

Dinámicas de producción y emisiones modeladas de gases de efecto invernadero en sistemas regionales de producción lechera de Honduras

D. Marín-López¹, I. A. Matamoros-Ochoa¹, C. A. Ramírez-Restrepo²*

Recibido: 04 de agosto de 2020. Aprobado: 06 de septiembre de 2021

RESUMEN

El objetivo del estudio fue la caracterización productiva y de emisiones modeladas de gases de efecto invernadero (GEI) en 61 sistemas lecheros localizados en cinco regiones de Honduras. Durante las fases inicial (FI) y final (FF), con encuestas aplicadas individualmente a los productores, se identificaron aspectos técnicos y de productividad. Variables numéricas expresadas en Microsoft Excel® permitieron, con el modelo FAO de evaluación ambiental de la ganadería global-interactivo (GLEAM-i, por sus siglas en inglés) de ciclo de vida, estimar emisiones anuales de metano (CH_4), óxido nítrico (N_2O) y dióxido de carbono (CO_2) en cada finca. Cálculos intermedios (GEI/animal) fueron derivados de la modelización GLEAM-i en Excel®. Durante la FI las fincas conjuntamente emitieron 25.038 t CO_2 equivalente (CO_2 -eq), mientras que dichas emisiones fueron 10,5% menores en la FF. Emisiones de GEI/animal ($2,85 \pm 0,08$ t CO_2 -eq) y de GEI/kg de proteína láctea ($96,91 \pm 4,50$ kg CO_2 -eq) durante la FI fueron 13 y 21% menores en la FF, respectivamente. Valores de $52,82 \pm 1,64$ (CH_4) y $2,66 \pm 0,10$ (N_2O) kg/animal en la FI fueron 13% y 17% menores en la FF, respectivamente. La región Centro-Sur-Oriente emitió la menor cantidad de CH_4 ($42,95 \pm 2,37$ kg/animal) y N_2O ($1,82 \pm 0,15$ kg/animal), mientras las regiones Occidente y Norte experimentaron una reducción del 27% en GEI/kg proteína láctea entre la FI y FF. Se concluyó que la metodología usada identificó los impactos productivos y medioambientales, derivados de alternativas técnicas implementadas en sistemas de producción lechera de Honduras.

Palabras clave: diagnóstico, fincas, GLEAM-i, medioambiente, productividad.

Production dynamics and greenhouse gas modeled emissions from regional dairy production systems in Honduras

ABSTRACT

The study aimed to characterize production dynamics and greenhouse gas (GHG) emissions from 61 dairy farms in five regions in Honduras. Farm data were collected through individual surveys during the initial and final phases (IP; FP). Using Microsoft Excel®, data

¹ Universidad Zamorano, Maestría en Agricultura Tropical Sostenible, km 30 carretera de Tegucigalpa a Danli, Valle del Yeguaré, Municipalidad de San Antonio de Oriente. Francisco Morazán, Honduras.

² CR Eco-efficient Agriculture Consultancy (CREAC)™, 46 Bilbao Place, Bushland Beach, QLD 4818, Australia.

* Autor para correspondencia: dikson623@gmail.com

was incorporated into the global livestock environmental assessment model-interactive (GLEAM-i, FAO) life cycle framework to estimate annual emissions of methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), and carbon dioxide (CO_2) at the farm system level. Animal emissions (GHG/animal) were derived in Excel[®] from the GLEAM-i predictions. Together, farms during the IP emitted 25.038 t CO_2 equivalent ($\text{CO}_2\text{-eq}$) while these emissions were 10,5% lower in the FP. Emissions of GHG/animal ($2,85 \pm 0,08$ t $\text{CO}_2\text{-eq}$) and GHG/kg of milk protein ($96,91 \pm 4,50$ kg $\text{CO}_2\text{-eq}$) during the IP were 13% and 21% lower in the FP, respectively. Methane and N_2O emission values ($52,82 \pm 1,64$ vs. $2,66 \pm 0,10$ kg/animal) were 13% and 17% higher in the IP than in FP. The South-Central region emitted the lowest amount of CH_4 and N_2O ($42,95 \pm 2,37$ kg/animal vs. $1,82 \pm 0,15$ kg/animal) while 27% lower GHG/kg milk protein was observed between the IP and FP of the Western and Northern regions. It was concluded that the used methodology identified productive and environmental impacts derived from implemented technical interventions in dairy production systems in Honduras.

Keywords: diagnostic, environment, farms, GLEAM-i, productivity.

INTRODUCCIÓN

La ganadería contribuye globalmente con el 14,5% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que mezclan dióxido de carbono (CO_2 , 27%), metano (CH_4 , 44%) y óxido nitroso (N_2O , 29%) (Gerber *et al.* 2013; Zaman *et al.* 2021). Así, basado en un análisis de ciclo de vida es sugerido que las industrias cárnica y láctea contribuyen con un 41% y 20% del total de GEI emitidos por la ganadería mundial, respectivamente (Bhattacharyya *et al.* 2020; Histrov *et al.* 2013). Con referencia a lo anterior, se considera igualmente que la fermentación entérica, el manejo del estiércol, su depósito y aplicación a las pasturas o cultivos, la producción de alimento, posproducción y el cambio de uso de suelo contribuyen en un 39,1, 25,9, 21,1, 2,9 y 9,2%, respectivamente, al total de GEI del sector agropecuario (Gerber *et al.* 2013; Thompson y Rowntree 2020).

En este aspecto, en Latinoamérica y el Caribe (LAC), el gran desafío ganadero es producir proteína animal para abastecer una población creciente, contribuir al desarrollo socioeconómico y cultural, y

liderar el debate relacionado con el deterioro de los ecosistemas y el deterioro ambiental (Fonseca *et al.* 2009). Efecto negativo cuantificado en LAC por la emisión estimada de 1,8 gigatoneladas (1 gigatón equivalente a 1.000.000.000 t) de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$) (Gerber *et al.* 2013). Así, un incremento proyectado en la demanda de carne (57%) y leche (62%) en los próximos 30 años (Alexandratos y Bruinsma 2012) podría ser asociada, no solo, con un aumento del poder adquisitivo regional (Thornton 2010; Wright *et al.* 2012), sino también con el incremento de las emisiones sectoriales y totales de GEI (Leip *et al.* 2015).

Según el Instituto Nacional de Estadística de Honduras (INE) (2008), de las 3.264.339 ha disponibles en el país, 54% están relacionadas con la siembra de pasturas, 29% con cultivos y 17% con otros rubros agropecuarios. En este contexto Sánchez (2014) informó que aproximadamente 60% de las tierras ganaderas son onduladas o de laderas de alta pendiente y cercano a un 32% del área presentan una marcada degradación. No obstante,

Holman *et al.* (2004) estimaron que más de 350.000 familias están relacionadas con sistemas ganaderos extensivos. De esos sistemas de producción familiar, el 92% de productores posee menos de 50 ha (Pérez *et al.* 2006). Además, esta población rural incluye comunidades indígenas de escasos recursos, especialmente en las zonas sur, oeste y en la frontera oriental del país, ya que las zonas Norte y Centro son industriales (Sanders *et al.* 2019). Con todo, las comunidades rurales no solo son impactadas por un clima progresivamente variable, una deficiente planificación agropecuaria, una desmedida urbanización, también lo son por las falencias en el control del uso de los recursos naturales estratégicos y del medioambiente (Sanders *et al.* 2015).

