



Modulación de las emisiones de gases efecto invernadero de un hato lechero

ARTÍCULO ORIGINAL

Modulation of greenhouse gas emissions in a dairy herd

Modulação das emissões de gases de efeito estufa de um rebanho leiteiro



Cindy Carolina López Guerrero 
cindy.lopez@upec.edu.ec

Washington Orlando Meneses Quelal 
orlando.meneses@upec.edu.ec

Universidad Politécnica Estatal del Carchi. Tulcán, Ecuador

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.226>

Artículo recibido el 15 de marzo 2023 / Arbitrado el 26 de abril 2023 / Publicado el 20 de mayo 2023

RESUMEN

La ganadería es una actividad de gran representatividad en Ecuador, generadora de trabajo y desarrollo, clave para la seguridad alimentaria y fuente de abastecimiento del 34% de proteína para la población; sin embargo, la actividad ganadera representa una alta contribución de las emisiones de gases efecto invernadero, principalmente metano. El objetivo de la investigación fue estimar la huella de carbono generada en el año 2022 de un hato lechero, donde se realizó una recopilación y análisis de datos relacionados al manejo de los componentes de prácticas ganaderas, sistema pastoril y prácticas ambientales, cuyos resultados se procesaron con la herramienta de cálculo de emisiones directas (GLEAM-r) desarrollado por la FAO. Los resultados obtenidos de las emisiones totales de los gases de efecto invernadero fueron de 433764,10 Kg CO₂-eq, donde la intensidad de emisiones de leche fue 1,75 Kg CO₂-eq por litro de leche producido. Además, la cantidad de CH₄ de la fermentación entérica registró el 79,83% de las emisiones totales, la cantidad de CH₄ de manejo de excretas fue de 1,17%, mientras que la cantidad de N₂O de excretas en las pasturas registraron un porcentaje del 19%. Los resultados de intensidad fueron inferiores a valores referenciales registrados para Ecuador (1,9 Kg CO₂-eq por litro de leche producido), ya que en este estudio existe la aplicación de las buenas prácticas ganaderas de ganadería climáticamente inteligente (GCI) que impulsa el incremento sostenible de la producción de carne y leche con baja emisión de GEI, adaptación y construcción de resiliencia al cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático; Huella de carbono; Gases de efecto invernadero

ABSTRACT

Livestock is a highly representative activity in Ecuador, generating work and development, key to food security and a source of 34% of protein supply for the population; however, livestock activity represents a high contribution to greenhouse gas emissions, mainly methane. The objective of the research was to estimate the carbon footprint generated in the year 2022 of a dairy herd, where a compilation and analysis of data related to the management of the components of livestock practices, pastoral system and environmental practices was carried out, the results of which were processed with the direct emissions calculation tool (GLEAM-r) developed by FAO. The results obtained for total greenhouse gas emissions were 433764.10 Kg CO₂-eq, where the intensity of milk emissions was 1.75 Kg CO₂-eq per liter of milk produced. In addition, the amount of CH₄ from enteric fermentation registered 79.83% of total emissions, the amount of CH₄ from excreta handling was 1.17%, while the amount of N₂O from excreta in pastures registered a percentage of 19%. The intensity results were lower than the reference values recorded for Ecuador (1.9 kg CO₂-eq per liter of milk produced), since in this study there is the application of good livestock practices of climate-smart livestock (GCI) that promotes the sustainable increase of meat and milk production with low GHG emissions, adaptation and building of resilience to climate change.

Key words: Climate change; Carbon footprint; Greenhouse gases

RESUMO

A pecuária é uma atividade altamente representativa no Equador, gerando trabalho e desenvolvimento, fundamental para a segurança alimentar e fonte de 34% do fornecimento de proteínas para a população; no entanto, a atividade pecuária representa uma alta contribuição para as emissões de gases de efeito estufa, principalmente metano. O objetivo da pesquisa foi estimar a pegada de carbono gerada no ano de 2022 de um rebanho leiteiro, onde foi realizada uma coleta e análise de dados relacionados à gestão dos componentes das práticas pecuárias, do sistema pastoril e das práticas ambientais, cujos resultados foram processados com a ferramenta de cálculo de emissões diretas (GLEAM-r) desenvolvida pela FAO. Os resultados obtidos para o total de emissões de gases de efeito estufa foram 433764,10 kg CO₂-eq, sendo que a intensidade de emissão do leite foi de 1,75 kg CO₂-eq por litro de leite produzido. Além disso, a quantidade de CH₄ da fermentação entérica foi responsável por 79,83% das emissões totais, a quantidade de CH₄ do manuseio da excreta foi de 1,17%, enquanto a quantidade de N₂O da excreta nas pastagens foi responsável por 19%. Os resultados de intensidade foram inferiores aos valores de referência registrados para o Equador (1,9 kg de CO₂-eq por litro de leite produzido), uma vez que neste estudo há a aplicação de boas práticas pecuárias de pecuária inteligente em relação ao clima (GCI) que promovem o aumento sustentável da produção de carne e leite com baixas emissões de GEE, adaptação e construção de resiliência às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Pegada de carbono; Gases de efeito estufa

