

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGIA
MAESTRÍA EN MANEJO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES
CONTINENTALES.



Tema:

“Análisis de ciclo de vida en la producción lechera de sistemas ganaderos especializados y de doble propósito, en El Salvador”.

Presenta:

Ing. Agr. Erick Alexander Pérez Medina

Para optar al grado de:

“Maestro en ciencias del manejo sustentable de los recursos naturales continentales”

Asesor interno:

M.E.S. Osmín Pocasangre

Asesores Externos:

Ph.D. Joaquín Miguel Castro Montoya

M.Sc. Blanca Eugenia Torres de Ortiz

Ciudad Universitaria, febrero de 2025

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

M.SC. JUAN ROSA QUINTANILLA

VICERRECTORA ACADÉMICA:

DRA. EVELYN BEATRIZ FARFÁN

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:

M.SC. ROGER ARIAS

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

DECANO

DR. LUIS GILBERTO PARADA GÓMEZ

VICEDECANO

DR. JOSÉ NERYS FUNES TORRES

DIRECTORA DE ESCUELA DE BIOLOGIA

LICDA. MILAGRO ELIZABETH SALINAS

**COORDINADOR DE POSGRADO FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
MATEMATICAS.**

M.SC. BESSY EVELYN GALVEZ CARDOZA

COORDINADOR DE POSGRADO ESCUELA DE BIOLOGIA

M.SC. JOSÉ NILTON MENJÍVAR

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien me ha dado la fortaleza, la sabiduría y la inspiración para llevar a cabo este trabajo. Sin su guía, nada de esto habría sido posible.

A mi familia, especialmente a mi madre quien ha brindado su amor incondicional y su apoyo inquebrantable. Gracias por creer en mí y por ser mi fuente de motivación en los momentos más difíciles.

A mis tutores del trabajo de tesis de maestría M.E.S. Osmín Pocasangre, PhD. Joaquín Castro-Montoya, Ing. M.Sc. Blanca Eugenia Torres de Ortiz, quienes me han brindado su apoyo y compañía a lo largo de este camino. Las discusiones enriquecedoras y los momentos compartidos han hecho de esta experiencia algo inolvidable.

Un agradecimiento especial a mi asesor PhD Joaquín Castro Montoya, por su orientación constante, su valioso apoyo y sus críticas constructivas que han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Su pasión por la investigación ha sido una gran inspiración para mí.

Quisiera recordar con cariño a aquellos que ya no están con nosotros, especialmente a mi abuelo Pedro Medina, quien un día me confió la responsabilidad de cuidar de la familia. Dedico cada uno de mis triunfos a él, con la esperanza de que se sienta orgulloso de mí donde quiera que esté. También quiero recordar a mi querida mascota, Sisi. Su amor y compañía han dejado una huella imborrable en mi corazón y me han enseñado la importancia de la lealtad y la alegría en la vida cotidiana.

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), especialmente a los Doctores: Ricardo González Quinteros y Jacobo Arango por la colaboración con los análisis necesarios para llevar a cabo esta investigación, sin su contribución no hubiese podido llegar a tan importantes resultados.

Agradezco también a todos los ganaderos que han sido parte de esta investigación, especialmente a PROLECHE, su disposición para compartir sus experiencias y conocimientos ha enriquecido enormemente mi trabajo y me ha permitido comprender mejor la realidad del sector.

Y, finalmente, a todos aquellos que, de alguna forma, han sido parte de este proceso. Cada uno ha dejado una huella en mi vida y en mi desarrollo académico.

Gracias a todos.

INDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	7
II.	OBJETIVOS	8
	OBJETIVOS ESPECIFICOS:	8
III.	HIPOTESIS	8
IV.	ANTECEDENTES	9
	Emisiones de GEI mundiales	9
	Emisiones de la agricultura a nivel mundial	9
	Emisiones en Centro América.	11
	Emisiones en El Salvador.....	12
	FUNDAMENTO TEORICO	14
	Tipos de sistemas de producción bovina.	14
	Los gases de efecto invernadero en la ganadería.....	15
	Huella de carbono.....	17
	Análisis de ciclo de vida.....	18
V.	METODOLOGIA	20
	Ubicación y descripción del área de estudio	20
	Estandarización de la unidad funcional	21
	Definición del límite del sistema y estimación de emisiones	21
	Metodología de campo	22
	Análisis de datos	23
VI.	RESULTADOS	23
	Características generales de las fincas en estudio.....	23
	Fuentes de emisión de GEI en los sistemas de producción.....	25
	Huella de carbono en los sistemas productivos	26
VII.	DISCUSIÓN	28
	Fuentes de emisión de GEI en los sistemas de producción.....	29
	Huella de carbono en sistemas productivos doble propósito y lechería especializada.....	31
VIII.	CONCLUSIONES	32
IX.	RECOMENDACIONES	33
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las fincas en estudio (elaboración propia).	21
Tabla 2: Clasificación de la información recolectada en la fase de campo.	22
Tabla 3: Características generales de las ganaderías en estudio.	24
Tabla 4: Características de las ganaderías en estudio.	25

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de las fincas que forman parte del estudio (elaboración propia). ..	20
Figura 2: Composición de la huella de carbono de los sistemas productivos doble propósito.	26
Figura 3: Composición de la huella de carbono de los sistemas productivos especializados.	26
Figura 4: Huella de carbono por sistema productivo.	27

RESUMEN

La agricultura y ganadería del siglo XXI enfrentan retos significativos, como la necesidad de aumentar la producción de alimentos y fibras con una fuerza laboral rural en disminución, atender a una población en crecimiento y adoptar métodos de producción sostenibles. En este contexto, la ganadería genera aproximadamente el 5.8% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), lo que representa 2.86 mil millones de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq), principalmente provenientes de la fermentación entérica y actividades relacionadas con el manejo del hato (FAO, 2009; Gerber et al., 2013). Para evaluar el impacto ambiental de las diversas actividades humanas, se han desarrollado diversas metodologías, destacándose el análisis de ciclo de vida (ACV) que permite estimar la huella de carbono (HC) al cuantificar las emisiones de GEI durante la producción de un bien o servicio (IHOBE, 2009).

En este estudio se analizaron catorce ganaderías en distintas regiones de El Salvador, clasificadas en dos grupos: cuatro especializadas en la producción lechera y diez de doble propósito (leche y carne). La unidad funcional fue el litro de leche estandarizado al 4% de grasa y 3.3% de proteína (Federación Internacional de Lácteos, 2015). Los hallazgos indicaron que la huella de carbono de la leche fue de 2.5 kg de CO₂eq/L en los sistemas de doble propósito y de 1.4 kg en los especializados. Las menores emisiones en las lecherías especializadas se atribuyen a su mayor eficiencia, reflejada en el promedio de producción diaria por vaca. Las principales fuentes de emisiones de GEI fueron la fermentación entérica y los insumos externos, con un 42.5% en sistemas de doble propósito y 56.5% en especializados. La fabricación de concentrados generó más emisiones en las ganaderías de doble propósito, aunque estas utilizan menos concentrado, su conversión de alimento a leche es menos eficiente. También se observaron comportamientos similares en las emisiones de fertilizantes y quema de combustibles, mientras que las emisiones de óxido nitroso (N₂O) fueron menores en las lecherías especializadas debido a una gestión más eficiente del estiércol. En conclusión, este estudio sugiere que tanto los sistemas de doble propósito como los especializados pueden reducir su huella de carbono mediante una mejor gestión de pastos, implementación de planes de fertilización adaptados a sus necesidades, manejo eficiente de reemplazos y selección de ganado de mayor rendimiento

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura y ganadería en el siglo XXI enfrentan numerosos desafíos, como la necesidad de incrementar la producción de alimentos, lidiar con una fuerza laboral rural en disminución, atender el crecimiento poblacional, mantener su papel como motor de desarrollo en los países que dependen de estos sectores, y adoptar métodos de producción sostenibles y eficientes que permitan adaptarse al cambio climático (FAO, 2009).

Según Pérez et al. (2021), la erradicación de la pobreza está estrechamente vinculada con el aumento en la producción. Esto subraya la urgencia de tomar decisiones rápidas y efectivas por parte de los actores involucrados. En el caso de la cadena agroalimentaria del sector ganadero, es esencial fomentar sistemas de producción y transformación con un alto grado de sostenibilidad y resiliencia, enfocándose no solo en los rendimientos productivos, sino también en la sostenibilidad ambiental y económica. De acuerdo con el IICA (2012), el sector agroindustrial en El Salvador exige cada vez más leche como materia prima para la transformación de productos derivados, lo que restringe el acceso del país a mercados internacionales mediante los tratados de libre comercio firmados con la región. Este aumento en la demanda de materias primas representa una oportunidad de crecimiento para el sector ganadero, aunque este crecimiento debe ser ordenado, monitoreado y cuantificado en términos de sus efectos ambientales. Una de las metodologías empleadas para este monitoreo es el análisis de ciclo de vida (ACV).

El ACV es una herramienta de diseño que permite estimar los volúmenes de gases de efecto invernadero (GEI) generados en las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de recursos, producción y distribución, hasta su uso y disposición final. En los sistemas ganaderos especializados en producción lechera, las principales fuentes de GEI son: el metano (CH_4) procedente de la fermentación entérica, el óxido nitroso (N_2O) derivado del manejo del estiércol y el dióxido de carbono (CO_2) proveniente del uso de combustibles fósiles, maquinaria y equipos agrícolas (Gerber et al., 2013). Las consecuencias del cambio climático exigen un análisis profundo de los GEI y su dinámica. La huella de carbono es una herramienta clave para comprender esta dinámica, ya que actúa como un indicador que facilita la evaluación de las emisiones en sus diferentes dimensiones. Medir y divulgar esta información es crucial para la toma de decisiones a nivel individual, empresarial, regional o nacional (Schneider y Samaniego, 2009).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la huella de carbono en la producción lechera de sistemas ganaderos especializados y de doble propósito en El Salvador. Para ello, se empleó un análisis de ciclo de vida, tomando como unidad funcional el litro de leche corregido por contenido de grasa y proteína. El estudio seccionó e identificó las distintas fuentes de emisión y absorción de carbono a lo largo de todo el proceso productivo, con el fin de proponer alternativas de producción más limpias que permitan avanzar hacia una actividad ganadera ambientalmente más sustentable.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Determinar mediante la metodología del análisis de ciclo de vida la huella de carbono del litro de leche en sistemas ganaderos especializados y de doble propósito en El Salvador.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Cuantificar el carbono producido en sistemas ganaderos especializados y de doble propósito.
- Identificar las principales actividades y sectores con mayor potencial de emisión y de captura de carbono en dos sistemas de producción lechera.
- Plantear alternativas de mitigación y adaptación al cambio climático en la cadena de producción lechera.

III. HIPOTESIS

Hipótesis alterna:

Los sistemas de producción bovina de doble propósito generan una huella de carbono menor que los sistemas de producción especializados, debido al menor nivel de tecnificación, lo que reduce las emisiones asociadas a insumos externos y manejo intensivo.

Hipótesis nula:

Los sistemas de producción bovina de doble propósito no generan una huella de carbono menor que los sistemas de producción especializados.

IV. ANTECEDENTES

Emisiones de GEI mundiales

Los GEI causadas por actividades humanas están intensificando los efectos del cambio climático. Aproximadamente el 60% de estas emisiones proviene de solo 10 países (China, EEUU, India, Unión Europea, Rusia, Brasil, Indonesia, Japón, Irán, Corea del sur), mientras que los 100 países que menos emiten contribuyen con menos del 3%. En el ámbito global, el sector energético es responsable de casi tres cuartas partes de las emisiones, seguido de la agricultura. Dentro del sector energético, la generación de electricidad y calor es la principal fuente de emisiones, seguida por el transporte y la industria. Por otro lado, el uso de la tierra, los cambios en su uso y la silvicultura actúan como tanto fuentes como sumideros de emisiones, siendo un sector clave para lograr emisiones netas cero (ClimateWatch, 2024).