En suma, el INE (2008) reportó 96.622 sistemas de producción ganadera. El 76, 15 y 9% de estos son catalogados como de doble propósito, lecheros y cárnicos, respectivamente. Sin embargo, en conjunto fueron agrupados en términos de una baja productividad y rentabilidad (Sánchez 2014). A pesar de esto, la industria ganadera hondureña genera aproximadamente el 13% del producto interno bruto (PIB) del país, lo que involucra el 36% de la población económicamente activa a través de 180.000 empleos directos (Tobar *et al.* 2017). No obstante, es evidente que la contribución de la ganadería al PIB del país se redujo en un 40% entre 1990 y 2018 (Canu *et al.* 2018). Teniendo en cuenta este contexto de altas disparidades, la ganadería hondureña reafirma la continuada necesidad de generar y aplicar estrategias de sostenibilidad (ambiental, social y económica) que generen una amplia gama de alternativas productivas sostenibles (Sánchez 2014).

En este entorno, Honduras se adhirió a la Convención Marco de las Naciones

Unidas sobre el Cambio Climático y, en el año 2015, al Acuerdo de París, comprometiéndose a reducir las emisiones de GEI en 15% para el año 2030 (Canu *et al.* 2018; ONU 2021). Por ello es imperativa la colaboración entre los sectores público y privado, de ámbitos nacionales e internacionales, y la Academia para cuantificar y mitigar el impacto ambiental de la ganadería. Consecuentemente, el objetivo de la presente investigación fue la caracterización productiva y de emisiones modeladas de GEI en fincas lecheras agrupadas en cinco regiones de Honduras. Esto, estableciendo las diferencias entre un diagnóstico en una fase inicial (FI) y uno de seguimiento en la fase final (FF).

MATERIALES Y MÉTODO

Contexto regional del estudio

Considerando la ubicación estratégica, el requerimiento de tecnologías y la capacidad demostrativa, 61 predios fueron seleccionados a través de 12 departamentos (figura 1). Las fincas priorizadas fueron intencionalmente agrupadas en las regiones de Aguán, Atlántida, Centro-Sur-Oriente, Norte y Occidente considerando que el 74% del inventario nacional de ganado bovino y el 71% de la producción láctea nacional se concentra en ellas (INE 2008).

La elaborada región de Aguán comprendió los departamentos de Colón y Yoro; la Atlántida, el de Atlántida; y la Centro-Sur-Oriente, los de Olanchito, Francisco Morazán, El Paraíso y Valle. La región Norte comprendió los de Cortes, Yoro y Comayagua, mientras que la región de Occidente sumó Santa Bárbara, Copán y Lempira. La precipitación departamental oscila entre 400 y 2400 mm. Comayagua y Francisco Morazán son los departamentos



FIGURA 1. Distribución de sistemas lecheros encuestados en los departamentos de Atlántida, Colón, Comayagua, Copan, Cortes, El Paraíso, Francisco Morazán, Lempira, Olancho, Santa Barbara, Valle y Yoro de Honduras

Fuente: adaptado de Marín López (2020).

más secos, y Colón el más húmedo (FAO 2015). Valle es el más cálido (29°C) y Copán, Santa Bárbara y Lempira los más templados (23°C). El periodo de lluvias (6-7 meses) normalmente inicia en el mes de abril en Copán, Santa Bárbara y Lempira, en mayo en los restantes. No obstante, en Colón, las lluvias son casi permanentes (FAO 2015).

Recolección de datos en las fincas

Siguiendo un diseño de investigación cualitativo (Navas Ríos 1999; Ranjan *et al.* 2019), una evaluación conceptual cuantitativa (Weißhuhn *et al.* 2018) y posterior narrativa, el estudio aplicó individualmente a los productores encuestas semiestructuradas en la FI (noviembre 2018) y en la FF (septiembre 2019). Estas caracterizaron conjuntamente los sistemas de producción, uso de la tierra, inventario, nutrición y

manejo animal, manejo forrajero y del estiércol, costos fijos y variables de producción e ingresos. En forma individual, la FI diagnosticó la condición inicial de la finca identificando puntos críticos para con ello diseñar un programa propio de asistencia técnica con dos visitas al mes como mínimo. Así, la FF cuantificó el impacto técnico y medioambiental de las discusiones e intervenciones.

Programa de asistencia técnica e intervención

El esquema incluyó aspectos administrativos y de manejo, nutrición, reproducción, mejoramiento genético y sanidad animal. El uso de registros de producción, reproducción, sanidad y económicos fue primordial, en compañía de la evaluación de la oferta forrajera fresca y de materia seca (MS). Esto último, para balancear

las necesidades nutricionales de los hatos y usando cercas eléctricas para promover sistemas ajustados de pastoreo rotacional intensivo. Los cambios introducidos igualmente contemplaron capacitación en prácticas de ordeño y el uso efectivo de inseminación artificial.

Variables relevantes para la modelación

En las regiones, se consideraron la estructura y las dinámicas productivas del hato, los recursos de alimentación y el manejo del estiércol a nivel de finca. Así, la interacción de la base alimenticia, el enfoque de producción y el manejo animal permitieron la escalabilidad de los sistemas de producción en términos de pastoreo (PAS) y mixtos (MIX) (Gerssen-Gondelach *et al.* 2017; Robinson 2011; Seré *et al.* 1996).

Normativamente, se aceptó que un sistema PAS es definido por el uso de pasturas de crecimiento corto (< 60 días) orientadas a satisfacer como mínimo el 80% del consumo diario de MS, un reducido uso de concentrado de baja calidad nutricional y una baja productividad animal debido a un sistema extensivo de pastoreo. En síntesis, el sistema MIX reflejó el uso de pasturas con una carga animal más intensa y el suministro de alimentos concentrados de mediana y alta calidad que son obtenidos de cultivos con ciclos de crecimiento mayores a 60 días, que aportaron más del 20% en consumo MS/día (Gondelach *et al.* 2017; Robinson 2011; Seré *et al.* 1996).