INTRODUCCIÓN

La emergencia climática que el mundo está atravesando, ha impulsado la generación de políticas y acuerdos entre países para mitigar la huella de carbono antropogénica generada en todo nivel (1). Una de las principales actividades que contribuyen al aumento de la huella de carbono es la producción ganadera, ya que está asociada a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), generados por la fermentación entérica de los rumiantes, estiércol de animales y el cambio en el uso de la tierra (2,3).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (4) las actividades derivadas de la producción ganadera generan 7,1 giga toneladas (GT) de CO₂, las mismas que equivalen al 14,5% de las emisiones antropogénicas globales de GEI. Según Twine (5) la cifra de las emisiones antropogénicas globales de GEI son del 16,5%, emisiones que si continúan incrementarán 2°C el calentamiento global para el 2030-2050 (6).

Las actividades ganaderas son fuente sustancial de emisión de GEI en las prácticas pecuarias, esto hace que haya discusiones emergentes sobre las prioridades científicas y políticas que se deben plantear para subsanar esta problemática ambiental (7,3, 8). En este contexto el protocolo de Kioto en 1997, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP27) y el último informe de síntesis (SYR) del

sexto informe de evaluación (AR6) sobre cambio climático 2023, han planteado nuevas estrategias frente a necesidad de disminuir la huella de carbono antropogénica generada (9).

Sin embargo, los esfuerzos para mitigar las emisiones de GEI en el sector pecuario no han sido suficientes lo que implica que existe un imperativo moral por disminuir esta contaminación ambiental y seguir produciendo alimentos para una población mundial cada vez mayor (10). Se necesitan más estrategias de mitigación destinadas a reducir las emisiones de este sector para limitar la carga ambiental de la producción de alimentos y garantizar al mismo tiempo un suministro suficiente de alimentos para una población mundial en crecimiento (11).

Para poder tomar acciones de mitigación y adaptación frente a esta problemática los ganaderos necesitan evaluar de manera fiable y frecuente las emisiones de GEI generadas, debido a que el calentamiento global ligado a la producción lechera es una preocupación permanente por parte de la población (12). De ahí, que la estimación de las emisiones de GEI generadas en la actividad pecuaria se han vuelto cada vez más importantes para todas empresas. Es necesario innovar herramientas que permitan determinar la huella de carbono, y lograr cuantificar la cantidad de emisiones de GEI en términos de dióxido de carbono que son liberadas a la atmósfera (13).

Estimar la huella de carbono en el hato lechero permitiría desarrollar una producción ganadera

más eficiente y ecológicamente sostenible que mitigue las emisiones de GEI en sus explotaciones, convirtiéndose en un desafío metodológico que involucra el uso de tecnologías informáticas y de bienestar animal para evaluar la gestión ambiental (14,15).

En este contexto la División de Producción y Sanidad Animal de la FAO en el 2009 desarrolló el Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM), que permite cuantificar de manera precisa las emisiones de GEI derivados de la producción pecuaria, interrelacionando la ganadería con el ambiente mediante la simulación de una explotación pecuaria, para medir las emisiones de huella de carbono usando las fuentes de IPCC del año 2006 (16). En diciembre del año 2022 se presentó la versión GLEAM 3.0, que fue actualizada con el fin de conocer el desempeño ambiental de la ganadería y apoyar al productor con la identificación de mejoras en las áreas de manejo de productivo, reproductivo, alimenticio y de excretas del hato (4,17). Esta aplicación permite agregar y visualizar datos relacionados con el número de cabezas de ganado, la producción animal, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la intensidad de las emisiones por región, el sistema de producción y la fuente de las emisiones.

Por otro lado, en Centro América (11), mediante el uso de GLEAM-interactivo modularon las emisiones de GEI en 61 predios en diferentes

regiones de Honduras y compararon la fase inicial y fase final para conocer la mejora en la eficiencia productiva. De manera similar en Ecuador en las provincias de Guayas, Manabí, Santa Elena, Imbabura, Loja, Napo y Morona Santiago, la aplicación GLEAM ha permitido realizar estudios de estimación de la huella de carbono, en más de 40 mil hectáreas en las que se han evidenciado mejoras, dentro de los parámetros productivos, reproductivos, alimenticios y manejo de excretas, logrando la sostenibilidad y la reducción de las emisiones de GEI (18-21). En el 2019, la empresa privada El Ordeño y la FAO ejecutaron exitosamente un plan piloto, en el Cantón Cayambe, para medir las buenas prácticas ganaderas y las emisiones de GEI en campo (22).