Según Ritchie (2020), para abordar integralmente la huella de carbono, es fundamental conocer la magnitud de las emisiones globales de GEI, que oscilan en torno a 50 mil millones de toneladas de CO₂ equivalente al año, así como las emisiones por sector. Solo así se podrán implementar soluciones efectivas. Las emisiones del sector ganadero representan el 5.8% del total global, equivalentes a 2.8 mil millones de toneladas, mientras que el sector energético emite 36.2 mil millones de toneladas de CO₂ equivalente.

El que existan diversas fuentes de emisiones indica que no existe una solución única ni sencilla para enfrentar el cambio climático. Enfocarse únicamente en la electricidad, el transporte, la producción de alimentos o la deforestación no es suficiente. Incluso si se lograra descarbonizar por completo el suministro eléctrico, sería necesario electrificar también toda nuestra calefacción y el transporte por carretera. Aun así, seguirían siendo un desafío las emisiones provenientes del transporte marítimo y de la aviación, que aún no cuentan con tecnologías de bajas emisiones de carbono.

Emisiones de la agricultura a nivel mundial

La agricultura a nivel mundial es un contribuyente significativo a las emisiones de GEI, representando entre el 17% y el 18% de las emisiones totales, según Tubiello et al. (2014). En este contexto, el sistema alimentario, que abarca actividades como la refrigeración, el procesamiento, el envasado y el transporte de alimentos, es responsable de aproximadamente una cuarta parte de estas emisiones. Los subsectores específicos de la agricultura muestran las siguientes contribuciones: pastizales (0.1%), tierras de cultivo (1.4%), deforestación (2.2%), quema de cultivos (3.5%), cultivo de arroz (1.3%), suelos agrícolas (4.1%), y ganado y estiércol (5.8%) (Ritchie, 2020).

La principal fuente de emisiones en el sector agrícola se deriva de la fermentación entérica en los rumiantes, la gestión de estiércol, el uso de fertilizantes nitrogenados y la conversión de tierras para la producción agrícola. Según el IPCC (2014), la producción y manejo de fertilizantes químicos y estiércol representan aproximadamente el 13% de las emisiones agrícolas, debido al N₂O, un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el CO₂.

Además, el cambio de uso del suelo y la deforestación para la expansión agrícola son fuentes clave de emisiones, contabilizando entre el 24% y el 27% de las emisiones globales de GEI (FAO, 2016). La conversión de bosques y pastizales en tierras agrícolas libera grandes cantidades de CO₂, exacerbando el impacto climático del sector.

Las soluciones para mitigar estas emisiones incluyen la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, como la agricultura de conservación, la gestión mejorada del estiércol y la optimización del uso de fertilizantes. Tubiello et al., (2015) destacan que la implementación de tecnologías y prácticas de manejo eficiente del suelo y los recursos hídricos puede reducir significativamente las emisiones agrícolas. Además, la restauración de tierras degradadas y la promoción de la agroforestería son estrategias que pueden capturar carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático (Smith et al., 2014).

Emisiones de la ganadería a nivel mundial.

Dada la importancia del sector agropecuario en muchos países en desarrollo, las emisiones derivadas de la ganadería constituyen una proporción significativa del total de emisiones de GEI. Las principales fuentes de estas emisiones son la fermentación entérica, el manejo del estiércol y el depósito de heces y orina en praderas. Otras emisiones asociadas con la ganadería incluyen las derivadas de la producción de alimentos para animales, así como las emisiones y absorciones relacionadas con la vegetación y los suelos de pastizales, así como de los sistemas silvopastoriles. También se consideran las emisiones de energía vinculadas a la producción de bioenergía a partir de residuos ganaderos (Wilkes et al., 2017).

La fermentación entérica, un proceso digestivo natural en los animales rumiantes, es responsable de una parte de las emisiones de CH₄ dentro del sector agrícola. Según Gerber et al., (2013), el metano producido por la fermentación entérica representa alrededor del 44% de las emisiones agrícolas globales. Estas emisiones varían según la región y el tipo de manejo ganadero; en regiones en desarrollo, donde los sistemas de producción ganadera suelen ser menos eficientes, las emisiones por unidad de producto suelen ser más altas en comparación con los sistemas más intensificados de los países desarrollados.

La ganadería, particularmente la producción bovina, ha sido señalada como una de las principales fuentes de emisiones de GEI a nivel mundial. Sin embargo, es importante adoptar una perspectiva equilibrada sobre su papel en el cambio climático. Aunque la ganadería contribuye a aproximadamente el 5% de las emisiones

antropogénicas de GEI, este sector es fundamental para la seguridad alimentaria, el desarrollo rural y las economías locales, especialmente en los países en desarrollo (Ritchie, 2020).

Las emisiones en la ganadería provienen principalmente del CH₄, generado por la fermentación entérica en rumiantes, y del N₂O, liberado en la gestión del estiércol. Sin embargo, la eficiencia en la producción de carne y leche ha mejorado considerablemente en las últimas décadas, lo que ha llevado a una reducción en la intensidad de las emisiones por unidad de producto. En países como Estados Unidos, las emisiones por litro de leche han disminuido hasta en un 50% gracias a la implementación de mejores prácticas de manejo, tecnología avanzada y alimentación optimizada (Capper et al., 2009).

Además, la ganadería no solo emite GEI, sino que también puede contribuir a su mitigación, prácticas como el manejo adecuado de pastizales, el uso de sistemas silvopastoriles y la integración de árboles en sistemas ganaderos permiten la captura de carbono en los suelos y la biomasa. Estas prácticas contribuyen a reducir la huella de carbono de la ganadería y a mejorar la sostenibilidad del sistema productivo (FAO, 2013).

Es fundamental destacar que la ganadería proporciona múltiples beneficios sociales y económicos, especialmente en regiones rurales de bajos ingresos. En muchos países en desarrollo, el ganado es una fuente vital de sustento, proporcionando carne, leche, cuero, y también es usado como fuerza de trabajo agrícola. Por ello, las políticas de mitigación no pueden desvincularse de la realidad económica y social de los países donde la ganadería es un pilar clave del desarrollo rural (Steinfeld et al., 2006).

Emisiones en Centro América.

La región centroamericana, a pesar de su reducida extensión territorial, es de suma importancia estratégica, ya que sirve como punto de tránsito entre América del Norte y América del Sur. Además, el Canal de Panamá es un hito clave que facilita la movilización de mercancías a nivel mundial. El potencial de crecimiento en la región es cada vez más prometedor, y tanto la agricultura como la ganadería pueden aprovecharlo, siempre y cuando se monitoreen los efectos que este crecimiento podría tener sobre el medio ambiente.

Según Climate Watch, para el año 2021, las emisiones de la agricultura en la región centroamericana oscilaron entre 12.1 y 2.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente. En este contexto, Nicaragua se posiciona como el país con las mayores emisiones, mientras que El Salvador presenta la menor participación. Sin embargo, esto no implica que un país sea más contaminante que otro, sino que puede deberse a diversas prácticas de manejo y tecnologías aplicadas, distintos tipos de actividades agropecuarias y principalmente a las áreas dedicadas a la agricultura en cada país.

En Centroamérica, estas emisiones son aún más relevantes debido a la prevalencia de sistemas ganaderos extensivos y al uso de prácticas de manejo menos eficientes en comparación con otras regiones más desarrolladas. Países como Nicaragua y Honduras, donde la ganadería es una de las principales actividades económicas, presentan un perfil de emisiones considerablemente alto dentro del sector agropecuario.

Un informe de Wilkes et al., (2017) señala que las principales fuentes de emisiones de la ganadería en Centroamérica incluyen la fermentación entérica (responsable de una gran parte del metano emitido), el manejo de estiércol y el cambio en el uso del suelo asociado con la expansión de pastizales. En muchos casos, el aumento de la demanda de carne y leche ha llevado a la conversión de áreas de cultivo y forestales a pastizales, lo que agrava aún más el problema al reducir los sumideros de carbono.

Existen oportunidades claras para reducir estas emisiones mediante la implementación de prácticas ganaderas sostenibles, la adopción de sistemas silvopastoriles, la mejora en la eficiencia alimentaria y la gestión adecuada del estiércol pueden reducir significativamente la huella de carbono del sector. En Costa Rica, por ejemplo, se ha implementado con éxito un programa de ganadería baja en carbono, que ha permitido disminuir las emisiones a la vez que se mejora la productividad conocida como NAMA Ganadería (Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada para la Ganadería Bovina), es una iniciativa que busca transformar la producción ganadera hacia prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente. Su objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y aumentar la productividad y rentabilidad del sector ganadero. (Murgueitio et al., 2011).

Emisiones en El Salvador.

Las emisiones de GEI provenientes del sector ganadero en El Salvador representan una parte importante del total de emisiones agrícolas del país. Según un informe del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador, el sector agropecuario contribuye con alrededor del 10% de las emisiones totales de GEI del país, siendo la ganadería una de las principales fuentes de emisiones debido a la producción de CH₄ generado por la fermentación entérica de los rumiantes, especialmente en los sistemas de producción bovina. En El Salvador, este fenómeno se ve exacerbado por la prevalencia de sistemas de pastoreo, que no optimizan la conversión alimentaria del ganado y por lo tanto, generan mayores emisiones por cada unidad de producción en comparación con sistemas más intensivos o tecnificados (MARN, 2021).

Según Ritchie (2020), El Salvador se posicionó en el puesto 133 a nivel mundial en emisiones, con una participación del 0.03%, lo que representa un total de 13.39 millones de toneladas de CO₂ equivalente. De estas emisiones globales, solo 2.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente provienen de la agricultura, lo que representa

un 16.4% del total, además el país es firmante del Acuerdo de París, cuyo objetivo es limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C para el año 2050, a los firmantes del Acuerdo de París se les solicita periódicamente que presenten sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) nuevas o actualizadas cada cinco años, comenzando en 2020, también los países deben de comunicar “estrategias de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones de GEI para mediados de siglo”. El Salvador ha actualizado sus NDC, basándose en los avances en tecnología, ciencia y tendencias económicas, los últimos informes indican que se han logrado cambios significativos y un refuerzo en la reducción de GEI a través de objetivos sectoriales y propuestas de adaptación.

Existen antecedentes para la implementación de sistemas ganaderos con bajas emisiones de carbono en El Salvador. En 2021, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) ejecutó el proyecto “Apoyo a la formulación de Acciones Apropriadas de Mitigación en la Agricultura Centroamericana”. Este proyecto capacitó a 143 ganaderos (36% mujeres y 64% hombres) y 25 técnicos de las regiones de Morazán y Chalatenango en 10 sesiones sobre cambio climático, establecimiento de cercas vivas forrajeras, uso de pastos mejorados, creación de bancos proteicos y energéticos, división de potreros, tiempo de pastoreo y manejo del estiércol bovino con lombriz roja californiana, entre otros. Al finalizar el proyecto, se capacitaron a más de 200 ganaderos y se sensibilizó a 700 personas dependientes de la ganadería en las acciones adecuadas de mitigación en esta actividad productiva.

Para 2025, El Salvador tiene como objetivo desarrollar una estrategia y adoptar acciones de mitigación en la ganadería bovina a nivel nacional, consolidando y presentando medidas con metas cuantificadas para la mitigación de GEI en la próxima actualización de la NDC, abarcando los subsectores, categorías, actividades y fuentes específicas (MARN, 2021).