La estructura del hato incluyó el número total de animales, hembras y machos adultos, edad en el primer parto, fertilidad de hembras adultas, mortalidad en machos y hembras jóvenes, mortalidad en adultos, reemplazo de las hembras adultas, peso al nacimiento y de hembras y machos adul-

tos. La producción lechera fue ajustada a 305 días de lactancia. El 100% de la MS contenida en las dietas fue dividido entre las fuentes de alimentación disponibles. Ellas incluyeron pasto fresco, heno o ensilaje de pasto, ensilaje de plantas de grano entero como el sorgo (*Sorghum vulgare*), maíz (*Zea mays*) y soya (*Glycine max*). Subproductos industriales incluyeron harina de almendra de palma (*Elaeis guineensis*), cebada (*Hordeum vulgare*) y melaza de caña (*Saccharum officinarum*).

La totalidad del estiércol se fraccionó de acuerdo con el requerimiento del modelo. El mismo incluyó utilización en pasturas o campo, distribución diaria, almacenamiento sólido, lote seco, líquido, laguna anaeróbica, combustión y almacenamiento en pozos y digestor anaeróbico (FAO 2017; IPCC 2019).

Estimación de gases de efecto invernadero

El uso del modelo de evaluación ambiental de la ganadería global-interactivo (GLEAM-i, por sus siglas en inglés) estimó las emisiones de GEI (CH_4 , N_2O , CO_2) durante las fases del estudio. Brevemente, el modelo GLEAM-i requiere una base de datos en Microsoft Excel® considerando principalmente la estructura del hato, los recursos de alimentación y el manejo del estiércol (FAO 2017). Los cálculos en términos de $\text{CO}_2\text{-eq}$ son generados considerando el potencial de calentamiento global de 34 y 298 para el CH_4 y el N_2O , respectivamente (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC] 2014). Detalladas fuentes de emisión consideradas por el GLEAM-i para totalizar las dinámicas de GEI resultantes son sumarizadas en la tabla 1. Características adicionales del GLEAM-i están disponibles en <http://gleami.org/>.

TABLA 1. Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero relacionadas con la estructura de modelación del modelo de evaluación ambiental de la ganadería global-interactivo (GLEAM-i)

Fuente de emisión	Descripción
Metano	
Fermentación entérica	Digestión microbiana en rumiantes y cerdos
Manejo del estiércol	Descomposición anaerobia de material orgánico en excretas
Óxido nítrico	
Producción de alimento	Aplicación de estiércol y fertilizantes nitrogenados en los cultivos
Manejo del estiércol	Conversión de compuestos nitrogenados presentes en las excretas
Dióxido de carbono	
Producción de alimento	Producción, procesamiento y transporte de alimentos
Cambio de uso del suelo	Expansión cultivos y pasturas
Uso de energía directo	Energía requerida esencialmente para la producción animal
Uso de energía indirecto	Energía utilizada en la construcción de instalaciones, adecuación de equipos y alojamiento animal

Fuente: adaptado de FAO (2017).

Análisis estadístico

Los cálculos e indicadores finales generados por el modelo FAO permitieron un análisis que consideró un diseño completamente al azar con un arreglo factorial de 5 × 2 × 2 niveles. De esta manera, los efectos de región (Aguán, Atlántida, Centro-Sur-Oriente, Norte y Occidente), sistemas de producción (PAS y MIX), fases de intervención (FI y FF) y la interacción de región, sistemas de producción y fases de intervención fueron consideradas en SAS 2019 (versión 9.4) para el análisis de varianza.

Modelos lineales mixtos generalizados (GLMM, por sus siglas en inglés) del procedimiento GLIMMIX calcularon las medias de mínimos cuadrados (LSM, por sus siglas en inglés) utilizando la función LSMEANS, mientras las diferencias para todos los efectos fijos fueron ajustadas por comparación múltiple a través del método Tukey-Kramer. Todos los análisis consideraron la variable finca como efecto aleatorio. Las diferencias entre LSM fueron declaradas cuando *p* ≤ 0,05 y las tendencias declaradas cuando *p* ≤ 0,10.

RESULTADOS

Características de los hatos

La extensión promedio de las fincas fue de 127,6 ± 145,7 ha (rango 16-950 ha). Los sistemas productivos de mayor área promedio se localizaron en las regiones de Centro-Sur-Oriente (249 ha) y Occidente (117 ha), mientras que fincas de 80, 93 y 87 ha fueron, respectivamente, caracterizadas en las regiones de Aguán, Atlántida y Norte. Al mismo tiempo, las gramíneas más importantes de pastoreo en las cinco regiones fueron las de los géneros *Brachiaria* spp. y *Panicum* spp.

En la FI, 8698 animales fueron censados. Este censo incrementó el 7,4% en la FF. De los 61 hatos, 31 fueron clasificados como sistemas MIX y la diferencia como sistemas PAS. En esta estructura, durante la FI y la FF, los sistemas PAS fueron representativos para el 54% (4732) y 56% (7085) del total de animales, respectivamente. El rendimiento lácteo ajustado a 305 días en el sistema PAS en la FI fue 40% menor que en el sistema MIX; sin embargo, esa diferencia se redujo a un 26% en la FF (tabla 2). En la FI, la

TABLA 2. Características descriptivas de sistemas de producción de pastoreo y mixtos durante las fases inicial (FI) y final (FF) de la investigación

Parámetros	Pastoreo		Mixtos	
	FI	FF	FI	FF
Número total de animales	168 ± 26	190 ± 26	137 ± 26	135 ± 26
Hembras adultas	67 ± 11	69 ± 11	63 ± 11	60 ± 11
Toros	6 ± 12	7 ± 11	6 ± 12	5 ± 13
Animales jóvenes	99 ± 11	118 ± 11	73 ± 11	77 ± 11
Edad al primer parto (meses)	35,1 ± 0,92	32,8 ± 0,92	31,0 ± 0,92	30,5 ± 0,92
Fertilidad hembras adultas (%)	68,6 ± 2,50	68,3 ± 2,50	67,9 ± 2,47	73,9 ± 2,47
Reemplazo hembras adultas (%)	9,8 ± 2,08	9,4 ± 2,08	9,5 ± 2,05	11,7 ± 2,05
Peso nacimiento (kg) [†]	35,0	35,9 ± 0,37	35,0	36,1 ± 0,36
Peso hembras adultas (kg)	506,3 ± 7,45	424,6 ± 7,45	503,4 ± 7,35	428,5 ± 7,35
Peso machos adultos (kg) [†]	650	601,3 ± 11,21	650	581,0 ± 12,01
Producción lechera (kg)*	1767 ± 166,7	2120 ± 166,7	2945 ± 165,9	2871 ± 165,9
Mortalidad hembras jóvenes (%) [†]	20,0	1,8 ± 0,50	20,0	2,4 ± 0,50
Mortalidad machos jóvenes (%) [†]	20,0	8,4 ± 2,10	20,0	4,1 ± 2,07
Mortalidad animales adultos (%) [†]	3,0	1,0 ± 0,19	3,0	0,9 ± 0,19

[†]Valores durante la FI fueron reportados empíricamente por los productores.

Los datos son medias de mínimos cuadrados ± error estándar de las medias.