Finalmente, los esfuerzos por estimar de la huella de carbono en los hatos lecheros han sido numerosos en los últimos años; sin embargo, monitorear y cuantificar simultáneamente todas las emisiones de una granja o un sistema de producción determinado es esencialmente imposible y prohibitivamente costoso. Por lo tanto, se requiere incrementar en número de alternativas y estudios para cuantificar y evaluar las emisiones de GEI de los sistemas de producción lechera (23). El objetivo del presente estudio es estimar la huella de carbono aplicando la herramienta de cálculo de emisiones directas del modelo GLEAM-r, para evaluar las emisiones de GEI del hato lechero de la hacienda San Guillermo del cantón Tulcán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se realizó un estudio de modelación de emisiones directas de GEI en la hacienda San Guillermo, productora de leche bovina para estimar la huella de carbono generada en el año 2022. Se encuentra ubicada en la comunidad La Delicia de la parroquia Tulcán, cantón Tulcán, provincia del Carchi, región Sierra Norte del Ecuador. Tiene una extensión de 210 hectáreas destinadas a la producción agropecuaria y conservación, se extiende desde latitud 0° 45'47" N hasta 0°44'02" N y desde la longitud 77°44'14" W hasta 77°44'04" W.

La zona de vida de la hacienda es Bosque Húmedo Montano Bajo, la cual está establecida entre 3027msnm hasta 3351msnm en la que predomina el suelo andisol. La temperatura promedio es 11°C y la precipitación va desde 1000 hasta los 1400 ml por año (24).

Recopilación de datos y cálculo de emisiones

La investigación incluyó las fases de recopilación, modelación, análisis y evaluación de información obtenida mediante flujo y monitoreo de la información. Para estimar la huella de carbono generada en el año 2022 y la intensidad

de emisión de GEI relacionados al manejo actual del sistema productivo de la Hacienda San Guillermo, se consideró tres componentes: prácticas ganaderas, sistema pastoril y prácticas ambientales; el cálculo de las emisiones de GEI se realizó a través de la herramienta de cálculo basada en el Modelo Global de Evaluación Ambiental de la Ganadería (GLEAM-r), que fueron comparadas con la línea base de emisiones de GEI modelados para los años 2010 a 2025 en Ecuador. Según los registros sobre el producto leche de la línea base, el CH₄ que se obtuvo en el proceso de fermentación entérica fue de 77,14%, las emisiones de N₂O procedentes del estiércol dejado en las pasturas de 17,93%, el CH₄ generado por manejo del estiércol de 2,63% y el N₂O generado por manejo de estiércol de 2,31% (25). En la Tabla 1 se considera la intensidad de emisión de GEI con los cuales se realizará la comparación de los datos obtenidos en esta investigación.

Tabla 1. Intensidad de emisiones de GEI para Ecuador en los años 2010 a 2025

Descripción	Intensidad de Emisiones	
	Leche	Carne
	kg CO ₂ -eq/l	kg CO ₂ -eq/kg
10% más alto	22,8	208,9
Promedio	8,6	83,7
10% más bajo	1,9	27,3

Fuente: Línea base de emisiones de gases de efecto invernadero del proyecto ganadería climáticamente inteligente (25).

La intensidad de emisión de GEI de rumiantes por kilogramo de leche producida varía de 165 a 112 kg CO₂-eq/l, mientras que la intensidad de emisiones para unidad de proteína producida para carne es mucho mayor, 300 kg CO₂-eq/kg carne (2).

En los países desarrollados, las intensidades de emisión de GEI del ganado rumiante son inferiores a 100 kg de CO₂-eq/kg de proteína, mientras que en el África subsahariana (SSA), oscila entre 250 y 1000 kg de CO₂-eq por kg de proteína (26).

Para describir los datos generales se recopiló información sobre la ubicación del sitio de estudio, las coordenadas de latitud, longitud, tipo de producto que genera y el tipo de sistema productivo del año de evaluación. La categorización del número de animales se analizó mediante los registros del hato lechero, obteniendo un número promedio del total de animales durante el año de evaluación en todas las categorías sin incluir animales que se vendieron, descartaron o murieron. Las categorías estudiadas fueron: vacas (número de hembras adultas mayores a 2 años, incluidas secas y en producción), vacas en producción (número de hembras adultas que estén produciendo leche),

vaconas (número de hembras entre 1 y 2 años), terneras (número de hembras menores a 1 año), toros (número de machos adultos mayores a 2 años), toretes (número de machos entre 1 a 2 años), terneros (número de machos menores a 1 año). Para determinar los parámetros de mortalidad y salida de animales se consideró el número total de animales que murieron y salieron en el año de acuerdo con cada categoría.

Los parámetros de fertilidad y pesos se determinaron en base a los partos totales (número de partos totales que hubo en el hato), edad a primer parto en meses (edad promedio del primer parto de vacas en meses), peso vacas (peso promedio en kg de las vacas), peso terneras (peso promedio en kg de las terneras al nacimiento), peso toros (peso promedio en kg de los toros), peso terneros (peso promedio en kg de los terneros al nacimiento), peso sacrificio vaconas y toretes (peso promedio en kg de las vaconas y toretes al sacrificio o venta). Para determinar los parámetros productivos se consideró los porcentajes de grasa y proteína en leche, el promedio de litros de leche por animal por día y el promedio de lactancia en meses. Los datos recolectados para la

alimentación que se analizó fueron porcentaje de digestibilidad y contenido de nitrógeno del pasto fresco cosechado por los animales compuesto por (*Lolium perenne*, *plantago mayor*, *trifolium repens*) sin suplementación alimenticia para todas las categorías antes detalladas.

