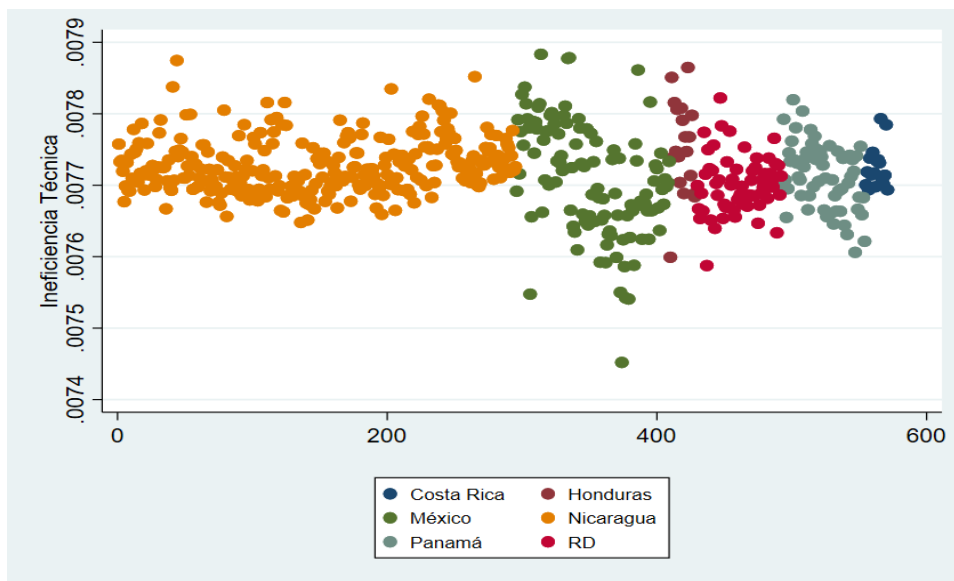
Finalmente, la tabla 4 muestra el valor promedio de la estimación de la ineficiencia técnica asociada al modelo para cada país. La tabla muestra que la ineficiencia técnica promedio general es de 0.00772, con un mínimo de 0.00752 y un máximo de 0.00788, esto establece un punto de referencia para comparar la ineficiencia técnica entre los países. Nicaragua y Costa Rica cuentan con mayores niveles de ineficiencia técnica asociada (0.00773) respecto a los demás países con una variabilidad muy baja, mientras que Honduras es el que menor ineficiencia técnica asociada presenta (0.00750), sugiriendo menores variabilidades en las prácticas de manejo entre distintas fincas, además, México, Panamá y República Dominicana se encuentran por debajo de la media. Por lo anterior, la ineficiencia técnica asociada en la ganadería varía entre los países de Mesoamérica, influenciada por una combinación de factores tecnológicos, de política, ambientales y de manejo. Entender estas diferencias es crucial para dirigir esfuerzos hacia la mejora de la ineficiencia en la producción ganadera.

Tabla 4: Promedio de la estimación de la ineficiencia técnica asociada según país

País	Obs	Mean	Min	Max
General	571	0.00772	0.00752	0.00788
Costa Rica	17	0.00773	0.00769	0.00779
Nicaragua	295	0.00773	0.00765	0.00788
México	114	0.00771	0.00745	0.00788
Panamá	62	0.00771	0.00761	0.00782
República Dominicana	63	0.00770	0.00758	0.00782
Honduras	20	0.00750	0.00759	0.00787

En la figura 10 se observa la dispersión de las ineficiencias generadas por el modelo. Todos los países muestran valores de ineficiencia técnica dentro de un rango relativamente estrecho de 0.0074 a 0.0078, esto significa que existe una variabilidad muy pequeña en la dispersión de los datos en un panorama general, lo que sugiere mínima diferencias en la distribución de la ineficiencia técnica entre países y que su diferencia se inclina más por la tecnología de producción empleada. Al agrupar los datos por país sugiere que hay factores nacionales específicos en cada país que afectan la ineficiencia técnica de manera distinta con un patrón de dispersión único. Si bien, Honduras presenta menores niveles de ineficiencia, cabe señalar que cuenta con 20 observaciones. Por su parte, la mayor cantidad de finca que se encuentran en Nicaragua cuentan con una dispersión moderada, esto no ocurre con México que muestra una dispersión mucho más amplia debido a factores nacionales y tecnologías de producción más diferenciadas entre fincas.

Figura 10. Dispersión de las ineficiencias de cada proceso productivo según país



Las principales características que muestran los factores que influyen en la ineficiencia de los sistemas ganaderos bovinos en la región se representan en los siguientes gráficos de distribución porcentual. La figura 11 muestran la distribución porcentual de la ineficiencia técnica según el proceso productivo. La figura 12 muestran la distribución porcentual de la ineficiencia técnica según el nivel de intensificación. La figura 13 muestran la distribución porcentual de la ineficiencia técnica según el país.