*Ajustada a 305 de lactancia teniendo en cuenta hembras de todas las edades.

mortalidad estimada para animales jóvenes fue 6,5 veces mayor que lo reportado para los animales adultos. En la FF, la mortalidad entre los sistemas PAS y MIX fue similar para los animales adultos, pero, comparado con la FI, la mortandad de hembras y machos jóvenes en conjunto se redujo un 36% (tabla 2).

Recursos de alimentación

En la FI los sistemas PAS usaron forraje fresco (80,5%, figura 2), nativo e introducido

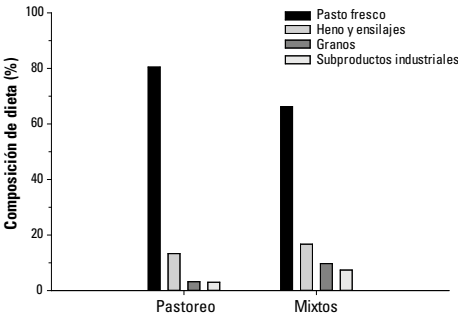


FIGURA2. Caracterización de recursos alimenticios en dietas de sistemas hondureños de producción lechera

en forma continua, y cercas perimetrales. En contraste en la FF los sistemas PAS implementaron el uso de cercas eléctricas para división de potreros, lo que promovió un manejo más eficiente de la base forrajera. El porcentaje de consumo de pasto fresco en los sistemas MIX fue, en promedio, 66,2% (figura 2), mientras que el uso del heno (pasto), el ensilaje (maíz y sorgo) y los subproductos industriales fueron mayores durante los ordeños MIX que en los ordeños PAS (figura 2).

Manejo del estiércol

En los sistemas PAS y MIX cinco prácticas de manejo del excremento fueron identificadas: defecación en el potrero; aplicación manual a las pasturas dentro de las 24 horas posteriores a la excreción, apilamiento fresco durante varios días, utilización seca y almacenamiento del lavado de áreas de ordeño y corrales en tanques o estanques por menos de un año. Se comprobó la deposición en el potrero como la práctica más común (PAS: 70% vs. MIX: 61%). Así mismo, con respecto a la FI, se observó un incremento (11%) en el uso diario durante la FF en los sistemas MIX, mientras que allí, el almacenamiento de lavados disminuyó (7%) y la conservación seca (20%) fue constante para todas las interacciones de fase y sistema.

Emisiones estimadas de GEI

En conjunto las 61 fincas encuestadas emitieron un total de GEI de 25.038 t CO₂-eq/año, emisión que se redujo en un 10,5% (2633 t CO₂-eq) para la FF. Consecuentemente, el 88% de los sistemas productivos mostró una reducción en cualquiera de los GEI estudiados. Así, independientemente de las fases, el 63, 28 y 9% fueron los promedios de las

emisiones totales de CH₄, N₂O y CO₂, respectivamente.

En términos del CH₄ emitido, las diferencias provenientes de la fermentación entérica y el manejo del estiércol fueron significativas ($p \leq 0,01$) tanto en la FI (91,6 $\pm$ 0,91% vs. 8,4 $\pm$ 0,91%) como en la FF (95,7 $\pm$ 0,91% vs. 4,3 $\pm$ 0,91%). Comparado con las emisiones totales de CH₄, en la FI, las emisiones fueron 10,5% menores (1671 t CO₂-eq/año) que durante la FF. En este entorno, el N₂O total emitido se derivó de la deposición y aplicación de estiércol en las pasturas y cultivos (83-85%), fertilizantes para praderas y cultivos de uso animal (10%) y manejo del estiércol (5-7%).

Sin embargo, la diferencia del total de N₂O emitido entre la FI y FF no fue estadísticamente significativa (760 t CO₂-eq/año). Las emisiones de CO₂ se generaron principalmente por la producción, transformación y transporte de piensos (73-76%), así como por el consumo de energía directa en los sistemas productivos (21-23%).

La diferencia en emisiones totales de GEI entre las regiones Centro-Sur-Oriente y Norte fueron significativas ($p \leq 0,05$), al igual que las emisiones de GEI/animal ($p = 0,02$, tabla 3) y la interacción entre regiones y sistemas ($p = 0,04$). Las emisiones totales de GEI para los sistemas productivos PAS y MIX son presentados en la tabla 4. El total de GEI tendió a ser mayor en el sistema PAS que en la contraparte ($p \leq 0,10$), pero las emisiones por animal entre los dos sistemas fueron similares. En paralelo, comparado con el sistema PAS, las emisiones de GEI/kg de proteína en leche fueron 37% menores en el sistema MIX ($p \leq 0,0001$).

En forma individual, aun cuando entre los sistemas productivos las emisiones de CH₄ y N₂O tendieron a ser diferentes ($p \leq 0,10$) y las emisiones de CO₂ fueron similares, las emisiones por animal fueron

TABLA 3. Gases de efecto invernadero (GEI, CO₂-eq) provenientes de sistemas productivos lecheros en conformadas regiones de Honduras

Parámetro	Región				
	Aguán	Atlántida	Centro-Sur-Oriente	Norte	Occidente
GEI					
t/año	357,58 ± 73,42 ^{ab}	411,96 ± 80,00 ^{ab}	532,56 ± 66,62 ^a	300,32 ± 73,42 ^b	443,06 ± 80,00 ^{ab}
t/animal/año	2,58 ± 0,13 ^a	2,94 ± 0,15 ^a	2,28 ± 0,12 ^b	2,74 ± 0,13 ^a	2,74 ± 0,15 ^a
kg/kg proteína láctea	79,01 ± 6,20 ^b	84,90 ± 6,68 ^{ab}	96,86 ± 5,67 ^a	88,01 ± 6,19 ^{ab}	85,05 ± 6,68 ^{ab}
CH₄					
t/año	229,65 ± 47,03 ^{ab}	261,04 ± 51,24 ^{ab}	334,83 ± 42,67 ^a	189,52 ± 47,03 ^b	277,09 ± 51,23 ^{ab}
kg/animal/año [†]	48,51 ± 2,62 ^a	54,51 ± 2,87 ^a	42,95 ± 2,37 ^b	50,83 ± 2,63 ^a	50,14 ± 2,87 ^a
N₂O					
t/año	93,56 ± 21,46 ^b	106,80 ± 23,40 ^{ab}	150,41 ± 19,46 ^a	84,95 ± 21,46 ^b	128,46 ± 23,40 ^{ab}
kg/animal/año [†]	2,30 ± 0,17 ^a	2,75 ± 0,18 ^a	1,82 ± 0,15 ^b	2,64 ± 0,17 ^a	2,68 ± 0,18 ^a
CO₂					
t/año	34,28 ± 7,17 ^{ab}	44,09 ± 7,80 ^{ab}	47,31 ± 6,51 ^a	25,90 ± 7,17 ^b	37,36 ± 7,80 ^{ab}
kg/animal/año [†]	252,96 ± 19,98 ^{ab}	270,60 ± 21,85 ^{ab}	281,18 ± 18,08 ^a	228,63 ± 19,98 ^b	239,98 ± 21,84 ^{ab}

Dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq).
[†]Valores de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂) derivados de la modelación son expresados en kg de cada gas.
Medias de mínimos cuadrados ± error estándar de la media seguidas por letras diferentes dentro del mismo parámetro son diferentes estadísticamente (*p* ≤ 0,05).