La variable del manejo de excretas no se tomó en cuenta en el modelo, ya que se identificó que

la hacienda no tenía manejo las excretas y eran dejadas en potrero. Las excretas que provenían de sala de ordeño y corrales de espera de igual manera no fueron almacenadas sino reintroducidas a los potreros cercanos de manera inmediata después de cada ordeño en conjunto a los efluentes del aseo de la sala de ordeño y corrales de espera.

Tabla 2. Línea base datos de entrada GLEAM-r, para el producto leche en la región de la Sierra ecuatoriana latitud 0,7529 y longitud -77,7356.

Variable	Valor
Número de vacas	62
Número de vacas en producción	54
Número de vaconas	39
Número de terneras	28
Número de terneros	12
Número de toros	1
Número de toretes	7
Número de vacas muertas	4
Número de terneros muertos	2
Número de terneras muertos	2
Número de vacas faenadas	1
Número de vacas vendidas	11
Partos totales	49
Edad a primer parto (meses)	28,43
Peso vivo vacas (Kg)	500
Peso vivo toros (Kg)	550
Peso vivo terneros (Kg)	42
Peso vivo terneras (Kg)	38
Peso al sacrificio vaconas (Kg)	450
Peso al sacrificio toretes (Kg)	455
Peso al descarte vacas (Kg)	500
Porcentaje de grasa en leche	4,04
Porcentaje de proteína en leche	3,42
Producción de leche (litros)	13,13
Superficie de pastos (Ha)	48,762

RESULTADOS

Realizado el proceso de modelación de los datos con la herramienta GLEAM-r, de la ganadería climáticamente inteligente para Ecuador (GCI), se obtuvo la huella de carbono generada para el año 2022 y la intensidad de emisiones de GEI de 1,75 Kg CO₂-eq por litro de leche. Los resultados obtenidos fueron inferiores al promedio de intensidad de emisión obtenida para Ecuador y a los estudios realizados en Uganda (27), donde señalan que la intensidad de emisiones de GEI para leche y carne fueron mayores a los promedios mundiales debido a la baja productividad animal de las razas de ganado local y la mala calidad de alimento. No obstante, la intensidad de emisiones de GEI de esta investigación fueron superiores a los datos de (28) quienes muestran que las emisiones de GEI por kg de leche fueron aproximadamente entre 1,06 kg CO₂-eq y 0,89 kg CO₂-eq.

La investigación registró una emisión total anual de GEI de 433764,10 Kg CO₂-eq. La cantidad de CH₄ de la fermentación entérica correspondió al 79,83% de emisión total siendo 346278,12 Kg CO₂-eq, mientras que la cantidad de CH₄ de manejo de excretas fue de 1,17% de emisión total, es decir 5058,28Kg CO₂-eq. La cantidad de N₂O de excretas en las pasturas fue de 82427,69 Kg CO₂-eq correspondiendo al 19%. Finalmente, no se registró emisión de N₂O por manejo de excretas, ya que la hacienda no está realizando ninguna actividad para disminuir las emisiones de GEI en este aspecto (Tabla 3). Sin embargo, sí que es importante que se realice manejo de excretas, ya que el N₂O ha sido responsable por el 5% de los GEI totales en los últimos 100 años (29).

Tabla 3. Línea base datos de entrada GLEAM-r, para el producto leche en la región de la Sierra ecuatoriana latitud 0,7529 y longitud -77,7356.

Categorización animal	N ² O de Excretas en pasturas		N ² O de Manejo de Excretas		CH ⁴ de Manejo en Excretas		CH ₄ de Fermentación Entérica	
	kg CO ₂ -eq	%	kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq	%	kg CO ₂ -eq	%	
Hembras de carne	1577,27	0,36	0,00	88,65	0,02	6068,89	1,40	
Machos de carne	10540,80	2,43	0,00	605,06	0,14	41421,10	9,55	
Machos de reemplazo	159,98	0,04	0,00	9,08	0,00	621,58	0,14	
Hembras de reemplazo	10369,90	2,39	0,00	577,42	0,13	39528,81	9,11	
Toros	736,99	0,17	0,00	36,67	0,01	2510,56	0,58	
Vacas secas	7911,98	1,82	0,00	393,70	0,09	26951,98	6,21	
Vacas en producción	51130,77	11,79	0,00	3347,70	0,77	229175,20	52,83	
% Total		19,00			1,17		79,83	
Emisiones totales 433764,10 kg CO2-eq								

DISCUSIÓN

Las emisiones de GEI provenientes de las actividades pecuarias del ganado bovino representan aproximadamente el 65% de las emisiones del sector pecuario (2), están generadas en mayor porcentaje por la fermentación entérica, gestión del estiércol y en la parte agrícola por el uso de fertilizantes y la gestión de suelo. Los GEI más importantes que son susceptibles de inventariar son: el metano (CH_4) que contribuye con el 9% del efecto invernadero con potencial de calentamiento de 28 en permanencia de 100 años y el óxido nítrico (NO_2) a quien se le atribuye el 5% del efecto invernadero, con potencial de calentamiento de 265 en permanencia de 100 años (30).