Figura 11. Distribución porcentual de la ineficiencia técnica según cada proceso productivo

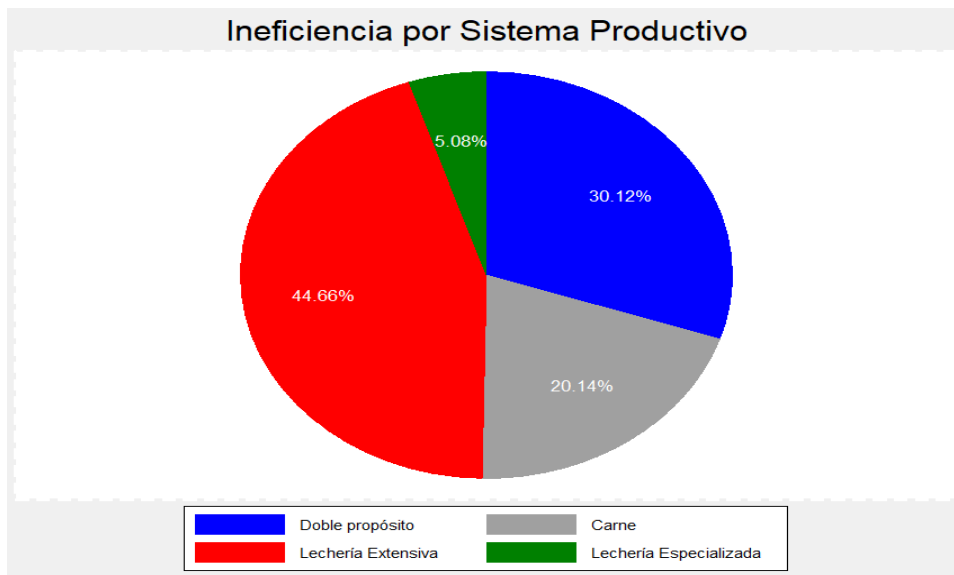


Figura 12. Distribución porcentual de la ineficiencia técnica según cada nivel de intensificación

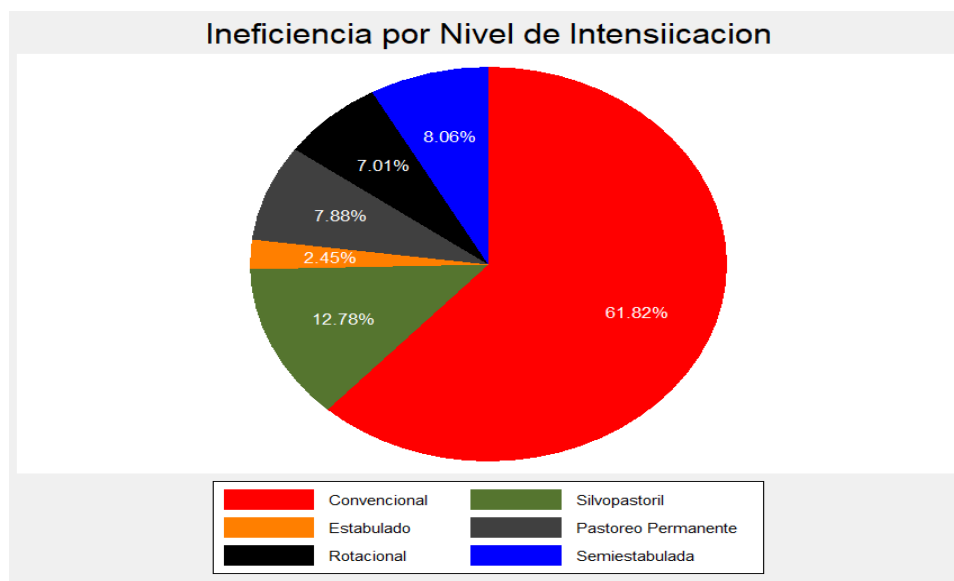
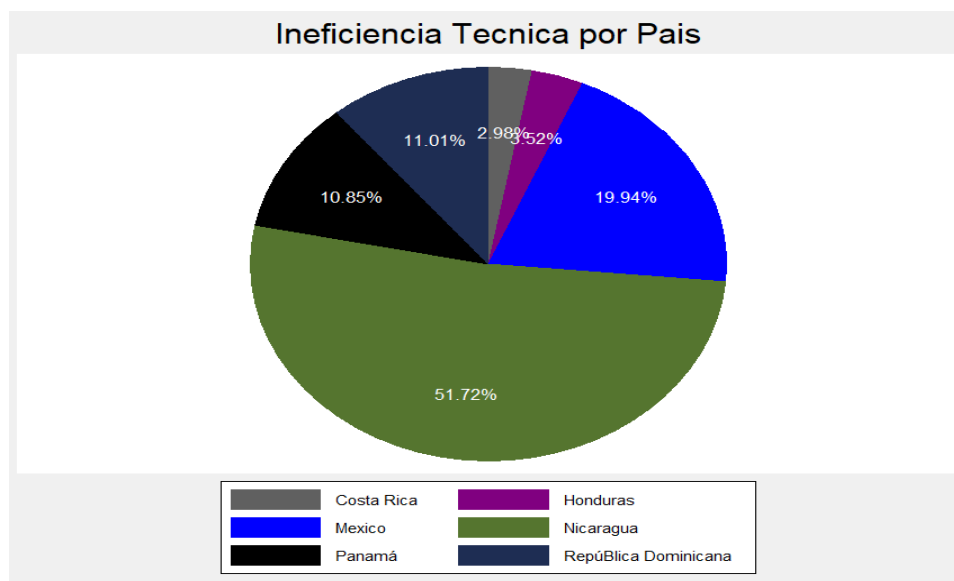