El informe de Climate Watch (2021) estima que, de las emisiones agrícolas del país, el 60% proviene de la ganadería, principalmente de la fermentación entérica y la gestión inadecuada del estiércol, además, prácticas como la quema de pastizales y el cambio de uso del suelo para la expansión ganadera contribuyen adicionalmente a las emisiones de GEI, en particular, el cambio en el uso de la tierra para la ganadería también implica la liberación de carbono almacenado en la vegetación y los suelos, lo que agrava el impacto ambiental del sector.

Sin embargo, se han propuesto diversas iniciativas para mitigar estas emisiones en El Salvador. Por ejemplo, el IICA ha liderado programas de capacitación para ganaderos a nivel nacional en el manejo de cercas vivas, rotación de potreros, y uso de estiércol para la producción de biofertilizantes, como estrategias para reducir las emisiones de metano y óxido nitroso (IICA, 2021).

Además, el IICA, junto con otros actores clave, está proponiendo la implementación y diseño de la NAMA (Acciones de Mitigación Apropriadas a Nivel Nacional) para la ganadería bovina. La NAMA es un programa que complementa los

esfuerzos existentes para desarrollar un sector ganadero más eco-competitivo, mediante la implementación de tecnologías que mejoren la productividad y los ingresos, mejorando así la calidad de vida de las familias involucradas en la cadena de producción. Asimismo, estas medidas reducen emisiones y/o incrementan los sumideros de carbono en las fincas ganaderas (IICA, 2024).

La NAMA para la ganadería bovina en El Salvador tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI asociadas a este sector, promoviendo al mismo tiempo prácticas sostenibles que mejoren la productividad y la resiliencia frente al cambio climático. Este esfuerzo se enmarca en las NDC del país, con el apoyo técnico y financiero de la Unión Europea a través del programa EUROCLIMA y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) (EUROCLIMA, 2022). Como parte del desarrollo de la NAMA, se actualizó la línea base de emisiones del sector ganadero, utilizando datos científicos y de campo que reflejan las emisiones actuales a nivel nacional. Este análisis permitió establecer un diagnóstico detallado de las emisiones, identificar fuentes clave como la fermentación entérica y el manejo del estiércol, y evaluar medidas de mitigación costo-efectivas (AECID, 2022).

El documento oficial de la NAMA ganadera bovina en El Salvador establece una línea base de emisiones que sirve como referencia para evaluar el impacto de las acciones de mitigación. Estas acciones incluyen la implementación de buenas prácticas agrícolas, el manejo eficiente del estiércol, la mejora genética del ganado, y la optimización de la alimentación para reducir la fermentación entérica. Además, se diseñaron planes específicos para la gestión sostenible de 1,240 hectáreas de fincas piloto, beneficiando directamente a más de 1,600 productores en el país (EUROCLIMA, 2022; AECID, 2022). La implementación de esta NAMA representa un avance significativo hacia una ganadería sostenible, contribuyendo a la reducción de emisiones de GEI y al cumplimiento de los compromisos climáticos de El Salvador. Además, estas estrategias buscan mejorar la calidad de vida de los productores, promoviendo la sostenibilidad económica y ambiental del sector ganadero (AECID, 2022).

FUNDAMENTO TEORICO

Tipos de sistemas de producción bovina.

Según el IICA en 2012, la ganadería de subsistencia en El Salvador agrupa a productores con menos de 20 cabezas de ganado, cuya producción oscila entre 2.5 y 3 kg de leche por vaca al día, estos sistemas se caracterizan por un manejo tradicional con baja adopción tecnológica, incluyendo ordeño manual y la presencia del ternero con la vaca durante la mayor parte del día, las razas predominantes son cruces de Brahman con ganado criollo, sin implementación de planes profilácticos, mejoras genéticas ni prácticas de nutrición, la leche producida se destina principalmente al autoconsumo, y los excedentes se comercializan localmente para mejorar la economía familiar. Se estima que este sistema representa el 24% del total del ganado en el país (IICA et al., 2012).

El sistema ganadero predominante en la región tropical es el de doble propósito, utilizado tanto para la producción de leche como de carne, este sistema permite una flexibilidad en la destinación de la leche producida, ya sea para la venta o para la crianza de terneros (Ruan y Rodríguez, 1989). En los sistemas de ganadería doble propósito, que han adoptado cierto grado de tecnología, la producción promedio de leche es de 10 botellas (alrededor de 7.5 litros) por vaca al día. Estos sistemas emplean forrajes provenientes de pastos naturales y de corte, como el ensilaje de maíz o sorgo, y recurren a la monta natural como método de reproducción, en 2011, se estimaba que el 73% del hato nacional pertenecía a este sistema, con una concentración significativa en la región nororiental del país, que alberga la mayor parte de la población bovina (MAG, 2003; IICA et al., 2012; Araujo, 2013).

Por otro lado, la ganadería lechera tecnificada está concentrada en las cuencas lecheras de los departamentos de Sonsonate, La Libertad, La Paz y Usulután. Este sistema se caracteriza por la estabulación completa o semiestabulación de los animales, el uso de pastos mejorados, la inseminación artificial y la cría de animales con alto potencial genético para la producción lechera, las explotaciones de este tipo alcanzan rendimientos diarios de 17 litros por vaca al día (IICA et al., 2012).

Martínez (1999), citado por Torres (2008), distingue tres tipos de sistemas ganaderos en El Salvador: la ganadería de subsistencia, la ganadería extensiva o de doble propósito y la ganadería intensiva o especializada. La ganadería de subsistencia, como su nombre lo indica, tiene como principal objetivo el autoconsumo, con una baja producción de leche (2 litros por vaca al día) y representa aproximadamente el 60% de las explotaciones ganaderas en el país.

El sistema de ganadería extensiva o de doble propósito, que emplea pastoreo y utiliza toros o inseminación artificial, constituye alrededor del 30% del rebaño nacional. A través de este sistema se produce el 60% de la leche fluida del país, con un rendimiento promedio de 3.13 litros de leche por vaca al día (Martínez, 1999, citado por Torres, 2008).

La ganadería intensiva, que representa solo el 3% del hato nacional, emplea tecnologías avanzadas, como la alimentación con raciones totales mezcladas y sistemas de ordeño mecanizado (MAG, 2004; Rivera, 2021). Estos sistemas tienen producciones promedio de entre 15 y 22.5 litros de leche por vaca al día, garantizando altos estándares de calidad en la leche producida (Martínez, 1999; MAG, 2003; Torres, 2008).

Los gases de efecto invernadero en la ganadería.

Óxido nítrico

Las emisiones de GEI en la agricultura provienen principalmente de los suelos cultivados, los desechos animales y la quema de biomasa. En particular, las emisiones de N₂O asociadas a los suelos cultivados están vinculadas al uso excesivo e inadecuado

de fertilizantes nitrogenados (Snyder et al., 2009). Según Erisman et al. (2008), se añaden globalmente un aproximado de 100 Gt de nitrógeno a los suelos cada año. El uso excesivo de fertilizantes incrementa el potencial de pérdida de nitrógeno (N), que se dispersa a través de procesos de transporte hidrológico en forma de amoníaco (NH_3), amonio (NH_4) y nitrato (NO_3) (Galloway et al., 2003). Además, el nitrógeno puede ser emitido a la atmósfera como óxidos de nitrógeno (NO_x) y N_2O (Weathers et al., 2013).

La gestión del estiércol de ganado también contribuye significativamente a la emisión de CH_4 y N_2O . Este estiércol contiene compuestos orgánicos, como carbohidratos y proteínas, que son descompuestos por bacterias. En presencia de oxígeno, las bacterias aeróbicas convierten las estructuras de carbono en CO_2 ; sin embargo, en ausencia de oxígeno, las bacterias anaeróbicas producen CH_4 (Sejian et al., 2015).

En sistemas de pastoreo extensivo, el ganado dispersa su estiércol sobre el terreno, predominando así el proceso de descomposición aeróbica, que genera emisiones de CO_2 . Por otro lado, en sistemas modernos de producción en confinamiento, el estiércol se acumula en tanques o lagunas bajo condiciones anaeróbicas, facilitando la producción de CH_4 . Además, el estiércol de los animales contiene varios compuestos de nitrógeno que las bacterias utilizan en los procesos de nitrificación y desnitrificación, lo que resulta en la formación de N_2O . Otras emisiones, aunque en menor cantidad, provienen del manejo del estiércol, incluyendo amoníaco (NH_3), N_2O y compuestos orgánicos volátiles (Alayon-Gamboa, 2018).

Metano

El CH_4 es el gas de efecto invernadero no CO_2 más abundante en la atmósfera (Motzka et al., 2011), con un potencial de calentamiento global (GWP) aproximadamente 28 veces mayor que el del CO_2 en un horizonte de 100 años (IPCC, 2013). A pesar de su GWP elevado, el CH_4 tiene un tiempo de residencia en la atmósfera de entre 9 y 15 años, mucho menor que el del CO_2 , que puede persistir hasta 200 años.

El metano es emitido tanto por fuentes naturales, como los humedales, como por actividades antropogénicas. Entre estas últimas, destacan las fugas de los sistemas de gas natural y la creciente actividad ganadera (FAOSTAT, 2014). A nivel global, más del 60% de las emisiones de CH_4 provienen de actividades humanas (Denman et al., 2007), siendo la industria, la agricultura y el manejo de residuos las principales fuentes. Dentro del sector agrícola, las emisiones provienen principalmente de la fermentación entérica en rumiantes, el cultivo de arroz, la quema de biomasa y el manejo de desechos animales (Bousquet et al., 2006).

En términos globales, el metano representa aproximadamente el 16% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, mientras que el sector ganadero es responsable de alrededor del 44% de las emisiones globales de metano, especialmente debido a la fermentación entérica en animales rumiantes y el manejo de estiércol (FAO, 2014). Aunque en volumen el CH_4 es menos abundante que el CO_2 , su impacto climático

es considerablemente mayor en el corto plazo debido a su alto GWP. Esto subraya la importancia de mitigar las emisiones de metano en sectores clave como la ganadería, para abordar eficazmente el cambio climático.

Dióxido de carbono.

La huella de carbono de las actividades agrícolas ha sido objeto de múltiples estudios que revelan cómo el CO₂, CH₄ y N₂O tienen impactos significativos sobre el cambio climático. Según Sauerbeck (2001), aunque el CO₂ no es el principal gas emitido en las actividades agrícolas directas, sus efectos indirectos pueden ser profundos, especialmente en lo que respecta a la fertilidad y productividad de los suelos. Un claro ejemplo es la disminución del carbono orgánico en los suelos, que eventualmente regresa a la atmósfera en forma de CO₂, contribuyendo a la pérdida de fertilidad del suelo (Lal, 1999; Lal, 2004). Esta disminución de la materia orgánica del suelo afecta negativamente la capacidad de los suelos para retener agua y nutrientes, impactando de manera crítica la productividad agrícola.

En el contexto del cambio climático, las actividades agrícolas tienen un doble desafío: adaptarse a los nuevos escenarios climáticos y mitigar las emisiones de gases que agravan el problema. Estas emisiones representan una porción significativa de las emisiones totales del sector ganadero, lo que resalta la importancia de implementar prácticas más sostenibles en la producción ganadera y agrícola, tales como la mejora en la gestión de los pastos y el uso eficiente de los fertilizantes.

Huella de carbono

La huella de carbono (HC) es un indicador ampliamente utilizado para medir el impacto ambiental de diversas actividades humanas, en términos de emisiones de GEI relacionadas con el cambio climático. De manera general, se define como la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas directa o indirectamente con las actividades de producción o consumo de bienes y servicios por parte de los seres humanos (Wiedmann y Minx, 2007). No obstante, la definición de la HC puede variar considerablemente según el alcance de las emisiones consideradas, desde enfoques simplificados que incluyen únicamente las emisiones de CO₂, hasta evaluaciones más complejas que consideran el ciclo de vida completo de los productos, incluidos los procesos de producción de materias primas, el transporte, el uso y la disposición final de los productos y sus embalajes (IHOBE, 2009).