Es necesario conocer el potencial de calentamiento (GWP) de los distintos GEI para poder expresarlos en las mismas unidades. El GWP es el gas de referencia a través del cual se ha desarrollado una métrica para comparar (en relación con otro gas) la capacidad de cada gas de efecto invernadero para atrapar el calor en la atmósfera. Específicamente, es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de 1 tonelada de un gas durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO_2) (31). Así, en este caso, la herramienta GLEAM-r suma las emisiones de distintos GEI generados y da un valor único de emisión en Kg de CO_2 -eq, siendo el valor que se va a comparar con otros estudios realizados para producción de leche bovina estandarizada.

Como se observa en la tabla 3, la emisión de la huella de carbono obtenida en esta investigación fue de 1,75 Kg CO_2 -eq por litro de leche; valor inferior a la evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación realizada por la FAO (34), en la que se señala que la intensidad media de las emisiones por litro de leche es de 2,8 Kg CO_2 -eq para la región latinoamericana. De manera similar, la FAO y Global Dairy Platform (32) en otro estudio señalan que la mayor intensidad de emisiones de GEI se produce en el África subsahariana, con un promedio de 7,5 kg de CO_2 -eq, y que los valores más bajos se han estimado para las regiones industrializadas, entre 1 y 2 kg de CO_2 -eq, valores de 1,4 kg de CO_2 -eq para Europa (30). Por otro lado, el sur de Asia, el oeste de Asia y el norte de África y América Central y del Sur, tienen niveles intermedios de emisiones estimados entre 3 y 5 kg de CO_2 -eq (8). Además, un estudio realizado por la International Farm Comparison Network (IFCN), en 117 granjas lecheras bovinas estandarizadas a nivel mundial de 45 regiones lecheras en 38 países, evidencia que la intensidad de emisiones de GEI promedio es de 1,50 kg CO_2 -eq, mientras que los estudios realizados en España reflejan un rango de intensidad desde 0,67 y 5,2 kg CO_2 -eq en función del tipo de explotación, ámbito geográfico y aspectos metodológicos, siendo las emisiones más elevadas en explotaciones que cuentan con razas no especializadas o autóctonas y menores en los sistemas intensificados con alto nivel productivo por animal o en sistemas

extensivos bien manejados llegan a tener una intensidad de emisión de GEI menor a 1 kg de CO₂-eq debido al potencial de fijación de carbono de los pastizales (30,33). Sin embargo, identificar los principales factores de influencia relacionados con la intensidad de las emisiones de GEI no es tarea sencilla, se necesitan más estudios para evaluar mejor el impacto del aumento del rendimiento animal en las emisiones de GEI.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la línea base de emisiones directas de GEI obtenidas mediante el modelo GLEAM-r para la ganadería bovina de carne y leche del territorio de Ecuador entre los años 2010 a 2025. En la tabla se reporta que la intensidad de emisión por litro de leche más baja fue 1,90 Kg CO₂-eq. Sin embargo, los resultados de este estudio revelan que las emisiones de GEI son inferiores al valor referencial de la región y son comparables a las emisiones generadas en Europa. El hecho de que las emisiones de GEI en la hacienda San Guillermo hayan sido inferiores a otros estudios previos es debido a la aplicación de las buenas prácticas ganaderas de ganadería climáticamente inteligente (GCI). Marín (11) aplicaron un cambio tecnológico en Honduras con la aplicación de GCI y consiguieron una disminución de 10,5% de emisiones de GEI; además, con la ejecución del proyecto de GCI, en Ecuador, se obtuvo una reducción en la emisión de GEI del 50 034 t CO₂-eq (21).

Óxido nitroso (NO₂) de excretas en pasturas

Los excrementos del ganado depositados en los pastizales de pastoreo son una fuente importante de óxido nitroso (NO₂), cuyas emisiones varían según el tipo de excreta (estiércol u orina) y el tipo de suelo (34). Se relaciona principalmente con la acción de las bacterias desnitrificantes asociadas a la gestión del estiércol en las pasturas que se encuentran sometidos a condiciones fluctuantes aerobias y anaerobias. En este estudio los resultados de óxido nitroso generado por las excretas en pasturas fueron del 19%, valores superiores a las de otros autores. Así, Prenafeta y Fernández (30) obtuvieron valores de 17,93% en las emisiones globales de GEI globales de NO₂. Los autores reportaron que las emisiones para el sector ganadero incluido el porcentaje de manejo de excretas, fertilizante en pasturas y cultivos para piensos abarcaron el 24% del total de GEI. 17,93%. Los patrones de flujo de emisión de NO₂ mostraron a lo largo de la investigación que las categorías de los animales varían en cuanto a las emisiones de NO₂. Así, por ejemplo, la categoría de vacas en producción generó un promedio de 11,79% de emisiones de NO₂ sobre el total de excretas en pasturas; no obstante, la categoría de los toros generó 0,17% de emisiones de NO₂ del total de excretas en pasturas. Estos reportes se deben principalmente a que en la hacienda analizada hay mayor número de vacas en producción que toros.