Figura 13. Distribución porcentual de la ineficiencia técnica según cada país



Como se ilustra en los gráficos proporcionados que la distribución de la ineficiencia técnica en los sistemas productivos y niveles de intensificación en la ganadería bovina está estrechamente relacionada con el uso de estos dos métodos en la región. La figura 11 muestra que los sistemas de producción de lechería extensiva más ineficiente con un 44.66%, seguido del de doble propósito con un 30.12%. Por otro lado, la figura 12 sobre los niveles de

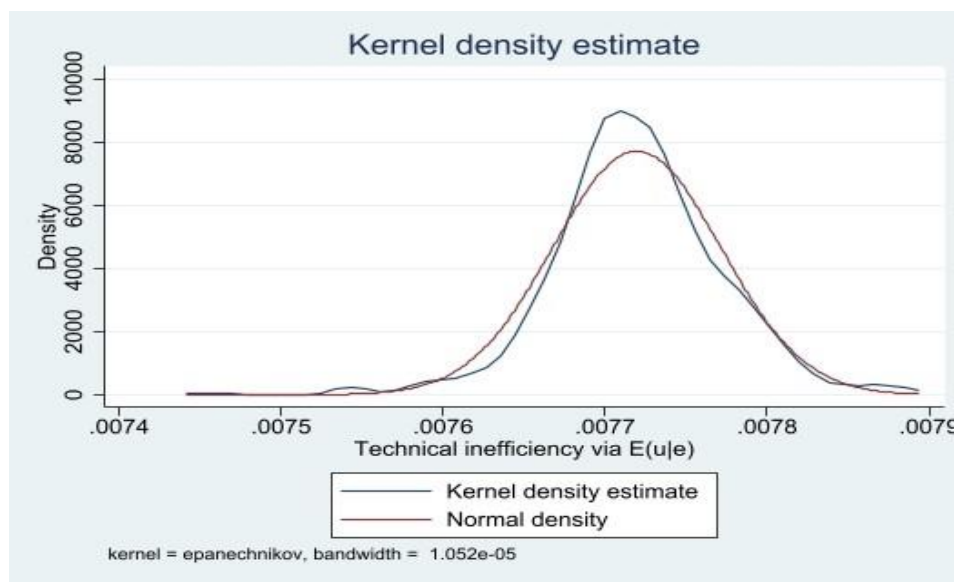
intensificación revela que los sistemas convencionales son más ineficientes, con un 61.82% de la ineficiencia total. También se aprecia en la figura 13 que el país con mayor ineficiencia es Nicaragua con un 51.72%, seguido de México con un 19.94% de la población total. Esto se debe a que tanto Nicaragua como México predomina uso de los sistemas productivo de lechería extensivas y doble propósito asociados con sistemas de intensificación convencional de las muestras observadas.

Estos resultados sugieren que los sistemas productivos tradicionales y menos tecnificados, como la lechería extensiva y los métodos convencionales, presentan mayores desafíos en términos de eficiencia, lo cual es más evidente que los sistemas productivos más tecnificados con enfoques en la modernización, como la lechería especializada y el manejo estabulado son los que deben emplearse en la región para mejorar la eficiencia económica ambiental, especialmente en aquellos países que siguen métodos más tradicionales y extensivos. Por su parte, estudios como el de Pinilla et al. (2008) y Cabrera et al. (2010), reportaron asociaciones positivas entre el nivel de intensificación y eficiencia técnica en sistemas ganaderos bovinos.

3.4.1.2 Validación de supuestos

Los supuestos que deben validarse estadísticamente son principalmente tres: la media normal del término de ineficiencia y la especificación correcta del modelo. La figura 14 muestra que el termino de ineficiencia se aproxima a una distribución media normal dado que cuenta con un dominio no negativo y el grafico esta sesgado a la derecha.

Figura 14. Distribución de densidad del término de ineficiencia



En cuanto a la correcta especificación, se asume que los inputs considerados en el presente trabajo explican adecuadamente al output. No obstante, se determina que la especificación del modelo sin dummies de los sistemas de producción y los niveles de intensificación es superior a una especificación con estas variables dummies. Estos se concluyen en virtud del

criterio de información de Akaike y Bayesiano que a menor sean estos valores el modelo explica mejor el conjunto de datos. La tabla 5 muestra que ambos criterios de información de la especificación del modelo con las dummies de sistemas de producción y niveles de intensificación es inferior que una especificación sin considerar estas variables dummy, lo que sugiere que el modelo con dummy explica mucho mejor nuestros datos. En adición a lo anterior, el modelo considera la correlación de White para la matrix de varianzas y covarianzas a fin de corregir cualquier heterocedasticidad de los términos de error, de modo tal que el modelo se encuentra subsanado de heterocedasticidad.