La medición de la HC suele expresarse en términos de equivalentes de dióxido de carbono, lo que permite convertir las emisiones de distintos GEI, como el CH₄ y el N₂O, en una medida común. Esto facilita la comparación de las contribuciones de diferentes actividades al calentamiento global. Según la definición del IPCC (2007), la HC de un producto o servicio refleja las emisiones totales de GEI a lo largo de su ciclo de vida, proporcionando un marco integral para la evaluación de su impacto ambiental.

El cálculo de la HC es particularmente importante en el contexto de la lucha contra el cambio climático, ya que permite identificar y cuantificar las principales fuentes de emisiones, facilitando así la implementación de medidas de mitigación. Tal como lo menciona Guerra (2007), calcular la HC de una empresa o proceso es un primer paso fundamental para desarrollar un balance de carbono, que permita establecer objetivos claros de reducción de emisiones.

Uno de los principales retos en la evaluación de la HC es la complejidad asociada a la contabilidad de emisiones a lo largo de las diversas etapas del ciclo de vida de un producto. Las metodologías actuales, como la desarrollada por Carbon Trust, proporcionan un marco estandarizado para la medición de las emisiones, aunque presentan limitaciones en cuanto a la inclusión de todas las fuentes de emisiones indirectas, como los desplazamientos de los empleados o las actividades de terceros en la cadena de suministro (Tamiotti et al., 2009). Asimismo, los consumidores desempeñan un papel importante en la generación de la HC de un producto, ya que sus decisiones de compra pueden influir significativamente en las emisiones asociadas al transporte y al uso de los productos (Managi et al., 2008).

Análisis de ciclo de vida (ACV).

Para evaluar el impacto ambiental de los sistemas de pastoreo, se pueden emplear diversas herramientas (Astier et al., 2008; Vilain, 2008; FAO, 2014), aunque el ACV se destaca como una metodología estandarizada internacionalmente que facilita una evaluación objetiva y comparativa entre estos sistemas (ISO, 2006a, 2006b).

El ACV permite identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados a diferentes fases del manejo de nutrientes, tanto en el ganado como en su disposición ambiental, con el fin de implementar medidas correctivas y optimizar el uso de los recursos (IHOBE, 2009).

Desarrollado en la década de 1970, el ACV analiza el impacto de un producto o proceso desde la obtención de las materias primas hasta su fase final y gestión posterior, proporcionando un análisis cuantitativo de los recursos naturales consumidos, emisiones, residuos y subproductos generados (Sala et al., 2017). Este enfoque ha sido particularmente valioso para evaluar las emisiones de GEI en la producción ganadera, donde surgen a partir de la producción de concentrados, cría de animales, procesamiento y transporte de productos a los mercados (Bakken et al., 2017).

A través del ACV, se puede calcular la huella de carbono de los productos ganaderos, definida como la suma de las emisiones y remociones de GEI relacionadas con la producción, transformación y comercialización de productos como carne y leche. El ACV ha proporcionado grandes avances en la evaluación de impactos ambientales en diferentes sectores, incluidos los productos lácteos. Esto es particularmente relevante para países como El Salvador, donde las problemáticas medioambientales continúan agravándose. La implementación de esta metodología en el sector lácteo

puede ofrecer soluciones prácticas para la reducción de impactos y la sostenibilidad a largo plazo.

Huella de carbono en productos de ganadería:

La HC en productos de ganadería se refiere a la cantidad total de emisiones de GEI asociadas con la producción, procesamiento y distribución de productos derivados de la ganadería, como carne y leche. La medición de la HC es esencial para entender el impacto ambiental de estos productos y desarrollar estrategias para reducir las emisiones.

Estudios han demostrado que la HC de los diferentes productos ganaderos varía considerablemente. Por ejemplo, la HC de la carne de res puede ser de 10 a 30 kg de CO₂eq por kilogramo de carne, mientras que la leche puede tener una huella de alrededor de 1.0 a 1.5 kg de CO₂eq por litro (FAO, 2013; Capper y Cady, 2012). Estos valores dependen de factores como el tipo de sistema de producción, la eficiencia alimentaria y el manejo del estiércol.

Reducir la HC en la producción ganadera es fundamental para mitigar el cambio climático. Existen varias estrategias que se pueden implementar, tales como la mejora de la eficiencia alimentaria, el uso de prácticas de manejo sostenible y la implementación de tecnologías para capturar y reutilizar el metano generado durante la digestión y el manejo del estiércol. Por ejemplo, el uso de dietas mejoradas y la gestión adecuada de los pastizales pueden aumentar la productividad y reducir las emisiones por unidad de producto

La producción de leche contribuye significativamente a las emisiones de GEI a nivel global. Según el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), se estima que las emisiones de CO₂eq por litro de leche varían considerablemente entre países, dependiendo de factores como el tipo de sistema de producción, la eficiencia alimentaria y las prácticas de manejo.

En Estados Unidos, por ejemplo, la HC de la leche es de aproximadamente 0.98 kg de CO₂eq por litro (Capper y Cady, 2012). En comparación, los datos de la FAO indican que, en Nueva Zelanda, la huella de carbono es de alrededor de 1.2 kg de CO₂eq por litro (FAO, 2010). Por otro lado, en países como India, la huella de carbono puede alcanzar 1.5 kg de CO₂eq por litro (Sharma et al., 2019). Estos promedios reflejan la variabilidad en la producción láctea, donde los métodos de manejo y la dieta del ganado juegan un papel crucial.

V. METODOLOGIA

Ubicación y descripción del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en catorce unidades ganaderas, de las cuales cuatro correspondían a sistemas especializados y diez a sistemas de doble propósito. Estas unidades productivas fueron seleccionadas estratégicamente para garantizar una representación significativa de las diversas regiones ganaderas del país, considerando factores como tipo de sistema productivo, tamaño de la explotación y condiciones climáticas predominantes. La distribución geográfica de estas explotaciones se presenta en la Figura 1, la cual ilustra su ubicación en las principales áreas de producción ganadera de El Salvador.

La selección de las unidades productivas se realizó mediante un muestreo intencional, priorizando aquellas que representaran las características típicas de los sistemas ganaderos especializados y de doble propósito en el país. Además, se procuró incluir explotaciones de diferentes tamaños y niveles tecnológicos para reflejar la heterogeneidad del sector. Para cada ganadería seleccionada, se llevó a cabo un levantamiento de información exhaustivo utilizando instrumentos estandarizados, tales como cuestionarios estructurados, entrevistas semiestructuradas y guías de observación directa. Las visitas a campo se realizaron durante un período de seis meses, permitiendo documentar tanto las prácticas estacionales como las permanentes.

Los datos recopilados abarcaron tres dimensiones principales:

1. **Prácticas de manejo:** Incluyen el uso de recursos forrajeros, estrategias de alimentación, manejo del agua, y sanidad animal.
2. **Producción:** Registros de producción de leche, carne, y otros productos, así como indicadores de productividad como rendimiento por animal y eficiencia del sistema.
3. **Sostenibilidad:** Identificación de prácticas sostenibles, uso de sistemas silvopastoriles, y estimaciones preliminares de emisiones de gases de efecto invernadero.



Figura 1: Distribución de las fincas que forman parte del estudio (elaboración propia).

Tabla 1: Características de las fincas en estudio (elaboración propia).

Nombre finca	Ubicación	Sistema	Vacas en Producción	Tamaño del hato	área total (hectáreas)	Manejo	Alimentación
Hacienda el paraíso	Metapán, Santa Ana	Doble propósito	34	110	32	Manejo en pastoreo y semi pastoreo, No se usan programas de registros.	Alimentación con pastos y forrajes, concentrado y residuos de cosecha
Rancho Escondido	San Miguel		39	102	37		
Rancho El Salto	El Paraíso, Chalatenango		50	153	21		
Ganadería Vega	Texistepeque, Santa Ana		71	153	40		
Valle Verde	San Miguel, Chalatenango,		28	125	45.5		
Totalco	Chalatenango, San Idelfonso,		64	160	140		
Galero	San Vicente, Caluco,		80	400	210		
Santa Catarina	Sonsonate, San Idelfonso,		60	200	126		
Santos Ruiz	San Vicente, Miraflores, San Miguel		45	170	60		
Ganadería El Infinito	Miguel		40	122	44		
Establo San Juan	San José la Majada, Sonsonate	Especializado	33	87	31.5	Manejo estabulado con control de estrés calórico	Alimentación basada en pastos y forrajes frescos, ensilajes, concentrados.
Velesa	Caluco, Sonsonate		211	471	147		
Hacienda San Antonio	Atiquizaya, Ahuachapán		125	320	43		
Establo Jerusalén	Atiquizaya, Ahuachapán		140	243	43.4		

Estandarización de la unidad funcional

La proteína y grasa de la leche cambia entre fincas por la raza y el sistema de alimentación. En ese sentido, la Federación Internacional de Lácteos (IDF, 2015) recomienda la estandarización de la leche por el 4% de grasa y el 3.3% de proteína verdadera por medio de la ecuación siguiente:

$$PLCGP \text{ (kg/día)} = \text{Producción (kg/día)} \times [0.1226 \times \text{Grasa\%} + 0.0776 \times \text{Proteína verdadera\%} + 0.2534]$$

PLCGP: producción de leche corregida por grasa y proteína.

Definición del límite del sistema y estimación de emisiones

En las fincas seleccionadas, se estimaron las emisiones de GEI utilizando la metodología de ACV centrada en la HC, como un indicador del impacto ambiental de la actividad ganadera (Thomassen et al., 2008). Para la estimación de la HC, los GEI se estandarizaron a dióxido de carbono equivalente, de acuerdo con el PCG a 100 años. Los factores de conversión utilizados fueron: 28 para el CH₄, 265 para el N₂O y 1 para el CO₂ (IPCC, 2014).

El límite del sistema considerado abarcó desde la "cuna" hasta la "puerta de la finca". En este contexto, las emisiones primarias incluyeron todas aquellas generadas dentro de la finca, mientras que las emisiones secundarias correspondieron a las producidas fuera de la finca, pero relacionadas con insumos utilizados en la misma.

Las emisiones primarias incluyeron el metano procedente de la fermentación entérica y la gestión del estiércol en pastos, el óxido nitroso generado tanto de manera directa (por el uso de fertilizantes sintéticos y estiércol) como indirecta (derivado del amonio), y el dióxido de carbono asociado al consumo de electricidad, diésel y otros combustibles utilizados en la finca.

En cuanto a las emisiones secundarias, se consideraron aquellas vinculadas a la producción y transporte de insumos externos a la finca, tales como alimentos para el ganado, fertilizantes y enmiendas para el suelo. Estos elementos fueron integrados en la evaluación para obtener una visión más completa del impacto ambiental de la actividad ganadera.

Metodología de campo

El principal paso de este estudio consistió en la recolección de datos relacionados con la producción lechera, así como en la cuantificación de las entradas y salidas de materia y energía correspondientes al ciclo de vida del sistema productivo. Esta fase se extendió durante seis meses y abarcó la obtención de datos mediante visitas a catorce ganaderías, divididas en cuatro fincas especializadas y diez de doble propósito. Durante las visitas, se recopiló información tanto cualitativa como cuantitativa utilizando un instrumento diseñado para este fin. Dicho instrumento se estructuró en cuatro secciones principales: información general, composición y manejo del ganado, manejo de praderas, producción y reproducción, y factores ambientales. Los detalles de la información recolectada se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de la información recolectada en la fase de campo.