Metano (CH₄) de Fermentación entérica

La fermentación entérica y la producción de piensos son las fuentes principales de emisión CH₄ para los rumiantes (35), por esa razón la GCI se enfoca mitigar la emisión de GEI a través de mejorar la digestibilidad de los piensos, en mejorar las prácticas de manejo y manejo reproductivo (36). En este sentido, una estimación precisa de la generación de metano entérico de los rumiantes puede ayudar a equilibrar el aumento de la producción animal con las consecuencias ambientales (37).

El metano entérico de estudio corresponde al 79,83%, cifras superiores a las realizadas por la herramienta GLEAM-r para los años 2010 a 2025 en Ecuador, en los cuales se reporta el 77,14% de emisiones de CH₄ de fermentación entérica. En la Tabla 3 se evidencia que la mayor producción de CH₄ (52,83%) se generó en la categoría de vacas en producción. Este aumento puede estar justificado por la existencia de un mayor número de vacas en producción y porque las vacas en producción consumen mayor cantidad de alimento (38). Además, a medida que una vaca lechera consume más alimento disminuye el tiempo de rumia, haciendo que se genere más CH₄ por el hecho de existir una mayor disponibilidad de sustrato para la fermentación microbiana (39). Por otro lado,

el tiempo de la rumia afecta a todo el proceso de digestión, incluida la tasa de paso del alimento, el consumo de alimento libre en las vacas lecheras y el rendimiento de la leche de vaca (40). En este sentido se puede inferir que las vacas en producción podrían tener poco tiempo de rumia, ya que según Mikula (40) las vacas con baja rumia generan 1,8% más CH₄ que las vacas con rumia media y 4,2% más que las vacas con rumia alta. De manera similar, según las investigaciones realizadas por Watt (41) las vacas con rumia alta producen 2,9% menos de CH₄ por unidad de leche que las vacas de rumia media y un 4,6% menos de CH₄ que las vacas con rumia baja.

Metano (CH₄) de manejo de excretas

Las emisiones de metano producidas por la gestión del estiércol, entendiéndose como tal tanto la excreta sólida como la orina, son las relacionadas con las operaciones de gestión de este (42). El estiércol animal y los suelos gestionados son las fuentes más importantes de emisiones del ganado después del metano entérico. En este estudio el CH₄ generado por el manejo en excretas fue de 5058,28 Kg CO₂-eq que corresponde a 1,16% del total de GEI generados. A nivel global el CH₄ correspondiente al manejo en excretas representa para leche el 3,8% (Figura 1).

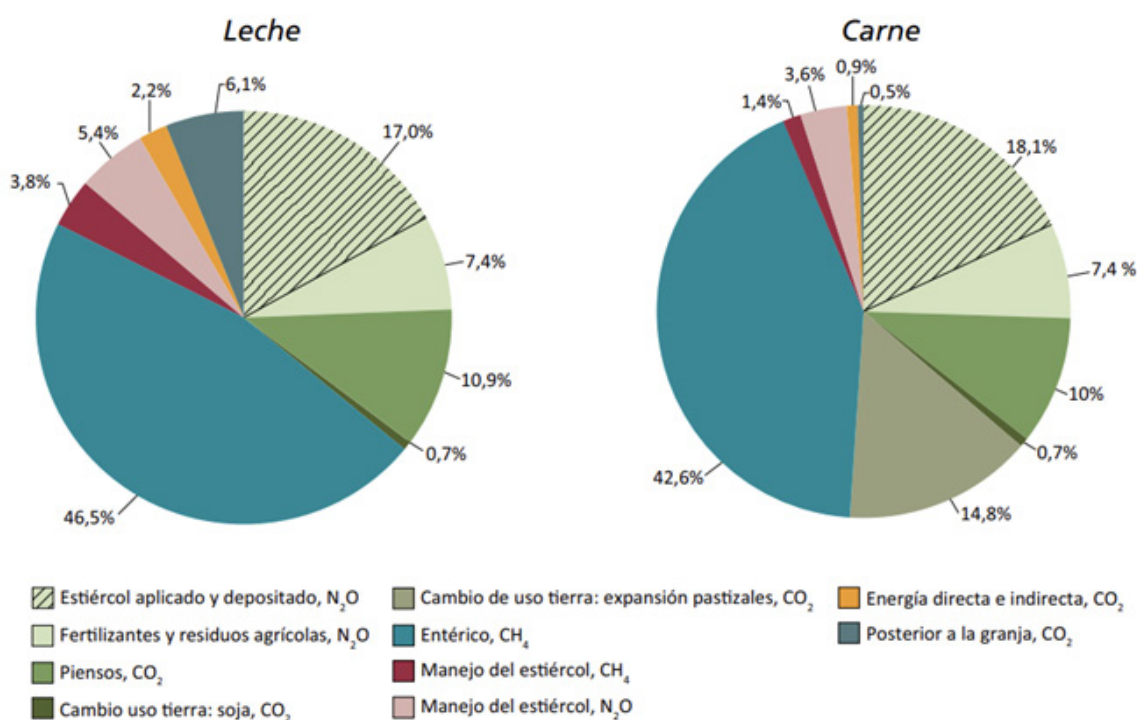


Figura 1. GLEAM; emisiones globales de las cadenas de suministro de leche y carne vacuno, por categoría de emisiones.