Tabla 5. Criterios de información sobre especificación con y sin dummies

Especificación del modelo	Criterio de información	
	Akaike	Bayesiano
Sin dummies	1546.783	1585.91
Con dummies	1174.562	1248.467

3.4.1.3 Limitaciones en el estudio

A pesar de las relevancias de los resultados, se identificaron **limitaciones del estudio** que impactan la interpretación de los hallazgos y deben ser consideradas con atención. Una de las principales es la falta de variables claves en las bases de datos. Elementos relevantes como el nivel educativo de los productores, la ubicación geográfica (por ejemplo, regiones secas o húmedas), aspectos socioeconómicos y demográficos no están presente en común para todos los países. Esta ausencia dificulta una evaluación completa de los factores que afectan la eficiencia productiva.

Otra limitación significativa es la variabilidad en los momentos que se realizaron las encuestas (factor tiempo). Estas se realizaron en diferentes periodos, utilizando distintos formatos de recolección de datos, lo que genera problemas de comparabilidad. La falta de estandarización en los instrumentos complica el análisis homogéneo de tendencias y comparaciones entre países.

Además, la selección de las fincas, como parte de un plan piloto varió, lo que introduce un posible sesgo en la representatividad de las muestras. Las diferencias en los precios del mercado durante las encuestas en cada país también representan una limitación. Dado que los proyectos se llevaron a cabo en diferentes momentos y con el objetivo de solo medir emisiones, la fluctuación de precios hoy en día podría haber afectado desigual los resultados económicos de las fincas, limitando las comparaciones directas. En cuanto a los **sistemas de intensificación**, la caracterización no fue homogénea a nivel internacional, lo que impide comparaciones precisas. Finalmente, en el caso de Nicaragua, la muestra se limitó a **fincas productora de leche**, lo que restringe la comparación con otros países que incluyeron fincas de leche y carne, limitando así la comprensión integral a los sistemas productivos.

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Se realizaron estimaciones de la eficiencia económica ambiental de 571 fincas ganadera bovina de 6 países de la región Mesoamericana. El análisis de la frontera estocástica de producción (FSP) revela que la eficiencia económica-ambiental de las fincas está influenciada significativamente por la gestión de los recursos, la intensificación de los sistemas productivos y las características específicas de cada país. Los resultados muestran que una mayor densidad de animales, la expansión de áreas forestales y bancos forrajeros tienden a reducir la eficiencia, mientras que el aumento de la producción de leche, carne y el uso de pastoreo incrementan la eficiencia. Los sistemas productivos más tecnificados, como la lechería especializada y el manejo estabulado, se asocian con mayores niveles de eficiencia, en contraste con sistemas tradicionales como la lechería extensiva, que muestran menores rendimientos. La viabilidad entre países, como Nicaragua y México mostrando los mayores niveles de ineficiencia en este plan piloto, sugiere la necesidad de adaptar las políticas y prácticas a las condiciones locales para mejorar la eficiencia en la región. Estos hallazgos subrayan la importancia de modernizar los métodos de producción para reducir la ineficiencia técnica, los impactos ambientales y promover una ganadería más sostenible en Mesoamérica.

En síntesis, este estudio ha proporcionado información valiosa sobre los factores que determinan la ineficiencia económica y ambiental en las fincas ganaderas bovinas de Mesoamérica, sentando las bases para futuras investigaciones y acciones orientadas hacia la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático en el sector ganadero de la región.

4.2 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se aconseja promover la adopción de sistemas productivos tecnificados, como la lechería especializada y el manejo estabulado, que han demostrado mejorar significativamente la eficiencia económica-ambiental en las fincas ganaderas de Mesoamérica. Es crucial reducir la densidad animal por hectárea y optimizar el uso del área de pastoreo en lugar de expandir áreas forestales o bancos forrajeros, ya que estos últimos tienden a disminuir la eficiencia. Asimismo, los esfuerzos deben enfocarse en fortalecer las prácticas de intensificación sostenibles, como los sistemas silvopastoriles y el pastoreo rotacional, para mejorar la eficiencia general. Finalmente, es vital considerar las diferencias regionales y nacionales en la formulación de políticas, especialmente en países como Nicaragua y México, donde la ineficiencia técnica es mayor, lo que sugiere la necesidad de intervenciones específicas para cada contexto local.

Se sugiere promover el desarrollo de estos tres temas de investigación en la región:

- Investigar la relación entre la carga animal y la salud del suelo y la biodiversidad local podría ofrecer valiosos aportes sobre prácticas sostenibles.