	Datos generales
	Características de la finca
Información general	Instalaciones agropecuarias
	Disponibilidad de maquinaria y equipos
	Combustibles y energía
	Manejo de la información ganadera
	Estructura del hato
Composición y manejo de la ganadería	Principales razas o cruces en su finca
	Alimentación complementaria - suministro de sales
	Alimentación complementaria - suministro de suplementos
	Insumos para salud animal
	Rotación y división de potreros y control de malezas
Manejo de potreros	Uso del suelo y cambio de uso del suelo
	Fertilización de potreros
	Aplicación de enmiendas, renovación de potreros, aplicación de agroquímicos

	Sistemas de manejo de estiércol
Producción y reproducción	Producción de leche
	Seguimiento de pesaje a los animales
	Producción de carne
	Producción de madera (cuando se tengan sistemas silvopastoriles o especies forestales asociadas a la producción ganadera)
	Sistema de reproducción y prácticas reproductivas
Ambiental	Manejo del bosque
	Especies de árboles y arbustos asociados a potreros por hectárea, incluya las especies en bancos de forraje
	Disponibilidad del recurso hídrico
	Manejo del recurso hídrico
	Qué manejo se les da a los residuos sólidos (empaques de fertilizantes y productos químicos, veterinarios,)

Análisis de datos

La información recopilada a través del instrumento fue analizada utilizando el software SimaPro, en colaboración con el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Colombia. Las categorías de impacto, como la huella de carbono (HC), se estimaron siguiendo las directrices del IPCC de 2019 a 2006, utilizando bases de datos y factores de emisión estimados a nivel local.

SimaPro es un software analítico diseñado para medir la huella ambiental de productos y servicios de manera objetiva. Esta herramienta, ampliamente utilizada en el ámbito académico, se fundamenta en principios científicos que garantizan un alto nivel de transparencia y rigor en el desarrollo de investigaciones. El software se basa en ecuaciones previamente establecidas, específicamente en las ecuaciones presentadas en el capítulo 10 del IPCC (2006), lo que permite una evaluación precisa de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales.

VI. RESULTADOS

Características generales de las fincas en estudio.

Las ganaderías incluidas en este estudio como se muestra en la Tabla 3, tienen un área promedio de 72.8 hectáreas, con una carga animal de cuatro unidades animales por hectárea (UA ha⁻¹). En promedio, se contabilizan 112 vacas en producción, lo que representa el 70.7% del hato total. La producción media es de 14.2 kg de leche por vaca por día, lo que se traduce en una producción anual promedio de 5,437 kg por vaca. La finca con la mayor producción reporta un máximo de 9,855 kg de leche por vaca al año, lo que indica un promedio de 27 kg por vaca por día.

La alimentación en los sistemas ganaderos evaluados se basa principalmente en pastos y concentrados (alimento balanceado), mientras que las pasturas son fertilizadas con fórmulas nitrogenadas, aplicándose en diferentes proporciones dependiendo del sistema productivo. En los sistemas de doble propósito, la dieta incluye una combinación de pastos, forrajes frescos, residuos de cosecha y concentrados, adaptándose a la disponibilidad de recursos locales y buscando minimizar los costos de alimentación. Por otro lado, los sistemas especializados emplean una alimentación más estructurada y balanceada, basada en pastos y forrajes frescos, ensilajes y concentrados, con el objetivo de maximizar la producción diaria por vaca. Este manejo diferenciado de la alimentación y fertilización refleja las estrategias adoptadas por cada sistema para equilibrar la eficiencia productiva y la sostenibilidad económica, considerando las condiciones específicas de cada unidad ganadera.

Tabla 3: Características generales de las ganaderías en estudio.

	Promedio	Ganaderías		
		Porcentaje del hato	Min	Max
Área, ha	72.8		21	210
Carga animal, UA ha ⁻¹	4.0		1.1	17.8
Estructura del hato, n (% del hato)				
Vacas	112	70.7	38	241
Terneras (0–1 año)	42	8.9	17	119
Terneros (0–1 año)	2	0.6	0	10
hembras (1–2 años)	24	7.7	0	108
machos (1–2 años)	4	2.9	0	30
Novillas (2–3 años)	15	7	0	100
Toros	2	2.3	0	6
Producción de leche, kg FPCM ^a vaca ⁻¹ año ⁻¹	5437		3102	9855

^a FPCM: leche corregida por grasa y proteína

^b UA: unidad animal (1 UA es 1 vaca, o 3,3 terneras y machos de menos de 1 año, o 1,7 terneras y machos de 1 a 2 años, o 1,3 novillas de 2 a 3 años, o 1,3 novillos de 1 a 2 años, o 0,8 toros)

Características individuales, parámetros productivos y reproductivos de los sistemas productivos.

Los sistemas de producción de lechería especializada y de doble propósito presentan diferencias significativas en términos de producción, ganancia de peso y uso de fertilizantes, en los sistemas de lechería especializada predominan las razas puras o el encaste lechero (*Bos taurus*), mientras que en los sistemas de doble propósito se utilizan principalmente cruces de *Bos indicus* y *Bos taurus*. Esta diferencia en la genética animal está reflejada en la Tabla 4.

Tabla 4: Características de las ganaderías en estudio.

	Doble propósito	Especializada
Vacas en producción	511	509
Relación forraje, concentrado (F:C)	61.6	42.9
Producción (L)	11.8	20.3
Edad primer parto (meses)	34.2	23.8
Intervalo entre partos (meses)	15.4	15
Días abiertos	190.5	180
Ganancia de peso (g)	447.4	527
Uso de fertilizante Kg/N/ha/año	84.3	110.5

Fuentes de emisión de GEI en los sistemas de producción.

A nivel de todas las fincas, las principales fuentes de GEI corresponden a la fermentación entérica y a los insumos externos a la finca, con un 42.5% de las emisiones atribuidas a los sistemas de doble propósito y un 56.5% en la lechería especializada (Bakkes et al., 2018; FAO, 2014). En la comparación entre los sistemas de producción, se observaron diferencias significativas en las fuentes de emisión de insumos externos, como la fabricación de concentrados, la cual resulta ser mayor en las ganaderías de doble propósito. A pesar de utilizar menos concentrado en la alimentación del hato, estas ganaderías son menos eficientes en convertirlo en leche (Rojas et al., 2017).

Por otro lado, otras variables externas (*), como la fabricación de fertilizantes y variables internas, como la quema de combustibles, mostraron un comportamiento similar en ambos sistemas de producción. Sin embargo, se destacó una diferencia notable en las emisiones de N₂O, que están estrechamente vinculadas a la gestión del estiércol (Figura 2, Figura 3) (Smith et al., 2007; IPCC, 2014).

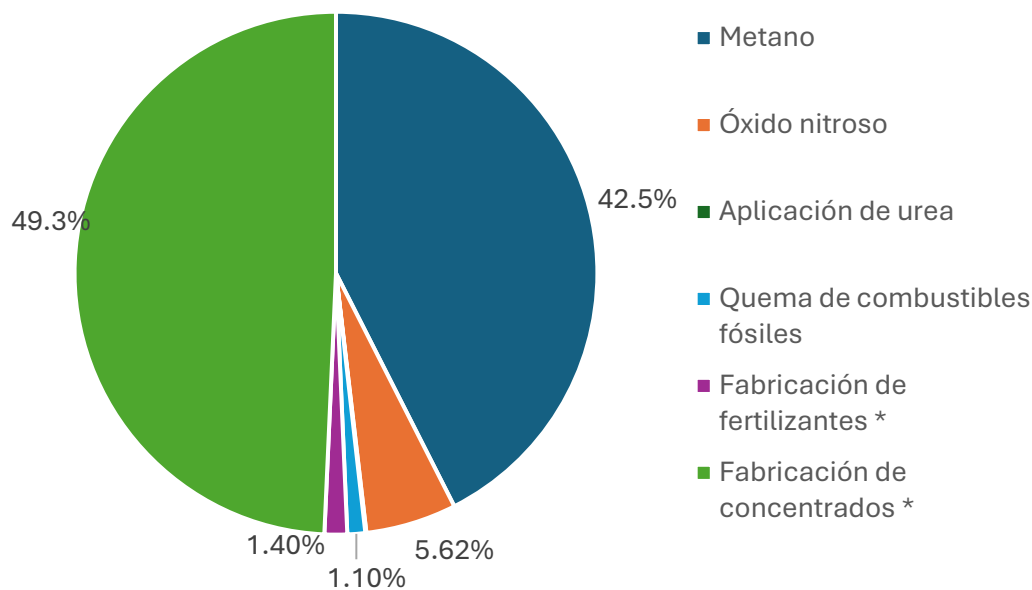


Figura 2: Composición de la huella de carbono de los sistemas productivos doble propósito.

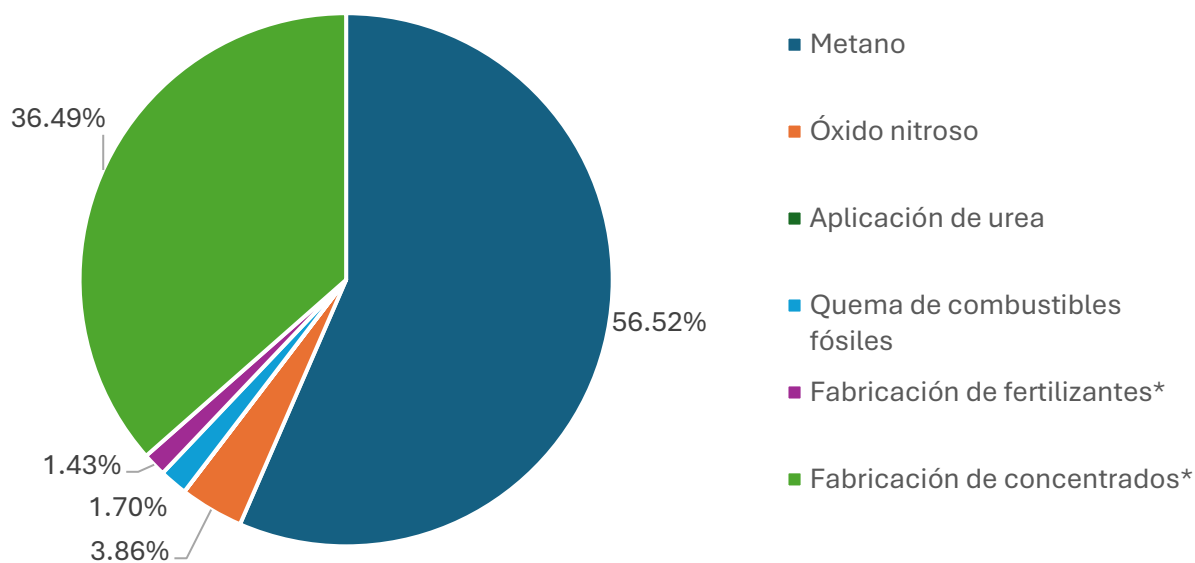


Figura 3: Composición de la huella de carbono de los sistemas productivos especializados.

Huella de carbono en los sistemas productivos

En lo que respecta a la huella de carbono de la producción lechera, el valor promedio estimado de todas las fincas analizadas fue de 2.5 kg CO₂eq/kg de FPCM para los sistemas de doble propósito y 1.4 kg CO₂eq/kg de FPCM para la lechería especializada, como se ilustra en la Figura 4 (Baldini et al., 2018; Pacheco et al., 2020).

Estos resultados indican una diferencia significativa en las emisiones GEI entre los dos sistemas, lo cual se atribuye en gran medida a las diferencias en el manejo de insumos y prácticas de alimentación.