La hacienda San Guillermo al contar con un hato lechero genéticamente adaptado a sistemas pastoriles, de menor tamaño y mayor eficiencia productiva permite que las prácticas ganaderas estén en los rangos de la región, de igual manera se presenta para el manejo sistema pastoril que se cuenta con material genético para pastoreo y variedades de altura. Trayendo recomendaciones hacia el manejo de prácticas ambientales y lograr reducir la huella de carbono emitida.

CONCLUSIONES

El ser humano puede llegar a un equilibrio productivo siendo socialmente responsable aplicando tecnologías que le permita seguir produciendo sin causar mayor afectación al ambiente. Para este estudio existe un gran

potencial de reducción de la huella de carbono producida por litro de leche por la implementación de las buenas prácticas ganaderas de ganadería climáticamente inteligente, haciendo que se produzca no solo menor huella ambiental sino el incremento de un sistema más productivo. El estudio se realizó en un hato lechero joven con 4,53 años de longevidad de sus bovinos, con manejo pastoril de mezclas forrajeras de alto valor energético, estas características dentro del manejo productivo, silvopastoril y manejo de excretas permitió contar con una emisión de GEI baja en relación a la literatura reportada por la región.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cho H, Strezov, V, Evans T. A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00567. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00567>
2. Gerber J, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. 2013. <http://www.fao.org/3/i3437s/i3437s.pdf>
3. Bačėninaitė D, Džermeikaitė K, Antanaitis R. Global Warming and Dairy Cattle: How to Control and Reduce Methane Emission. 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12192687>
4. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. Livestock solutions for climate change. 2017. <https://www.fao.org/3/i8098e/i8098e.pdf>
5. Twine R. Emissions from Animal Agriculture-16.5% Is the New Minimum Figure. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13116276>
6. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. 2020. Sexto ciclo de evaluación. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/05/2020-AC6_en.pdf
7. Ministerio del Ambiente [MAE]. Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2017. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/TERCERA-COMUNICACION-BAJA-septiembre-20171-ilovepdf-compressed1.pdf>
8. IPCC. Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (Vol. 1454). 2022.
9. Porelclima. Nuestras decisiones de hoy repercutirán en todo el mundo durante cientos de años. 2023.
10. Delgado J, Barrera V, Alwang J, Villacis-Aveiga A, Cartagena Y, Neer D, Monar C, Escudero L. Potential use of cover crops for soil and water conservation, nutrient management, and climate change adaptation across the tropics. 2021; 175–247. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.09.003>
11. Marín-López D, Matamoros-Ochoa I, Ramírez-Restrepo C. Dinámicas de producción y emisiones modeladas de gases de efecto invernadero en sistemas regionales de producción lechera de Honduras. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*. 2022; 69(1). <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101526>
12. Mazzetto A, Bishop G, Styles D, Arndt C, Brook R, Chadwick D. Comparing the environmental efficiency of milk and beef production through life cycle assessment of interconnected cattle systems. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 277, 124108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124108>
13. Scholtz M, Naser W, Makgahlela M. A balanced perspective on the importance of extensive ruminant production for human nutrition and livelihoods and its contribution to greenhouse gas emissions. *South African Journal of Science*. 2020; 116(9/10). <https://doi.org/10.17159/sajs.2020/8192>
14. Yunga S. Análisis comparativo del cálculo de huella de carbono por litro de leche producido, entre pequeños y medianos productores que emplean prácticas ganaderas convencionales y pequeños y medianos productores que emplean prácticas de ganadería climáticamente inteligente. 2020. <http://hdl.handle.net/10644/7875>
15. Palangi V, Taghizadeh A, Abachi S, Lackner M. Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions in Ruminants: A Review. 2022. <https://doi.org/10.3390/su142013229>
16. Loaiza J. Huella de carbono en la producción de carne: Revisión sistemática. 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/88505>
17. MacLeod M, Vellinga T, Opio C, Falcucci A, Tempio G, Henderson B, Makkar H, Mottet A, Robinson T, Steinfeld H, Gerber P. Invited review: A position on the Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM). *Animal*. 2018; 12(2), 383–397. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001847>