- Analizar cómo la extensión del bosque dentro de las fincas afecta los ecosistemas locales y la resiliencia de las ganaderías frente a cambios climáticos.
- Comparar prácticas de manejo y tecnologías entre países que puedan explicar las diferencias en productividad y eficiencia, y estudiar el impacto de la edad de los productores en la adopción de tecnologías innovadoras y en las prácticas de manejo sostenibles.
- Evaluar como las diferencias en producción afecta el bienestar económico de los ganaderos en diferentes contextos sociopolítico y económicos, e investigar la correlación entre la estructura de la finca y la accesibilidad a mercados y recursos, que son cruciales para la viabilidad económica de las ganaderías.

5 Bibliografía

- Acosta, A., & Díaz, T. (2014). Lineamientos de política para el desarrollo sostenible del sector ganadero. Oficina Subregional de la FAO para Mesoamérica. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36391971/Ganaderia_sostenible_FAO-libre.pdf?1422189250=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGanaderia_sostenible_FAO.pdf&Expires=1718322698&Signature=PKn0IoivKSCWnvFpUmBafo97Z6f-XyJeZrVUYD7Plu96FTaerD8u
- Agrocampo. (27 de diciembre de 2022). *Impacto ambiental de la ganadería en Colombia*. Obtenido de <https://blog.agrocampo.com.co/impacto-ambiental-de-la-ganaderia-en-colombia/>
- Agronews. (2 de julio de 2014). *FAO: La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://www.agronewscastillayleon.com/fao-la-ganaderia-y-sus-desafios-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Aigner, D., Lovell, C. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models [Formulación y estimación de modelos de función de producción de frontera estocástica]. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2023.01.023>
- Aigner, D., Lovell, C. A. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 234, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2023.01.023>
- Alvarez Kalverkamp, M., & Ledger (Eds), G. (2014). La Ganadería Globalizada de América Latina. En HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG, *Atlas de la Carne* (págs. 14-15). Imprenta MAVAL Ltda. Obtenido de https://mx.boell.org/sites/default/files/atlasdelacarne2014_web_140717.pdf

- Arias, R. A., Mader, T. L., & Escobar, P. C. (2008). Factores climáticos que afectan el desempeño del ganado en granjas lecheras y de carne. *Archivos de medicina veterinaria*, 40(1), 7-22. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0301-732X2008000100002>
- Arroyo Terán, E. S., Cevallos González, A. F., Imbaquingo Navarrete, R. P., & Melo Obando, J. L. (2020). Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 148-162. doi:<https://doi.org/10.14482/inde.38.1.629.25>
- Barrera Bassols, N. (1996). Los orígenes de la ganadería en México. *Ciencias*(44), 14-27. Obtenido de <https://www.revistacienciasunam.com/en/193-revistas/revista-ciencias-44/1827-los-or%C3%ADgenes-de-la-ganader%C3%ADa-en-m%C3%A9xico.html>
- Battese, G. E., & Coelli, T. J. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data [Un modelo para los efectos de la ineficiencia técnica en una función de producción de frontera estocástica para datos de panel]. *Empirical economics*, 20, 325-332. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01205442>
- Bahta, S., Temoso, O., Ng'ombe, J. N., Rich, K. M., Baker, D., Kaitibie, S., & Malope, P. (2023). Productive efficiency of beef cattle production in Botswana: a latent class stochastic meta-frontier analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7(June), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1098642>
- Benítez, D., Ramírez, A., Guevara, O., Pérez, B., Torres, V., Díaz, M., Ricardo, O. (2008). Factores determinantes en la eficiencia productiva de fincas ganaderas de la zona montañosa de la provincia Granma, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(3), 247-253. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193015504004>
- Bravo, Ureta, B. E., & Pinheiro, A. E. (1997). Technical, economic, and allocative efficiency in peasant farming: evidence from the Dominican Republic. *The developing economies*, 35(1), 48-67. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1746-1049.1997.tb01186.x>
- Cabrera, V. E., Solís, D., & del Corral, J. (2010). Determinants of technical efficiency among dairy farms in Wisconsin. *Journal of Dairy Science*, 93(1), 387–393. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2307>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Easuring the efficiency of decision making units [Medición de la eficiencia de las unidades de toma de decisiones]. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chavarrías, M. (1 de marzo de 2007). *Producción ganadera e impacto ambiental. El incremento de la producción animal puede tener efectos negativos en el medio ambiente si no se adoptan medidas que mantengan intactos los recursos naturales*. Obtenido de https://www.adiveter.com/ftp_public/prod%20ganadera%20e%20impacto%20ambiental.pdf