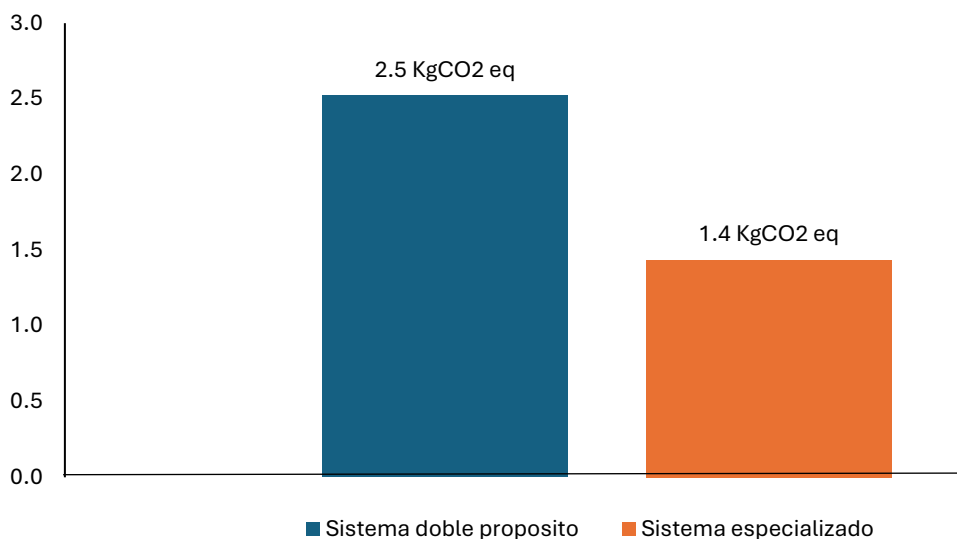


Figura 4: Huella de carbono por sistema productivo.

En el análisis de las emisiones de GEI entre los distintos sistemas productivos, se observa que, aunque el sistema de doble propósito incluye un mayor número de fincas, el total de vacas en ordeño es comparable en ambos sistemas, alcanzando un promedio de 510 vacas en producción (± 1) en cada caso.

Al considerar un período de lactancia promedio de 305 días, las emisiones de GEI y la producción de leche por animal se evaluaron en los sistemas especializados y de doble propósito. Los resultados muestran que los sistemas especializados generan una producción promedio de 6,191.5 litros de leche durante este período, mientras que los sistemas de doble propósito alcanzan 3,599.0 litros.

En términos de emisiones totales de GEI, los sistemas especializados producen 8,668.1 kg de CO₂eq por animal durante la lactancia, en comparación con 8,997.5 kg de CO₂eq en los sistemas de doble propósito. Esto indica que, aunque las emisiones totales de ambos sistemas son similares, la eficiencia en la producción de leche de los sistemas especializados resulta en una huella de carbono significativamente menor por litro producido (1.4 kg CO₂eq/L) frente a los sistemas de doble propósito (2.5 kg CO₂eq/L).

La menor eficiencia de conversión de alimento en leche en los sistemas de doble propósito contribuye a sus mayores emisiones por litro, a pesar de su menor uso de concentrados. Por el contrario, los sistemas especializados, con mayores requerimientos de insumos, logran compensar estas emisiones a través de una producción diaria más elevada.

Estos resultados enfatizan la importancia de implementar estrategias que mejoren la eficiencia productiva y reduzcan las emisiones en ambos sistemas, especialmente durante el período de lactancia, donde se concentra gran parte de la producción y las emisiones anuales. Entre estas estrategias destacan el manejo eficiente del estiércol, la mejora genética del hato y la optimización de las dietas para reducir la fermentación entérica.

VII. DISCUSIÓN

Características de los sistemas productivos

Un manejo adecuado de la estructura del hato en las fincas ganaderas puede resultar en que entre el 75% y el 80% de las vacas totales estén en producción (Castro Calderón et al., 2021). Esta alta proporción de vacas en ordeño influye significativamente en la disminución de las emisiones de GEI. En el presente estudio, se observó que aproximadamente el 70% de las vacas en las fincas se encontraban en producción, lo que sugiere que existe un potencial de optimización. Implementar estrategias de manejo que incrementen el número de vacas en ordeño y ajusten la estructura del hato es fundamental para mejorar la eficiencia del sistema y mitigar las emisiones asociadas a la producción lechera.

Variables como producción de leche, ganancia de peso y uso de fertilizantes son más elevadas en los sistemas de lechería especializada, lo que se atribuye al mayor uso de insumos, como concentrados y fertilizantes nitrogenados (Bertoni, 2017; FAO, 2019). Es relevante señalar que las fincas especializadas en la producción de leche están localizadas en cuencas lecheras específicas en el occidente del país, una región que se beneficia de la fertilidad de sus suelos y de la disponibilidad de agua (González & Rodríguez, 2016). En contraste, las fincas de doble propósito están distribuidas de manera más amplia en todo el territorio nacional.

Según Cárdenas et al. (2019), un hato con una alta proporción de animales jóvenes emite más metano a través de las excretas en comparación con un hato que tiene una mayor proporción de vacas multíparas. Ajustar la estructura del hato no solo puede contribuir a una mayor eficiencia económica, sino también a una reducción de las emisiones de metano a nivel de finca y por unidad de producto (Hristov et al., 2013).

Una estructura óptima del hato debe reflejar mejoras en los indicadores socioeconómicos mientras minimiza el impacto ambiental. Esto implica una reducción en las emisiones de GEI, así como en la acidificación, eutrofización y uso de energía. El manejo del hato es, por lo tanto, una herramienta crucial dentro del enfoque de la intensificación sostenible de la producción ganadera, con el potencial de reducir las emisiones de GEI a nivel global y por unidad de producto.

A nivel mundial, existe una brecha considerable entre la producción actual y el potencial de los sistemas de producción bovina, algo que es particularmente obvio en El Salvador. Esta situación representa una oportunidad para innovar en las fincas y

satisfacer la demanda del mercado con productos de mejor calidad, sin necesidad de aumentar el número de animales o la superficie dedicada a la ganadería (Ledgard et al., 2020; Naranjo et al., 2020; Bava et al., 2014).

Por otro lado, los sistemas de producción ganadera, además de implementar acciones para reducir las emisiones de GEI, pueden compensar sus emisiones mediante la remoción de carbono a través de una gestión adecuada del suelo y la cobertura arbórea. Por ejemplo, los sistemas silvopastoriles y los bosques ofrecen oportunidades significativas en este sentido (Stanley et al., 2018; Cárdenas et al., 2019). El potencial de remoción de carbono variará en función de la zona agroecológica, la diversidad y densidad de árboles en los sistemas silvopastoriles, el área de bosques en la finca y las prácticas de manejo silvicultural adoptadas.

Fuentes de emisión de GEI en los sistemas de producción.

En el caso del sistema de producción doble propósito, las emisiones externas relacionadas con la fabricación de concentrados representan la mayor parte de la huella de carbono, alcanzando un 49.3% del total. A pesar de que este sistema tiene una menor dependencia del uso de concentrados (con una relación de forraje a concentrado de 61% a 39%), requiere consumir más concentrado para producir un kilogramo de leche. Como resultado, la cantidad de metano producido por fermentación entérica se limita al 42.5%. Según Montenegro-Ballesteros et al., (2020), a medida que se incrementa el consumo de materia seca, también lo hace la emisión diaria de metano, aunque se reduce la emisión por unidad de materia seca consumida. Esto sugiere que, aunque las vacas en el sistema doble propósito tienen la capacidad de consumir más alimento, no lo están haciendo adecuadamente debido a la escasez de forraje.

En contraste, en los sistemas de lechería especializada, las emisiones de metano por fermentación entérica ascienden al 56.5%, mientras que las emisiones externas derivadas de la fabricación de concentrados son del 36.5%. A pesar de que este sistema emplea alimentos balanceados en un 57.1% (superior al 42.9% de forrajes), su uso es más eficiente, lo que permite una mayor emisión de metano, pero, a su vez, una menor huella de carbono, en línea con los hallazgos de Montenegro-Ballesteros et al., (2020). Esto se debe a que las emisiones se diluyen en una cantidad significativamente mayor de leche producida dentro de la finca, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto final y reflejando una eficiencia productiva que minimiza el impacto ambiental del sistema especializado.

La principal fuente de emisiones de GEI en las fincas productoras de leche es la fermentación entérica, la cual tiene un impacto significativo en la huella de carbono, en este estudio las emisiones de metano oscilan entre el 42.5% para sistemas doble propósito y 56.5% para lechería especializada. Varios estudios han demostrado que las emisiones de metano entérico representan entre el 37% y el 68% de la huella de carbono de la leche (O'Brien et al., 2015; Ledgard et al., 2020). Un metaanálisis que abarcó diferentes investigaciones en América Latina y el Caribe identificó varias estrategias

para reducir el metano entérico, al tiempo que se mejoraba la producción de leche o la ganancia de peso vivo, incluyendo la composición genética, el pastoreo rotacional y el incremento en la concentración de proteína en la dieta (de Souza Congio et al., 2021).

La proteína en la dieta del ganado ayuda a reducir la producción de metano en el rumen a través de varios procesos fisiológicos que modifican la fermentación y la producción de gases en el sistema digestivo, uno de los mecanismos principales es la mejora en la eficiencia de la fermentación ruminal, al incrementar el nivel de proteína en la dieta, se promueve la actividad de ciertos microorganismos que fermentan la materia orgánica de forma más eficiente, lo que disminuye la producción de hidrógeno, un precursor clave en la formación de metano. Las arqueas metanógenas, responsables de producir metano en el rumen, dependen del hidrógeno para sintetizar este gas. Por lo tanto, al reducir la disponibilidad de hidrógeno, disminuye también la producción de metano (Moss et al., 2000; Hristov et al., 2018).

Muñoz et al. (2015) destacan que la suplementación con granos es una estrategia clave para reducir las emisiones de CH₄ por unidad de consumo. Esto también tiene un impacto positivo en la eficiencia de emisión y en la producción de leche por vaca. Hassán (2011) realizó un estudio en Panamá que demostró que la mayor parte de las emisiones se concentra en el metano por fermentación entérica, con cifras del 90% para fincas de manejo tradicional y del 80% para fincas de manejo mejorado. Estos resultados son coherentes con los hallazgos de la presente investigación, donde las fincas del sistema de lechería especializada, al recibir un manejo adecuado orientado a aumentar la producción, muestran una disminución en las emisiones por fermentación entérica.

En sistemas de vacas lecheras, la energía perdida a través del metano entérico se traduce en una pérdida anual de días de pastoreo, estimada entre 25 y 40 días (Eckard et al., 2010). Estos hallazgos sugieren que es fundamental guiar a los ganaderos hacia cambios que no solo generen mayores ingresos, sino que también reduzcan las emisiones. Diversas estrategias han sido evaluadas para disminuir las emisiones de metano entérico, abarcando desde la manipulación de la microflora ruminal hasta el uso de aditivos no nutricionales y compuestos secundarios de especies forrajeras. La mayoría de los investigadores coinciden en que la forma más efectiva de reducir las emisiones es aumentar la eficiencia de los sistemas, lo que permite diluir la huella de carbono en la producción lechera (Villanueva, 2022).

La fabricación de concentrados es una práctica común en la producción lechera y tiene un impacto significativo en la huella de carbono de los sistemas de producción. Los concentrados, que suelen estar compuestos por granos, subproductos agrícolas y otros ingredientes, se utilizan para complementar la dieta de los animales, proporcionando nutrientes esenciales que pueden no estar disponibles en cantidades suficientes a través de forrajes y pasturas. Esta necesidad surge de la búsqueda de maximizar la producción de leche y carne, ya que los concentrados ayudan a satisfacer los requerimientos nutricionales específicos del ganado, promoviendo una mayor eficiencia en la producción (Murray et al., 2015).