TABLA 4. Emisiones calculadas de gases de efecto invernadero generados por sistemas alimenticios identificados en fincas lecheras

Parámetro	Pastoreo	Mixtos
Gases de efecto invernadero		
t CO ₂ -eq/año	469,77 ± 51,82 ^c	348,42 ± 51,55 ^d
t CO ₂ -eq/animal/año	2,71 ± 0,09 ^a	2,61 ± 0,09 ^a
kg CO ₂ -eq/kg proteína láctea	106,71 ± 4,73 ^a	66,83 ± 4,75 ^b
Metano		
t CO ₂ -eq/año	293,98 ± 33,21 ^c	222,86 ± 33,04 ^d
kg/animal/año [†]	49,92 ± 1,76 ^a	48,85 ± 1,74 ^a
Óxido nitroso		
t CO ₂ -eq/año	142,54 ± 15,03 ^a	83,12 ± 14,94 ^b
kg/animal/año [†]	2,71 ± 0,11 ^a	2,16 ± 0,11 ^b
Dióxido de carbono		
t CO ₂ -eq/año	33,21 ± 5,13 ^a	42,37 ± 5,12 ^a
kg/animal/año [†]	203,11 ± 13,26 ^b	306,23 ± 13,10 ^a

[†]Valores de dióxido de carbono metano y óxido nitroso procedentes de la respuesta GLEAM-i son indicados en kg de cada gas. Dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq).
Medias de mínimos cuadrados ± error estándar de la media seguidas por letras diferentes dentro del mismo parámetro son estadísticamente diferentes (ab: *p* ≤ 0,05; cd: *p* ≤ 0,10).

similares solamente con respecto a CH_4 . Las emisiones totales de GEI fueron similares entre FI y FF; sin embargo, en la FF, las emisiones fueron menores por animal ($p \leq 0,001$) y en relación con los kg de proteína láctea ($20,27 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$, $p < 0,000$; tabla 5). Las emisiones totales e individuales de gases fueron similares, pero, a pesar de ello, cuando se expresaron por animal las de CH_4 y N_2O fueron significativamente menores en la FF (tabla 5).

En promedio la principal fuente de GEI en las regiones fue el CH_4 , seguido por las variaciones en el N_2O y el CO_2 (tabla 6). Comparado con el sistema PAS, las emisiones totales de CH_4 entérico fueron menores en el sistema MIX (39%, $p = 0,04$), efecto igualmente observado en términos del N_2O proveniente del estiércol aplicado o depositado en las pasturas (91%, $p \leq 0,001$; figura 3). En forma contraria, las emisiones de CO_2 por el uso directo de energía fue significativamente mayor en el sistema MIX ($p \leq 0,001$, 80%; figura 3).

Discusión

El objetivo de la investigación fue la tipificación productiva y de emisiones modeladas de GEI en la ganadería lechera regional de Honduras utilizando criterios de diagnóstico y seguimiento. En ellos, encuestas, datos, simulación y análisis conformaron una aproximación al cambio tecnológico requerido para mantener o mejorar el valor socioeconómico y cultural de la industria. En términos productivos, el hallazgo más importante fue un incremento regional final de 8306 kg en el rendimiento de leche ajustado a 305 días. Esto indica que, en fincas y regiones en las que las condiciones físicas y de fertilidad de los suelos, así como de manejo animal, justifiquen económicamente la adopción de paquetes tecnológicos, la implementación puede asegurar una marcada diferenciación con respecto al impacto ambiental generado, los efectos del cambio climático y la formulación y adopción de relevantes políticas y discusiones enfocadas en la implementación de paquetes tecnológicos que contribuyan a la ganadería sostenible.

TABLA 5. Dinámicas de gases de efecto invernadero originados de predios lecheros durante las fases inicial (FI) y final (FF) de la asesoría técnica

Parámetros	FI	FF
Gases de efecto invernadero		
t $\text{CO}_2\text{-eq/año}$	430,57 $\pm$ 48,68 ^a	387,62 $\pm$ 48,68 ^a
t $\text{CO}_2\text{-eq/animal/año}$	2,85 $\pm$ 0,08 ^a	2,47 $\pm$ 0,08 ^b
kg $\text{CO}_2\text{-eq/kg proteína láctea}$	96,91 $\pm$ 4,50 ^a	76,63 $\pm$ 4,50 ^b
Metano		
t $\text{CO}_2\text{-eq/año}$	271,98 $\pm$ 31,21 ^a	244,87 $\pm$ 31,21 ^a
kg/animal/año [†]	52,82 $\pm$ 1,64 ^a	45,96 $\pm$ 1,64 ^b
Óxido nitroso		
t $\text{CO}_2\text{-eq/año}$	119,21 $\pm$ 14,12 ^a	106,46 $\pm$ 14,12 ^a
kg/animal/año [†]	2,66 $\pm$ 0,10 ^a	2,21 $\pm$ 0,10 ^b
Dióxido de carbono		
t $\text{CO}_2\text{-eq/año}$	39,33 $\pm$ 4,83 ^a	36,24 $\pm$ 4,83 ^a
kg/animal/año [†]	260,03 $\pm$ 12,43 ^a	249,31 $\pm$ 12,43 ^a

[†]Valores de dióxido de carbono metano y óxido nitroso derivados de la simulación son expresados en kg de cada gas. Dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$).

Medias de mínimos cuadrados $\pm$ error estándar de la media seguidas por letras diferentes dentro del mismo parámetro son diferentes ($p \leq 0,05$).

TABLA 6. Emisiones promedio de gases de efecto invernadero (t CO₂-eq) provenientes de fincas lecheras localizadas en regiones estructuradas de Honduras