- CONtexto Ganadero. (22 de abril de 2024). *¿Qué tanto influye la carga animal en la rentabilidad de una finca?* Obtenido de <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/que-tanto-influye-la-carga-animal-en-la-rentabilidad-de-una-finca>
- Cursack, A. M., Castignani, M. I., Osan, O., & Castignani, H. (2010). Función de Producción en Sistemas Lecheros de Alta Producción de la Cuenca Resumen Introducción y Objetivos Metodología. *11º Congreso Panamericano de La Leche. FEPALE.*, 1–5. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-2010_sistemas_lecheros_alta_produccion.pdf
- Curtis, P. G., Slay, C., Harris, N. L., Tyukavina, A., & Hansen, M. (2018). Classifying drivers of global forest loss [Clasificación de las causas de la pérdida global de bosques]. *Ciencia*, *361*(6407), 1108-1111. doi:<https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Deloitte Ecuador. (16 de septiembre de 2021). *Productiva, sostenible y equilibrada con el ambiente: así debe ser la ganadería del siglo XXI en Latinoamérica*. Obtenido de <https://www2.deloitte.com/ec/es/pages/consumer-business/articles/productiva-sostenible-y-equilibrada-con-el-ambiente-as-debe-ser-la-ganaderia-del-siglo-XXI-en-Latinoamerica.html>
- FAO. (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Informe principal. In FAO (Ed.), *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020* (1st ed.). FAO; <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- FAO. (2023). Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. In FAO (Ed.), *Pathways towards lower emissions* (FAO). FAO; <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Fariña, S., Stirling, S., & Candiotti, F. (2022). Informe técnico final intensificación sostenible de la lechería. Banco Interamericano de Desarrollo [BID]; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]; Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria [FONTAGRO];.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency [La medición de la eficiencia productiva]. *Journal of the royal statistical society: series A (General)*, *120*(3), 253-281. doi:<https://doi.org/10.2307/2343100>
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (17 de mayo de 2017). *La Ganadería en México*. Obtenido de [gob.mx: https://www.gob.mx/firco/articulos/la-ganaderia-en-mexico?idiom=es](https://www.gob.mx/firco/articulos/la-ganaderia-en-mexico?idiom=es)
- Fisher, R. A. (1922). On the mathematical foundations of theoretical statistics [Sobre los fundamentos matemáticos de la estadística teórica]. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, *222*(594-604), 309-368. doi:<https://doi.org/10.1098/rsta.1922.0009>

- Gayubas, A. (23 de febrero de 2024). *Mesoamérica: qué es y sus características*. Obtenido de Enciclopedia Humanidades: <https://humanidades.com/mesoamerica/>
- Goldman, E., Weisse, M., Harris, N., & Schneider, T. (2020). Estimating the Role of Seven Commodities in Agriculture-Linked Deforestation: Oil Palm, Soy, Cattle, Wood Fiber, Cocoa, Coffee, and Rubber [Estimación del papel de siete productos básicos en la deforestación relacionada con la agricultura: palma aceitera,. *Nota técnica, Instituto de Recursos Mundiales*. doi:<https://doi.org/10.46830/writn.na.00001>
- Gomes Nogueira, C., & Oddone, N. (2017). Fortalecimiento de la cadena de valor de los lácteos en la República Dominicana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c56d6c76-ac7b-4bea-906f-a8a3bdd858fc/content>
- Gudynas, E. (2015). *Extractivismos: ecología, economía y política de un modo de entender el desarrollo y la naturaleza*. Centro de Documentación e Información Bolivia [CEDIB].
- Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M. C., . . . Notenbaert, A. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions [Mitigación del cambio climático mediante transiciones del sistema ganadero]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(10), 3709-3714. Obtenido de <https://doi.org/10.1073/pnas.1308044111>
- Hecht, S. B. (1993). La lógica de la ganadería y la deforestación en la Amazonia: consideración de los mercados de tierras, el valor de los servicios auxiliares, el contexto macroeconómico más amplio y las estrategias económicas individuales. *BioScience*, *43*(10), 687–695. doi:<https://doi.org/10.2307/1312340>
- Henning Steinfeld., Pierre Gerber., Tom Wassenaar. Vincent Castel., Mauricio Rosales., C. de H. (2006). *Livestock's long shadow environmental issues and options*. [https://books.google.com.do/books?hl=es&lr=&id=1B9LQQkm_qMC&oi=fnd&pg=PR16&dq=steinfeld+et+al.++\(2006\)+pdf&ots=LQV-iW5NmG&sig=jCGOPfKYIL7CM6YvHoP0aK49Rxo#v=thumbnail&q=steinfeld et al. \(2006\) pdf&f=false](https://books.google.com.do/books?hl=es&lr=&id=1B9LQQkm_qMC&oi=fnd&pg=PR16&dq=steinfeld+et+al.++(2006)+pdf&ots=LQV-iW5NmG&sig=jCGOPfKYIL7CM6YvHoP0aK49Rxo#v=thumbnail&q=steinfeld+et+al.++(2006)+pdf&f=false)
- Huerta, C., Halffter, G., & Cruz, M. (2018). Ganadería Sustentable en el Golfo de México. Instituto de Ecología, A.C. Obtenido de <https://bosquedeniebla.com.mx/wp-content/uploads/2019/09/Libro-Ganaderia-sustentable-eISBN-2018-1.pdf>
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (IMN). (2022). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.662052>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. *Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de La Tierra. Kanagawa, Japón.*, *4*, 205–224. <https://doi.org/10.2307/jj.6605372.22>