- 18.** Ganadería Climáticamente Inteligente. Herramienta de Cálculo Emisiones Directas. 2018. <http://www.ganaderiaclimaticamenteinteligente.com/>
- 19.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Una colaboración estratégica entre la empresa privada y la FAO Ganadería climáticamente inteligente en Ecuador. 2019. <http://ganaderiaclimaticamenteinteligente.com/documentos/G%C3%A9nero%20y%20GCI%20Ecuador.pdf>
- 20.** Delgado C, Rosegrant M, Steinfeld H, Ehui S. LIVESTOCK TO 2020: The Next Food Revolution. 2020. www.ifpri.org
- 21.** FAO. Evaluación de "Ganadería climáticamente inteligente: Integrando la reversión de la degradación de tierras y reduciendo los riesgos de desertificación en provincias vulnerables". 2020. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CB1573ES>
- 22.** FAO. FAO y El Ordeño presentaron los resultados de su alianza enfocada en una Ganadería Climáticamente Inteligente. 2019. <https://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/en/c/1206682/>
- 23.** INEC. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. 2021. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-bbd/>
- 24.** Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tulcán. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Tulcán. 2020. <https://n9.cl/v2jj6>
- 25.** Sangoluisa P. Línea base de emisiones de gases de efecto invernadero. 2018. <http://www.ganaderiaclimaticamenteinteligente.com/documentos/Linea%20Base%20Emisiones%20GEI.pdf>
- 26.** Herrero M, Havlík P, Valin H, Notenbaert A, Rufino M, Thornton P, Blümmel M, Weiss F, Grace D, Obersteiner M. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013; 110(52), 20888–20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>
- 27.** Kiggundu N, Ddungu S, Wanyama J, Cherotich S, Mpairwe D, Zziwa E, Mutebi F, Falcucci A. Greenhouse gas emissions from Uganda's cattle corridor farming systems. *Agricultural Systems*. 2019; 176, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102649>
- 28.** Von S. Salud de las vacas lecheras e intensidad de emisión de gases de efecto invernadero. 2020; 1(1):20-29. <https://doi.org/10.3390/dairy1010003>
- 29.** Núñez-Ramos P, García-Lagombra G, Del Rosario J, Asencio-Cuello V. Nitrous oxide (N₂O) measurements in managed soil under grazing with dairy cattle. *Terra Latinoamericana*, 39. 2021; 39(2021), 2-12. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.813>
- 30.** Prenafeta F, Fernández B. Estudio sobre los gases de efecto invernadero en el sector lácteo. 2022. <https://inlac.es/wp-content/uploads/2022/07/Ry67T64.pdf>
- 31.** Vallero D. Air pollution biogeochemistry. *Air Pollution Calculations*. 2019; 175–206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814934-8.00008-9>
- 32.** FAO, GDP. Climate change and the global dairy cattle sector-The role of the dairy sector in a low-carbon future. 2019. <https://www.fao.org/3/CA2929EN/ca2929en.pdf>
- 33.** Hagemann M, Ndambi A, Hemme T, Latacz-Lohmann U. Contribution of milk production to global greenhouse gas emissions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2012; 19(2), 390-402. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0571-8>
- 34.** Krol D, Carolan R, Minet, E, McGeough K, Watson C, Forrestal P, Lanigan G, Richards K. Improving and disaggregating N₂O emission factors for ruminant excreta on temperate pasture soils. *Science of The Total Environment*. 2016; 568, 327–338. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.06.016>
- 35.** Clark H. The Estimation and Mitigation of Agricultural Greenhouse Gas Emissions from Livestock. *Proceedings of International Seminar on Livestock Production and Veterinary Technology*. 2017; 5-13. <http://medpub.litbang.pertanian.go.id/index.php/proceedings/article/view/1422/1324>

- 36.** Paredes D. Valoración de costos y costo/beneficio de implementación de buenas prácticas de ganadería climáticamente inteligente. 2021. https://www.researchgate.net/publication/344179095_Valoracion_y_Analisis_CostoBeneficio_de_Buenas_Practicas_de_Ganaderia_Climaticamente_Inteligente
- 37.** Volden H. NorFor-he Nordic Feed Evaluation System. *Animals*, null, null. 2011. <https://www.norfor.info/>
- 38.** Pacheco D, Waghorn G, Janssen P. Decreasing methane emissions from ruminants grazing forages: ¿a fit with productive and financial realities? *Animal Production Science*. 2014; 54(9), 1141–1154. <https://doi.org/10.1071/AN14437>
- 39.** Niu P, Schwarm A, Bonesmo H, Kidane A, Aspehølen A, Storlien T, Kreuzer M, Alvarez C, Sommerseth J, Prestløkken E. A Basic Model to Predict Enteric Methane Emission from Dairy Cows and Its Application to Update Operational Models for the National Inventory in Norway. *Animals*. 2021; 11(7), 1891. <https://doi.org/10.3390/ani11071891>
- 40.** Mikuła R, Pszczola M, Rzewuska K, Mucha S, Nowak W, Strabel T. The Effect of Rumination Time on Milk Performance and Methane Emission of Dairy Cows Fed Partial Mixed Ration Based on Maize Silage. *Animals*. 2021; 12(1), 50. <https://doi.org/10.3390/ani12010050>
- 41.** Watt L, Clark C, Krebs G, Petzel C, Nielsen S, Utsumi S. Differential rumination, intake, and enteric methane production of dairy cows in a pasture-based automatic milking system. *Journal of Dairy Science*. 2015; 98(10), 7248–7263. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2015-9463>
- 42.** Rivera J, Chará J. CH₄ and N₂O Emissions from Cattle Excreta: A Review of Main Drivers and Mitigation Strategies in Grazing Systems. In *Frontiers in Sustainable Food Systems Vol. 5*). 2021; Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.657936>