Fuentes de emisión	Aguaán	Atlántida	Centro-Sur-Oriente	Norte	Occidente
Metano					
Entérico	204,66 ± 42,38 ^b	240,74 ± 46,13 ^{ab}	320,19 ± 38,48 ^a	170,96 ± 42,38 ^b	260,34 ± 46,13 ^{ab}
Estiércol	25,10 ± 7,58 ^a	20,28 ± 8,29 ^a	14,65 ± 6,86 ^a	18,63 ± 7,58 ^a	16,39 ± 8,28 ^a
Óxido nitroso					
Estiércol en pasturas o cultivos	78,18 ± 19,34 ^b	85,42 ± 21,08 ^{ab}	132,46 ± 17,55 ^a	68,61 ± 19,34 ^b	109,97 ± 21,08 ^{ab}
Fertilizantes	9,39 ± 1,96 ^b	12,31 ± 2,13 ^{ab}	14,34 ± 1,78 ^a	7,69 ± 1,96 ^b	11,67 ± 2,13 ^{ab}
Estiércol	6,11 ± 1,45 ^{ab}	9,06 ± 1,58 ^a	3,58 ± 1,33 ^b	9,44 ± 1,45 ^a	6,88 ± 1,58 ^a
Dióxido de carbono					
Pienso	24,01 ± 5,58 ^{ab}	33,09 ± 6,07 ^a	37,24 ± 5,07 ^a	18,16 ± 5,58 ^b	27,79 ± 6,07 ^{ab}
Energía directa	8,83 ± 1,52 ^a	8,77 ± 1,66 ^a	8,87 ± 1,38 ^a	6,39 ± 1,52 ^a	8,40 ± 1,66 ^a
Energía indirecta	0,48 ± 0,17 ^d	1,08 ± 0,18 ^c	0,68 ± 0,15 ^d	0,54 ± 0,17 ^d	0,50 ± 0,18 ^d

Dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq). Medias de mínimos cuadrados ± error estándar de las medias seguidas dentro del mismo parámetro por diferentes letras difieren estadísticamente (ab: $p \leq 0,05$; cd: $p \leq 0,10$).

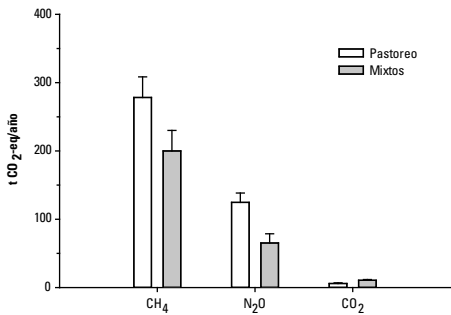


FIGURA 3. Emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de fermentación entérica (CH₄; metano), aplicación o deposición del estiércol en las pasturas (N₂O; óxido nitroso) y del uso de energía eléctrica (CO₂; dióxido de carbono) en predios de sistemas lecheros regionales en Honduras

Este nuevo perfil en la estructura productiva, derivado del cambio tecnológico, está claramente determinado por la

respuesta de los sistemas PAS en los que su rendimiento lechero se incrementó en un 20% (353 kg). La evidencia refleja una real capacidad de los productores, asistentes técnicos y la Academia para responder con eficiencia al crecimiento productivo, ya que la producción de leche ajustada fue ~70% (PAS) y ~130% (MIX), mayor que los 1250 kg descritos previamente (INE 2008).

Visto este crecimiento productivo desde el punto de vista de inventario animal se constatan al menos tres hechos. El INE (2008) estimó en Honduras un crecimiento en el inventario ganadero del 0,84% para el periodo 2003-2008, es decir, un poco mayor que el incremento animal del 0,78% reportado por FAO (2019) para el periodo 2017-2018. Sin embargo, si se considera que, en un período de 10 meses,

el presente estudio reporta un agregado en la masa ganadera del 7,4%, parecería que hay algo más que podría explicar la expansión en la producción lechera.

En efecto, podría ser posible que, en conjunto, la adaptación, transferencia y adopción de tecnologías forrajeras, el mejoramiento de la infraestructura, el mejoramiento genético, los modelos empresariales y el estímulo de políticas agropecuarias han alterado radical y silenciosamente los sistemas tradicionales productivos. Sin embargo, en lo esencial, se podría además insinuar que la industria lechera ha tenido una gran sensibilidad a las demandas culturales y de mercado en Honduras.

Al mismo tiempo, y aparentemente por primera vez, un estudio logra cuantificar y desglosar emisiones de GEI relacionadas con los sistemas lecheros regionales del país. Esta estructura, su dinámica, desarrollo y futuro uso, podría facilitar no solo una menor desigualdad en métricas ambientales en sistemas ganaderos de pastoreo de corto (Ramírez-Restrepo y Vera 2019), mediano (Ramírez-Restrepo y Vera-Infanzón 2019; Ramírez-Restrepo *et al.* 2019) y largo plazo (Ramírez-Restrepo *et al.* 2020); además, podría asistir y evaluar el efecto de las estrategias públicas y privadas orientadas al crecimiento sostenible de la ganadería y el desarrollo rural.

En este sentido, centrando el análisis en los porcentajes de CH_4 , N_2O y CO_2 modelados por el GLEAM-i en Uganda (79,3, 19,6 y 1,1%) (Kiggundu *et al.* 2019) y Pakistán (7,6, 2,8 y 6,6%) (Habib 2018), se indicaría que los sistemas lecheros monitoreados regionalmente en Honduras aparentemente serían más eficientes en términos de emisiones de CH_4 (63%), pero no en la emisión de otros GEI. Una segunda precisión en la consideración del tema se refiere a la reducción en un 21% de las emisiones de GEI/kg de leche en

la FF. Sin embargo, para tener una mejor síntesis evaluativa cabe, además, citar el rango regional de emisiones de GEI/kg de proteína láctea (79-96 kg CO_2 -eq), lo que conjuntamente reconoce el alcance productivo del presente estudio y la contribución al avance de conceptos ambientales en zonas rurales locales.

Es evidente que los valores generados acá por kg de proteína láctea son intermedios al rango de 12-140 kg CO_2 -eq sugerido por Havlík *et al.* (2014) y Herrero *et al.* (2013), superiores a los 61 kg CO_2 -eq reportados en Estados Unidos (Thoma *et al.* 2013) y a los 66,6 kg CO_2 -eq, en Costa Rica (Vega 2016). No obstante, los valores reportados por la investigación abarcan el promedio de 81 kg CO_2 -eq reportado en Nicaragua por Gaitán *et al.* (2016). Adicionalmente, en comparación con los sistemas PAS, la presente investigación clarificó el impacto de los sistemas MIX a través de una reducción de $39,87 \pm 5,32$ kg CO_2 -eq/kg proteína láctea.

Dicha diferencia, se puede deber a que los sistemas MIX se basan en una oferta alimenticia de mejor calidad, asociada al suministro de concentrados y a una administración ganadera más empresarial. Este efecto es similar al reportado por Gaitán *et al.* (2016) y Molina *et al.* (2018) en sistemas lecheros tropicales, y además es regulado por la estacionalidad climática hondureña que condiciona el manejo del hato y la calidad forrajera y de suplementación, así como las emisiones de CH_4 entérico (Rivera *et al.* 2014). Aun así, se debería tener en cuenta que la mitigación de CH_4 y la sostenibilidad ganadera probablemente se podrían lograr a través de compuestos secundarios de plantas en pastoreo y ramoneo, y en otras presentaciones razonables. Esto podría generar alternativas de adaptación al cambio

climático y aumentar la oferta tecnológica para el mejoramiento de la nutrición de rumiantes. Ramírez-Restrepo y Barry (2005) y Tedeschi *et al.* (2021) abogan por esa continuidad y congruencia.