- Ibrahim, M. A., Guerra, L., Casasola Coto, F., & Neely, C. (2010). Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits. En M. Abberton, R. Conant, & C. Batello, *Grassland carbon sequestration: management, policy and economics [Secuestro de carbono en pastizales: gestión, políticas y economía]* (Vol. 11, págs. 189-196). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. Obtenido de <https://www.fao.org/4/i1880e/i1880e09.pdf>
- Kaimowitz, D. (1995). *Livestock and deforestation in Central America in the 1980's and 1990's: a policy perspective [Ganadería y deforestación en Centroamérica en las décadas de 1980 y 1990: una perspectiva política]*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA].
- Kalirajan, K. P., & Obwona, M. B. (1994). Frontier Production Function: The Stochastic Coefficients Approach [Función de producción de frontera: el enfoque de coeficientes estocásticos]. *Boletín de Economía y Estadísticas de Oxford*, 56(1), 87. doi:10.1111/j.1468-0084.1994.mp56001007.x
- Kiss, T. (20 de febrero de 2024). *Mesoamérica - Concepto, historia y culturas mesoamericanas*. Obtenido de Concepto: <https://concepto.de/mesoamerica/>
- Lotero Cadavid, J. (1979). *Principales factores que influyen en la productividad ganadera*. Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12324/23561>
- Martínez-Melo, J., Torres, V., Hernández, N., & Jordá, H. (2013). Impact index for the characterization of factors affecting milk production in farms of Ciego de? vila province, Cuba [Índice de impacto para la caracterización de factores que inciden en la producción de leche en fincas de la provincia Ciego de Ávila, Cu. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 47(4), 367-373. Obtenido de <https://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/383>
- Meeusen, W., & van Den Broeck, J. (1977). Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error [. *International Economic Review*, 18(2), 435-444. doi:<https://doi.org/10.2307/2525757>
- Milesi, O. (2016). Ganadería, oportunidad y amenaza para una América Latina sostenible. *Sitio Argentino de Producción Animal*, 1-3. Obtenido de https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/origenes_evolucion_y_estadisticas_de_la_ganaderia/183-ganaderia_america.pdf
- Molina-Castro, G., & Calderón-Jiménez, B. (2021). Evaluación de enfoques asimétricos para la estimación de incertidumbres estándar para factores de emisión en el sector de combustibles de Costa Rica. *Frente. Reinar. Ciencia*, 9, 1-10. doi:10.3389/fenvs.2021.662052

- Monterroso Rivas, A. I. (22 de junio de 2022). Escenarios sobre el impacto del cambio climático en la ganadería sostenible/regenerativa en Chihuahua, México. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C. [FMCN]. Obtenido de https://fmcn.org/uploads/publication/file/pdf/GANARE/Ganaderia%20y%20Cambio%20Climatico_FINAL.pdf
- Moscoso Díaz, C., Villanueva, C., Detlefsen Rivera, G., & López Payés, J. (2018). Balance de carbono en fincas ganaderas de la región suroriente de Guatemala [Monografía, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)]. Obtenido de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9228>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (24 de marzo de 2020). *¡Que fluyan los beneficios! La ganadería y el medio ambiente*. Obtenido de <https://www.fao.org/livestock-environment/es>
- Palacios, A. G., & Flores-Ortega, M. (2012). Aplicación del modelo de frontera estocástica de producción para analizar la eficiencia técnica de la industria eléctrica en México. En M. Ramos, & F. Miranda, *Optimización-Estocástica-Recursiva-Coherente-Sistémica y sus variantes (probabilidad, econometría y estadística aplicada)* (Vol. I, págs. 371-390). ECORFAN. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4776410>
- Palma-García, J. M., Toral, J. N., & Rivera, J. A. (2022). 4.1 Avances y retos de la adaptación y mitigación al cambio climático mediante la agroforestería pecuaria en México. En A. I. Moreno Calles, M. L. Soto Pinto, M. M. Cariño Olvera, J. M. Palma García, S. Moctezuma Pérez, J. J. Rosales Adame, . . . W. López Martínez, *Los sistemas agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes* (Vol. 119, págs. 447-466). Escuela Nacional de Estudios Superiores- Unidad Morelia; Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT]. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Martha-Micheline-Carino-Olvera/publication/367594964_Sistemas_Agroforestales_de_Mexico_Avances_experiencias_acciones_y_temas_emergentes/links/63dc301862d2a24f92ed53a5/Sistemas-Agroforestales-de-Mexico-Avances-experiencia
- Payés, J. L. (2018). *BALANCE DE CARBONO EN FINCAS GANADERAS DE LA REGIÓN SURORIENTE DE GUATEMALA*. Agosto. <https://www.researchgate.net/publication/328319940>
- Paustian, K., Ravindranath, N. H., & van Amstel, A. (2006). Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. En H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero]* (Vol. 4). Instituto para las Estrategias Ambientales Globales. Obtenido de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_01_Ch1_Introduction.pdf