La relación entre el uso de concentrados y las emisiones de metano es compleja. Si bien los concentrados pueden ayudar a aumentar la producción de leche y mejorar la eficiencia alimentaria, su fabricación y uso pueden generar emisiones significativas de GEI. La producción de concentrados a menudo implica el uso de fertilizantes y combustibles fósiles, lo que contribuye a la huella de carbono general (Hristov et al., 2013).

La fermentación de los concentrados en el rumen produce principalmente ácidos grasos volátiles como acetato, propionato y butirato, pero también genera hidrógeno como subproducto, aunque una dieta rica en concentrados tiende a aumentar la producción de propionato (un AGV que utiliza hidrógeno), puede generar un ambiente que favorezca el crecimiento de microorganismos productores de metano, especialmente cuando el balance entre la producción de AGV y de hidrógeno no es óptimo. Esto puede llevar a un aumento en la actividad de las arqueas metanógenas y, por ende, una mayor emisión de metano (Moss et al., 2000; Hristov et al., 2018). Sin embargo, algunos estudios sugieren que un manejo adecuado de la dieta, con un enfoque en la calidad de los ingredientes y la formulación adecuada de raciones, puede ayudar a mitigar estas emisiones. Por ejemplo, la inclusión de ingredientes que favorecen la fermentación más eficiente puede disminuir las emisiones por unidad de leche producida (O'Brien et al., 2015; Ledgard et al., 2020).

Huella de carbono en sistemas productivos doble propósito y lechería especializada.

La huella de carbono de la leche varía significativamente entre sistemas de producción. En esta investigación, se encontraron valores de huella de carbono de 1.4 kg CO₂eq/kg FPCM para sistemas de lechería especializado y 2.5 kg CO₂eq/kg FPCM para sistemas doble propósito. Estas diferencias están estrechamente relacionadas con la productividad animal y la calidad de la dieta. En El Salvador, los sistemas de lechería especializada suelen depender de pastos de mayor calidad y un mayor consumo de concentrado, lo que permite una mayor eficiencia productiva y una reducción en la huella de carbono (Gaitán et al., 2016). Esto refleja una tendencia observada en sistemas especializados de otros países de la región.

Por ejemplo, Gaitán et al. (2016) encontraron que, en sistemas de mercado convencional en Nicaragua, las emisiones totales de GEI, que incluyen la digestión animal y la producción de insumos, son de 2.4 kg CO₂eq FPCM. En cambio, en sistemas doble propósito como los de Colombia, González et al. (2020), reportaron una huella de carbono de 3.3 kg CO₂eq/kg FPCM, cifra superior a la encontrada en este estudio. Esto se debe en parte a la mayor carga animal y a las áreas de pastoreo extensivo, prácticas comunes en los sistemas de doble propósito en Centroamérica, incluidas algunas regiones de El Salvador, donde los forrajes suelen tener menor calidad.

Asimismo, Ledgard et al. (2020), en Nueva Zelanda, observaron que la huella de carbono promedio de la leche puede reducirse en años de buena producción gracias

al manejo eficiente de pasturas y a la suplementación adecuada. Esto refuerza la importancia de la calidad de los forrajes y la dieta, destacando que, en países como El Salvador, la adopción de prácticas de fertilización de pastos y la selección de ganado de alta producción podrían mejorar la sostenibilidad y reducir las emisiones de GEI en los sistemas especializados. Esto demuestra que una menor calidad de la dieta, como la observada en 2010/11, se traduce en mayores emisiones. En contraposición, un manejo adecuado, que incluye planes de fertilización de pastos y selección de ganado de alta producción, puede conducir a menores emisiones de GEI.

O'Brien et al. (2015) subrayan que el aumento en la duración de la temporada de pastoreo y la mejora en la producción anual de leche por hectárea y por vaca son prácticas agrícolas clave para mitigar las emisiones de GEI. Sin embargo, en sistemas donde el aumento en la producción de leche se logra con un mayor uso de concentrados, como sucede en la lechería especializada de El Salvador, es importante evaluar el impacto de las emisiones fuera de la granja, pues puede haber un efecto compensatorio en la sostenibilidad del sistema. Gerber et al. (2011) también respaldan esta conclusión al señalar que, si bien las emisiones de GEI totales aumentan con la productividad, éstas disminuyen por kilogramo de leche cuando se incrementa la eficiencia animal, especialmente cuando la producción supera los 4,000 kg por lactancia, logrando así huellas de carbono más bajas y sostenibles.

VIII. CONCLUSIONES

Se encontró que la huella de carbono para la leche en sistemas de lechería especializada (1.4 kg CO₂eq/kg FPCM) es significativamente menor que en sistemas de doble propósito (2.5 kg CO₂eq/kg FPCM). Esta diferencia puede atribuirse a la mejor calidad de la dieta y a la mayor productividad animal en sistemas especializados, lo que sugiere que optimizar la eficiencia de producción es una estrategia clave para reducir las emisiones de GEI por unidad de producto. Al centrarse en prácticas que mejoran la productividad sin aumentar significativamente los insumos, los sistemas especializados logran una menor huella de carbono por litro de leche producido.

La calidad de la dieta es un factor clave en la reducción de emisiones de GEI, pero hay varios elementos que influyen en las diferencias de emisiones entre los sistemas de producción. En los sistemas de lechería especializada, el uso de forrajes de alta calidad y una mayor proporción de concentrados en la dieta contribuyen a una menor emisión por litro de leche producido, al optimizar la eficiencia alimenticia y reducir las emisiones por unidad de producto. Sin embargo, esta ventaja también implica un mayor uso de insumos como concentrados y suplementos lo cual puede aumentar los costos y la dependencia de insumos externos.

En el contexto actual de El Salvador, donde los pequeños y medianos productores enfrentan limitaciones económicas, la elección del sistema de producción debe equilibrar la sostenibilidad ambiental con la viabilidad económica. Los resultados del estudio muestran que las lecherías especializadas presentan una menor huella de carbono (1.4 kg CO₂eq/L frente a 2.5 kg en sistemas de doble propósito) debido a su

mayor eficiencia en la producción de leche. Sin embargo, estos sistemas suelen requerir mayores inversiones en insumos como concentrados y tecnología para manejo de animales, lo que incrementa los costos de producción y dificulta su adopción generalizada. Por otro lado, los sistemas de doble propósito, a pesar de generar mayores emisiones, tienen la ventaja de diversificar ingresos al combinar la producción de leche y carne, lo que puede ser más adaptable a las condiciones económicas y culturales del productor salvadoreño promedio. Considerando estos factores, el sistema más adecuado para promover en El Salvador es un modelo híbrido que incorpore prácticas de las lecherías especializadas, como la mejora en la genética del hato, manejo eficiente del estiércol, y planes de fertilización ajustados, dentro del marco de los sistemas de doble propósito. Este enfoque permitiría incrementar la productividad y reducir las emisiones sin demandar inversiones inalcanzables para los productores.

IX. RECOMENDACIONES

Que los productores de leche implementen dietas de alta calidad y balanceadas. Esto no solo puede mejorar la producción de leche, sino también reducir las emisiones por unidad de producto.

Optimizar la estructura del hato, asegurando que un mayor porcentaje de las vacas esté en producción. Esto puede lograrse mediante un manejo reproductivo adecuado y la reducción del número de animales improductivos o poco rentables.

Adopción de prácticas de manejo sostenible, como la integración de sistemas silvopastoriles, puede ser beneficioso. Estas prácticas no solo ayudan a mitigar las emisiones de GEI, sino que también pueden mejorar la salud del suelo y aumentar la biodiversidad.

Establecer sistemas de monitoreo continuo de las emisiones de GEI en las fincas lecheras. Esto permitirá a los productores identificar áreas de mejora y ajustar sus prácticas para lograr una producción más sostenible.

Promover programas de capacitación para los productores de leche en relación con la gestión de la alimentación, el manejo reproductivo y sanitario del hato y la implementación de tecnologías sostenibles es esencial.

Fomentar la investigación continua en el área de la producción lechera, enfocándose en el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas que reduzcan la huella de carbono. Las alianzas estratégicas entre universidades, centros de investigación, organismos internacionales y el sector privado puede impulsar la innovación y mejorar la sostenibilidad en la producción láctea.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alayón-Gamboa, J. A. (2018). Estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en la ganadería. *Agro Productividad*, 11(2).

Araujo, G. A. (2013). Manejo y alimentación de la vaca lechera bajo el sistema de doble propósito. El Salvador. 23 p.

Astier, M., Galván-Miyoshi, Y., & Maserà, O. R. (2008). Evaluación de sustentabilidad: un enfoque dinámico. *Imag Impressions*.

Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería para las Américas*, 2, 32-35.

Bakken, A. K., Daugstad, K., Johansen, A., Hjelkrem, A.-G. R., Fystro, G., Strømman, A. H., & Korsæth, A. (2017). Environmental impacts along intensity gradients in Norwegian dairy production as evaluated by life cycle assessments. *Agricultural Systems*, 158, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.09.001>

Baldini, L., et al. (2018). Carbon footprint of milk production: A study from different dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 101(9), 8203-8213.

Bava, L., et al. (2014). Sustainable dairy production: Issues and opportunities. *Livestock Science*, 170, 1-10.

Bertoni, G. (2017). *Lechería: sistemas y tecnologías para mejorar la producción*. Editorial Universitaria.

Bousquet, P., et al. (2006). Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*.

Calero, D., Duran, C., & Franco, L. (2006). Manejo y utilización de forrajes tropicales multipropósito. Proyecto: Evaluación de tecnologías por métodos participativos para la implementación de sistemas ganaderos sostenibles en el norte del departamento del Valle del Cauca. Proyectos Forrajes IPRA. 30 p.

Capper, J. L., Cady, R. A., & Bauman, D. E. (2009). The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 87(6), 2160-2167. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>

Cárdenas, L. M., et al. (2019). Methane emissions from young animal excreta in dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 5533-5540.

Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59-67.

Castro Calderón, D. C., et al. (2021). Impact of herd structure on dairy farm productivity. *Agricultural Systems*, 182, 102845.

- Charlon, V., Tieri, M., Frank, F., & Engler, P. (2016). La huella del agua en la producción primaria de leche en Argentina. *Información técnica de producción animal*, 10-15.
- Chessa, A. (2007). Calidad del Sorgo como alimento animal. *Marca Liquida Agropecuaria*, 17(169), 65-68.
- Climate Watch. (2021). Emisiones agrícolas en El Salvador. Consultado en climatewatch.org.
- Dávila, C., Will, J., Kingsley, K., Skerman, P., & Tyler, B. (1990). Uso de pastos de corte en los sistemas intensivos. Consultado el 24 de marzo de 2017. Disponible en http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.avpa.ula.ve/docuPDFs/libros_online/manual-ganaderia/seccion3/articulo9-s3.pdf.
- De Souza Congio, G. F., Bannink, A., & Mayorga Mogollón, O. L. (2021). Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 312, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>.
- Denman, K. L., et al. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. IPCC.
- Eckard, R. J., Grainger, C., & de Klein, C. A. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*, 130, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>.
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1, 636-639.
- FAO. (2009). *High Level Expert Forum - How to Feed the World in 2050*. Office of the Director, Agricultural Development Economics Division, Economic and Social Development Department, FAO, Rome, Italy.
- FAO. (2010). *Greenhouse gas emissions from the dairy sector: A life cycle assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2013). *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2014). *Estimating greenhouse gas emissions from livestock*. FAO Publications.
- FAO. (2014). *Mitigating the Environmental Impact of Livestock Production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2016). *The state of food and agriculture: Climate change, agriculture, and food security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/sofa/2016/en/>.
- FAOSTAT. (2014). *The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database*. <http://faostat3.fao.org/home/E>. (Consulta: junio 10, 2015).