Recientemente, el IPCC (2019) refinó las metodologías para la elaboración de inventarios de GEI en ALC, indicando factores nivel 1a de 78, 87 y 103 kg CH₄/animal/año para vacas de baja (1250 kg), mediana (2050 kg) y alta producción láctea (3400 kg), respectivamente. Empero, asumir esta estructura en Honduras sería contraproducente, ya que, si bien los sistemas PAS y MIX encajarían en términos de producción, los valores respectivos computados de $49,92 \pm 1,76$ kg vs. $48,85 \pm 1,74$ kg CH₄/animal/año para los dos sistemas precluirían el uso de los indicadores de emisión de CH₄.

En promedio las emisiones modeladas de N₂O representaron el 28% de las emisiones totales de GEI, valor coherente con previos reportes globales (Gerber *et al.* 2013; Habib 2018; Kiggundu *et al.* 2019) y en ALC (Gaitán *et al.* 2016; Molina *et al.* 2018). En este contexto, la aplicación y deposición natural del estiércol en las pasturas y cultivos generó el 84% de las emisiones totales de N₂O, coincidiendo con el 82,5% reportado por Kiggundu *et al.* (2019). Cuando se evaluaron las emisiones de N₂O entre la FI y la FF, no solo se determinó que las emisiones derivadas del manejo de la boñiga decrecieron 36%, pero estuvieron acompañadas por mejores dinámicas de uso diario del estiércol.

El rango de emisiones regionales de N₂O (1,82-2,75 kg/animal/año) coinciden con el límite bajo del rango global de emisiones (1,30-12,87 kg) propuesto por Lynch (2019) y con los factores de emisión de 0,4, 4,3 y 2,3 kg para los sistemas de pasto más cultivos, pasturas mejoradas y

silvopastoriles, individualmente reportados por Parra *et al.* (2019). Consecuentemente, es razonable asumir que la reducción en las emisiones de N₂O en la FF y en los sistemas MIX, es debida la combinación de una frecuente distribución de la bosta y una disminución en su almacenamiento (Aguirre-Villegas y Larson 2017; Forabosco *et al.* 2017; Massé *et al.* 2008).

El 75% de las emisiones totales de CO₂ se derivó de la producción, transformación y transporte de piensos. A su vez, esto representó el 9% del total de emisiones de GEI. Congruentemente, el proceso provoca no solo la necesidad de aumentar la calidad y oferta de forrajes frescos, sino que induce, a partir del otro extremo la incorporación de paquetes tecnológicos en forma íntegra que respondan a la importancia relativa de los distintos factores productivos, humanos y económicos en la agricultura moderna. En síntesis, comparados con los sistemas MIX, $103,12 \pm 18,74$ kg CO₂/animal/año menos fueron emitidos por los sistemas PAS, valores que se comportan de igual forma a los reportados por Rivera *et al.* (2016) en Colombia para sistemas silvopastoriles (589 kg CO₂/animal/año) y lechero convencional (1543 kg CO₂/animal/año). De esta forma, los niveles bajos de emisión de CO₂ en los sistemas PAS se lograrían explicar por la ausencia de suplementación comercial, instalaciones y consumo de energía que la modernización de la producción otorga.

CONCLUSIONES

El estudio combinó información cualitativa y cuantitativa e introdujo el uso del modelo FAO GLEAM-i para analizar el valor productivo y el impacto ambiental de la ganadería lechera respecto a fincas y regiones en Honduras. Comparadas las dos fases de

intervención, se identificaron reducciones en las emisiones de GEI e implícitamente incrementos en la productividad animal mucho más marcados en los sistemas PAS. Implicando con ello que existe una demora en la mejora racional y multidimensional de esos sistemas de pastoreo para prevenir deterioros socioeconómicos, culturales y medioambientales adicionales.

Beneficios relacionados con relevantes políticas y estrategias aplicables en fincas y regiones pueden surgir de la moderada reducción de la vulnerabilidad ambiental, social, económica, política y cultural ante el clima variante. Sin embargo, cualquier propuesta alternativa requerirá, dentro de sus naturales limitaciones, de diálogo, de la colaboración y concertación con los productores, y de la aprobación y la financiación de intervenciones administrativas, de mercado y de manejo animal, para reflejar la productividad y la reducción sustancial de las emisiones de GEI como las acá presentadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Fundación Nippon por la beca para los estudios de Maestría del primer autor. Igualmente, se expresa reconocimiento a Zamorano y al espíritu colaborativo de productores y asistentes técnicos en el proyecto de extensión y transferencia. Finalmente, se agradece a la ingeniera Alexandra Maribel Manueles Lorenzo de la Universidad Zamorano por su apoyo cartográfico.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que los resultados de este estudio no se ven afectados por ningún conflicto de intereses y estamos de acuerdo con la publicación de este manuscrito.

Fuentes de financiación

Para el desarrollo de este trabajo no se recibieron fondos de ninguna entidad.

REFERENCIAS

- Aguirre-Villegas HA, Larson RA. 2017. Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *J Cleaner Prod.* 143:169-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.133>.
- Alexandratos N, Bruinsma J. 2012. *World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. Rome: ESA Working Paper No. 12-03. P.154.
- Bhattacharyya P, Pathak H, Pal S. 2020. *Climate smart agriculture. Concepts, challenges, and opportunities*. Singapore: Springer (Green Energy and Technology).
- Canu FA, Wretling PH, Audia I, Tobar D, Andrade H. 2018. NAMA para un sector ganadero bajo en carbono y resiliente al Clima en Honduras. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015. *Perfil de País: Honduras. Versión 2015. AQUASTAT informes*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. *Global Livestock Environmental Assessment Model-interactive: A tool for estimating livestock production, greenhouse gas emissions and assessing intervention scenarios. Versión 2.0*. Roma: FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), editor. 2019. *FAOSTAT statistics database*. Roma: FAO. <http://www.fao.org/faostat/en/>
- Fonseca C, Rosegrant MW, Fernández M, Sinha A, Alder J, Ahammad H, Fraiture C, Eickhout B, Huang J, Koyama O, Omezzine AM, Pingali P, Ramírez R, Ringler C, Robinson S, Thornton P, van Vuuren D, Yana-Shapiro H. 2009. *Looking into the future for agriculture and AKST*. Washington, D. C: International Assessment of Agricultural Knowledge, Science, and Technology (IAASTD).
- Forabosco F, Chitchyan Z, Mantovani R. 2017. Methane, nitrous oxide emissions and mitigation strategies for livestock in developing