- Pezo, D. (2019). Intensificación sostenible de los sistemas ganaderos frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Estado del arte. Banco Interamericano de Desarrollo [BID]; Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria [FONTAGRO]; Fondo para el Medio Ambiente Mundial [FMAM]; doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0001722>
- Pinilla, Á., Cuervo, D. E. L. C., Diferencias, I. O., En, T., & Sector, E. L. (2008). ¿INEFICIENCIA O DIFERENCIAS TECNOLÓGICAS EN EL SECTOR LECHERO?*. *Revista de Economía Aplicada*, XVI(48), 69–88. <https://doi.org/1133-455X>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. In H. S. P. G. T. W. V. C. M. R. C. de Haan (Ed.), *Fao* (FAO;). FAO; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/a0701s>
- Thomas, H. Smith. (2009). *the Cattle Health Report 2005.Pdf* (p. 384). Storey Publishing, LLC; 1er edición (11 Marzo 2009). <https://doi.org/1603420908>
- Reyes Reyes, M. (2021). *Acciones de mitigación nacionalmente apropiadas en el marco de las contribuciones determinadas en el sector ganadero de cinco países de Mesoamérica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Obtenido de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11448>
- Valerio, D. (16 de febrero de 2021). *Potencial de la Ganadería Climáticamente Inteligente para reducir la vulnerabilidad de las mujeres ante el cambio climático*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]: <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/ar/c/1375566/>
- Vergés, J. (2012). *Eficiencia empresarial comparativa : Indicadores y técnicas de análisis para la evaluación de la eficiencia de entidades productivas*. 1–67. <https://webs.uab.cat/jverges/wp-content/uploads/sites/391/2009/05/Eficiencia-empresarial-compartiva-indicadores-y-tecnicas-de-analisis.pdf>
- Xue, Y., Yan, J., Cui, Y., Zhao, H., Zhang, Y., Ma, C., & Zheng, H. (2022). The Technical Efficiency of Beef Calf Production Systems: Evidence from a Survey in Hebei, China. *Agriculture (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture12101604>
- Vergés, J. (2012). *Eficiencia empresarial comparativa: Indicadores y técnicas de análisis para la evaluación de la eficiencia de entidades productivas*. 1–67. <https://webs.uab.cat/jverges/wp-content/uploads/sites/391/2009/05/Eficiencia-empresarial-compartiva-indicadores-y-tecnicas-de-analisis.pdf>
- Weisse, M., & Goldman, E. (2021). Just 7 Commodities Replaced an Area of Forest Twice the Size of Germany Between 2001 and 2015 [Sólo siete productos básicos reemplazaron una superficie de bosque dos veces mayor que la de Alemania entre 2001 y 2015]. *World Resour. Inst. Rev.* Obtenido de <https://www.wri.org/insights/just-7-commodities-replaced-area-forest-twice-size-germany-between-2001-and-2015>
- Xue, Y., Yan, J., Cui, Y., Zhao, H., Zhang, Y., Ma, C., & Zheng, H. (2022). The Technical Efficiency of Beef Calf Production Systems: Evidence from a Survey in Hebei, China.

Agriculture (Switzerland), 12(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture12101604>

Anexos

Anexo A. Análisis de correlación entre variables numéricas

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	
(2) edad	-	1.00																	
(3) altitud	0.527	0.00	1.00																
(4) Área total de	0.437	0.205	0.00	1.00															
(5) Área total de	-	0.404	-	0.100	1.00														
(6) Área total de	0.286	0.404	0.634	0.100	0.203	1.00													
(7) Área total de	0.773*	-	0.739	-	0.082	0.203	1.00												
(8) unidada l	0.211	0.676	0.064	0.203	0.193	0.992**	1.00												
(9) carga aérea	-	0.044	-	0.083	0.715*	-	-	1.00											
(10) dividente	0.319	0.228	0.805	0.176	0.784*	0.518	0.857**	1.00											
(11) cant de a	-	0.433	0.613	0.955**	-	0.354	0.145	0.311	0.884	1.00									
(12) cant de a	-	0.222	-	0.117	0.734*	-	0.459	0.874**	0.982**	0.144	1.00								
(13) cant de a	-	0.384	0.730*	0.767*	0.030	-	0.025	-	-	0.711	0.105	-	1.00						
(14) cant de a	-	0.343	0.685**	0.74**	0.054	0.102	0.127	0.060	0.233	0.92**	0.271	-	0.892**	1.00					
(15) total d o	-	0.150	-	0.137	0.664	0.526	0.520	0.827**	0.978**	0.103	0.871**	0.991**	-	0.320	1.00				
(16) total t-Á ±	0.378	0.028	0.373	0.152	0.197	0.391	0.377	0.505	0.719*	0.011	0.736*	0.803*	-	0.359	0.45*	1.00			
(17) total t-a	0.378	0.029	0.373	0.288	0.188	0.465	0.451	0.477	0.735*	0.144	0.675	0.803*	-	0.427	0.49*	0.88**	1.00		
(18) indi ca-c	-	0.324	0.927*	0.045	0.669	0.670	0.695	0.47*	0.935**	0.154	0.780*	0.894*	-	0.210	0.26**	0.679	0.689	1.00	

Anexo B. *Do-file para limpieza de datos*

Link:

**C:\Users\Harold\CATIE\Tesis Eficiencia económica-ambiental en Mesoamérica -
General\tesi final harold**