Ferraz, J. B. S., & Felício, P. E. (2010). Production systems—an example from Brazil. *Meat Science*, *84*(2), 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.006>.

Fisher, M., & Trujillo, W. (2000). Fijación de carbono por pastos tropicales en las sabanas de los suelos ácidos neotropicales. En C. Pomareda & H. Steinfeld (Eds.), *Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales*. CATIE/FAO/SIDA, San José, Costa Rica, 115 p. [En línea]: (<http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v30n4/pyf07407.pdf>). Consultado en 15 de junio 2013.

Flores, R., & Vioria, A. (2005). Cría de ganado bovino. Cuaderno de estudio. MINEP (Ministerio para la Economía Popular, VE). 1º Ed. VE, 35 p.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., & Zaks, D. P. M. (2014). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*, 337-342.

Fonseca, G. W., et al. (2008). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, *30*(1), 36-47.

Fox, D. G., Tylutki, T. P., Tedeschi, L. O., Van Amburgh, M. E., Chase, L. E., Pell, A. N., Overton, T. R., & Russell, J. B. (2000). The NetCarbohydrate and Protein System for Evaluating Herd Nutrition and Nutrient Excretion: Model Documentation. Mimeo No. 213. Animal Science Department, Cornell University, Ithaca, NY. Disponible en http://www.simposio.palmira.unal.edu.co/documentos/1.4_CNCPs_Mimeo%20213.pdf.

Gaitán, M. J., Läderach, P., Graefe, S., Rao, I., & van der Hoek, R. (2016). Sistemas ganaderos climáticamente inteligentes: una evaluación de las reservas de carbono y las emisiones de GEI en Nicaragua. *PLoS ONE*, *11*(12), e0167949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167949>.

García, R. (2010). Desarrollo de la cadena de valor para los productos lácteos. Modelo productivo para las MIPYME en El Salvador. Consultado el 28 de febrero de 2017. Disponible en http://web.minec.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=502 &id=53 &Itemid=63.

Gerber, P. J., et al. (2011). Global livestock production and greenhouse gas emissions: The importance of the production system. *Environmental Science & Policy*, *14*(3), 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.12.004>.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., ... & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

González, A., et al. (2020). Carbon footprint of milk production in Colombian dairy farms: A life cycle assessment approach. *Sustainability*, *12*(18), 7642. <https://doi.org/10.3390/su12187642>.

González, L., & Rodríguez, A. (2016). Evaluación de sistemas de producción lechera en diferentes regiones de América Latina. *Revista de Producción Animal*, 34(2), 123-135.

González-Quintero, R., Kristensen, T., Sánchez-Pinzón, M. S., Bolívar-Vergara, D. M., Chirinda, N., Arango, J., Pantevez, H., Barahona-Rosales, R., & Knudsen, M. T. (2020). Carbon footprint, non-renewable energy and land use of dual-purpose cattle systems in Colombia using a life cycle assessment approach. *Livestock Science*. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104330>.

Goodland, R., & Anhang, J. (2009). Livestock and climate change: What if the key actors in climate change were pigs, chickens and cows? *Worldwatch*, November/December 2009, 10-19. Worldwatch Institute, Washington, DC, USA.

Guerra, L. (2007). Carbon footprint: Building institutional carbon balance. *Environmental Policy Journal*, 2(1), 30-40.

Guerra, L. (2007). Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Tesis. Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del CATIE, Costa Rica.

Hassán Vásquez, J. A. (2011). El ciclo de vida en la producción de leche y la dinámica de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas doble propósito de la península de Azuero, República de Panamá. Programa Agroambiental Mesoamericano (MAP). Fase I.

Henríquez, B. F., & Chávez, R. A. (2004). Propuesta de una estructura de costos predeterminados estimados para establecer los márgenes de utilidad del sector dedicado a la explotación del ganado lechero en el municipio de Nueva Concepción, departamento de Chalatenango. Tesis. Lic. C.P. San Salvador, SV. UFG. 182 p.

Hristov, A. N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., ... & Zhaoxiang, D. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production—A review of technical options for non-CO2 emissions. *FAO Animal Production and Health Paper*, 177.

Iglesias, D. H. (2002). Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de producto y su implicancia en el sistema agroalimentario. Documento de trabajo. Argentina: Programa de Gestión Ambiental/Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Bilbao.

IICA. (2012). Caracterización de la cadena productiva de lácteos en El Salvador. Consultado el 26 de abril de 2024. Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B4160e/B4160e.pdf>.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Suiza. 151 p.

ISO. (2006a). Environmental management - LCA: Principles and framework. ISO 14040. European Committee for Standardization. Belgium.

ISO. (2006b). Environmental management - LCA: Requirements and guidelines. ISO 14044. European Committee for Standardization. Belgium.

Jaramillo, S. (2012). Efecto de suplementación con cultivo hidropónico (Zea mays) en la crianza de terneras desde 3 hasta 8 meses de edad en la Hacienda Piganta Agrícola S.A., Parroquia Atahualpa. Tesis. Ing. Agroindustrial. EC. UDLA. 108 p.

Kanninen, M. (2003). *Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. Potencialidades de los Sistemas Silvopastoriles para la Generación de Servicios Ambientales*, 54.

Lal, R. (1999). Soil management and restoration for carbon sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Progress in Environmental Science*, 1(4), 307-326.

Lal, R. (2003). Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation & Development*, 14, 309-322.

Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1.2), 36-44.

Ledgard, S. F., Falconer, S. J., Abercrombie, R., Philip, G., & Hill, J. P. (2020). Temporal, spatial, and management variability in the carbon footprint of New Zealand milk. *Journal of Dairy Science*, 103, 1031–1046. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17182>.

Li, B., Fan, C. H., Zhang, H., Chen, Z. Z., Sun, L. Y., & Xiong, Z. Q. (2015). Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity, and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmospheric Environment*, 100, 10-19.

Livas, C. (2000). Engorda de ganado bovino en condiciones de trópico. In *Memorias del Congreso Nacional de Buiatría (XXIV, 2000, Guadalajara, México)*. AMMVEB. Guadalajara, México. pp. 71-75.

Managi, S., Hibiki, A., & Tsurumi, T. (2008). Does trade liberalization reduce pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(3), 239-258.

MARN. (2021). Contribuciones nacionalmente determinadas de El Salvador. (En línea). Consultado el 05 de noviembre de 2023. Disponible en <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/El%20Salvador%20NDC-%20Updated%20Dic.2021.pdf>

Mejía Miranda, O., Pomareda, C., Pérez, E., & Ganoza, V. (2003). Plan de desarrollo ganadero El Salvador. (En línea). Consultado el 19 de febrero de 2017. Disponible en

http://old.mag.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=7:plan-de-desarrollo-ganadero&id=4:planes&Itemid=93

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2021). Informe de emisiones de GEI en el sector agropecuario de El Salvador. MARN.

Montenegro-Ballester, J., Barrantes-Guevara, E., & Ivankovich-Cruz, S. (2020). Cuantificación de metano entérico según estado fisiológico en vacas lecheras de alta producción en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 79-92. <https://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i1.40003>

Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., & Butler, J. H. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476, 43-50.

Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654–1663. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>

Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R., Cuartas, C., & Naranjo, J. F. (2011). Ganadería colombiana sostenible: Mitigación del cambio climático y conservación de la biodiversidad. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV).

Naranjo, J. F., et al. (2020). Opportunities for innovation in dairy production systems. *Journal of Dairy Research*, 87(2), 152-159.

O'Brien, D., Hennessy, T., Moran, B., & Shalloo, L. (2015). Relating the carbon footprint of milk from Irish dairy farms to economic performance. *Journal of Dairy Science*, 98, 7394–7407. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-9222>.

Pacheco, M., et al. (2020). Comparative assessment of greenhouse gas emissions in dairy farming systems. *Sustainable Agriculture Research*, 9(2), 56-64.

Paustian, K., Cole, C. V., Sauerbeck, D., & Sampson, N. (1998). CO₂ mitigation by agriculture: An overview. *Climatic Change*, 40, 135-162.

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48(1), 147-163.

Pérez, L. B., González, F. L., Ortiz, V. E. E., & Vargas, C. S. (2021). Evaluación ambiental de la producción forraje-leche en pequeña escala, a través de un ACV. *Caminos alternativos para la sostenibilidad y el buen vivir*, 97.

Ruan, R., & Rodríguez, A. (1989). Producción de carne y leche en el ganado de doble propósito. Memorias III Reunión Anual del Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias del Estado de Veracruz, Veracruz, México, p. 58.

Sala, S., Anton, A., McLaren, S. J., Notarnicola, B., Saouter, E., & Sonesson, U. (2017). In quest of reducing the environmental impacts of food production and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 140, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.054>

Sauerbeck, D. R. (2001). CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspectives and limitations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1-3), 253-266.

Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 29-34.

Sharma, P., Kumar, S., & Soni, P. (2019). A study on carbon footprint of milk production in India. *International Journal of Chemical Studies*, 7(5), 1259-1263.

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsidig, E. A., ... & Tubiello, F. N. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (pp. 811-922). Cambridge University Press.

Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133, 247-266.

Stanley, P. L., Rowntree, J. E., Beede, D. K., DeLonge, M. S., & Hamm, M. W. (2018). Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*, 162, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.02.003>

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *Livestock Long Shadow: Environmental Issues and Options*. The Livestock and Environment Development Initiative (LEAD). FAO. Rome, Italy. 392 p.

Tamiotti, L., Olhoff, A., Teh, R., Simmons, B. A., & Kulaçoglu, C. (2009). *Trade and Climate Change: A Report by the United Nations Environment Programme and the World Trade Organization*. United Nations.

Tubiello, F. N., Salvatore, M., Córdor Golec, R. D., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., ... & Flammini, A. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks: 1990–2011 Analysis. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Vidal, M. (2011). Huella de carbono, la primera medida. Publicado para la Fundación ECODES (Ecología y Desarrollo). 65 pp.

Wattiux, M. A., Iñamagua – Uyaguari, J. P., Guerra, L., Casasola, F., & Jenet, A. (2016). Feeding and fertilization practices and greenhouse gas emissions in specialized dairy farms of Dos Pinos in Costa Rica. *Tropical Grasslands*, 4(3), 146-158. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(4\)146-158](https://doi.org/10.17138/TGFT(4)146-158).

Weathers, K. C., Strayer, D. L., & Likens, G. E. (2013). *Fundamentals of ecosystem science*. Elsevier, San Diego, CA, USA.

Wiedmann, T., & Jan Minx. (2007). A Definition of 'Carbon Footprint'. ISA Reino Unido Research Report. 07-01. ISA Reino Unido Research & Consulting.

Wilkes, A., Reisinger, A., Wollenberg, E. K., & Dijk, S. V. (2017). Medición, reporte y verificación de las emisiones de GEI de la ganadería de países en desarrollo de la UNFCCC: prácticas actuales y oportunidades de mejora. CCAFS Report.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2024). *Impulsarán IICA y CNOG la NAMA para la ganadería y la producción sustentable de alimentos de origen animal*. Recuperado de <https://iica.int/es/prensa>
4º

Moss, A. R., Jouany, J. P., & Newbold, J. (2000). Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de zootechnie*, 49(3), 231-253.

EUROCLIMA. (2022). *El Salvador cuenta con el documento de la NAMA ganadera para continuar impulsando la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI)*. Recuperado de <https://www.euroclima.org>.

AECID. (2022). *La Cooperación Española y la Unión Europea apoyaron la construcción de la NAMA ganadera en El Salvador para la mitigación de emisiones*. Recuperado de <https://aacid.sv>.