- countries: A review. *J Anim Sci.* 47(3):268. <https://doi:10.4314/sajas.v47i3.3>.
- Gaitán L, Läderach P, Graefe S, Rao I, Van der Hoek R. 2016. Climate-Smart Livestock Systems: An Assessment of Carbon Stocks and GHG Emissions in Nicaragua. *Plos One.* 11(12): e0167949. <https://doi:10.1371/journal.pone.0167949>.
- Gerber P, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman, J, Falcucci A, Tempio G. 2013. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. ISBN: 9789251079218.
- Gerssen-Gondelach SJ, Lauwerijssen RBG, Havlík P, Herrero M, Valin H, Faaij APC, Wicke B. 2017. Intensification pathways for beef and dairy cattle production systems: Impacts on GHG emissions, land occupation and land use change. *Agric Ecosyst Environ.* 240:135-147. <https://doi:10.1016/j.agee.2017.02.012>.
- Habib G. 2018. Estimation and mitigation of GHG emissions from ruminant livestock in Pakistan. *Anim Prod Sci.* 59(8):1558. <https://doi:10.1071/AN17743>.
- Havlík P, Valin H, Herrero M, Obersteiner M, Schmid E, Rufino MC, Mosnier A, Thornton PK, Böttcher H, Conant RT, Frank S, Fritz S, Fuss S, Kraxner F, A Notenbaert A. 2014. Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proc Natl Acad Sci.* 111(10):3709-3714. <https://doi:10.1073/pnas.1308044111>.
- Herrero M, Havlík P, Valin H, Notenbaert A, Rufino MC, Thornton PK, Blümmel M, Weiss F, Grace D, Obersteiner M. 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proc Natl Acad Sci.* 110(52):20888-20893. <https://doi:10.1073/pnas.1308149110>.
- Histrov AN, Oh J, Lee C, Meinen R, Montes F, Ott T, Firkins J, Rotz A, Dell C, Adesogan A, Yang W, Tricarico J, Kebreab E, Waghorn G, Dijkstra J, Oosting S. 2013. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions. Roma: FAO.
- Holmann F, Argel P, Rivas L, White D, Estrada RD, Burgos C, Perez E, Ramirez G, Medina A. 2004. Degradación de pasturas y pérdidas de productividad animal: Una evaluación económica desde la perspectiva de los productores y extensionistas pecuarios en Honduras. Costa Rica: ILRI, DICTA, CIAT, CFC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis [Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo]. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Suiza: IPCC.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), editor. 2008. Encuesta Agrícola Nacional 2007-2008. Tegucigalpa. Honduras.
- Kiggundu N, Ddungu S, Wanyama J, Cherotich S, Mpairwe D, Zziwa E, Mutebi F, Falcucci A. 2019. Greenhouse gas emissions from Uganda's cattle corridor farming systems. *Agric Syst.* 176:102649. <https://doi:10.1016/j.agry.2019.102649>.
- Leip A, Billen G, Garnier J, Grizzetti B, Lassaletta L, Reis S, Simpson D, Sutton M, Vries W de, Weiss F, Westhoek H. 2015. Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environ Res Lett.* 10(11):115004. <https://doi:10.1088/1748-9326/10/11/115004>.
- Lynch J. 2019. Availability of disaggregated greenhouse gas emissions from beef cattle production: a systematic review. *Environ Impact Assess Rev.* 76:69-78. <https://doi:10.1016/j.eiar.2019.02.003>.
- Marín-López D. 2020. Estimación preliminar productiva y modelada de las emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de leche de Honduras. [Tesis de Maestría]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Massé DI, Masse L, Claveau S, Benchaar C, Thomas O. 2008. Methane Emissions from Manure Storages. *Transactions of the ASABE.* 51(5):1775-1781. <https://doi:10.13031/2013.25311>.
- Molina RA, Sánchez H, Mateus D. 2018. Livestock Greenhouse Gases Emissions Under Grazing Conditions in the Tropic Livestock

- Greenhouse Gases Emissions Under Grazing Conditions in the Tropic. *Rev Investig Agrar Ambient*. 10(1):91-106. <https://doi.org/10.22490/21456453.2685>.
- Navas Ríos CL. 1999. Caracterización socioeducativa, evaluativa y comparativa de cuatro comunidades en los Llanos Orientales de Colombia [Tesis de Maestría]. [Medellín, Colombia]. Universidad de Antioquia.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2021. Cambio Climático. Nueva York, Estados Unidos. Disponible en línea en <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>.
- Parra AS, Figueiredo EB, Bordonal RO, Moitinho MR, Teixeira DDB, La Scala N. 2019. Greenhouse gas emissions in conversion from extensive pasture to other agricultural systems in the Andean region of Colombia. *Environ Dev Sustain*. 21(1):249-262. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0034-6>.
- Pérez E, Holmann F, Schuetz P, Fajardo E. 2006. Evolución de la Ganadería Bovina en Países de América Central: Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); International Livestock Research Institute (ILRI).
- Ramírez-Restrepo CA, Barry TN. 2005. Alternative temperate forages containing secondary compounds for improving sustainable productivity in grazing ruminants. *Anim Feed Sci Tech*. 120(3-4):179-201. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.01.015>.
- Ramírez-Restrepo CA, Vera RR, Rao IM. 2019. Dynamics of animal performance, and estimation of carbon footprint of two breeding herds grazing native neotropical savannas in eastern Colombia. *Agric Ecosyst Environ*. 281:35-46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.004>.
- Ramírez-Restrepo CA, Vera-Infanzón RR. 2019. Methane emissions of extensive grazing breeding herds in relation to the weaning and yearling stages in the Eastern Plains of Colombia. *Rev Med Vet Zoot*. 66(2):111-130. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v66n2.82429>.
- Ramírez-Restrepo CA, Vera RR. 2019. Bodyweight performance estimated carcass traits and methane emissions of beef cattle categories grazing *Andropogon gayanus*, *Melinis minutiflora* and *Stylosanthes capitata* mixed swards and *Brachiaria humidicola* pasture. *Anim Prod Sci*. 56(4):729-750. <https://doi.org/10.1071/AN17624>.
- Ramírez-Restrepo CA, Vera-Infanzón RR, Rao IM. 2020. Predicting methane emissions, animal-environmental metrics and carbon footprint from Brahman (*Bos indicus*) breeding herd systems based on long-term research on grazing of neotropical savanna and *Brachiaria decumbens* pastures. *Agric Syst*. 184:102892. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102892>.
- Ranjan P, Church P, Floress K, Prokopy S. 2019. Synthesizing Conservation Motivations and Barriers: What Have We Learned from Qualitative Studies of Farmers' Behaviors in the United States? *Soc Nat Resour*. 32(11):1171-1199. <https://doi.org/10.1080/08941920.2019.1648710>.
- Rivera F, Rivera R, Benavides L, Sanchez J, Barahona R. 2014. Análisis de ciclo de vida en la producción de leche: comparación de dos hatos de lechería especializada. *Livestock Res for Rural Dev*. 26(112).
- Rivera J, Barahona R. 2016. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Trop Sub Agroeco*. 19(3):237-251.
- Robinson TP. 2011. Global livestock production systems. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. xiv, 152. ISBN: 9251070334; [consultado el 9 de abr. de 2020]. <http://www.fao.org/3/i2414e/i2414e.pdf>.
- Sánchez B. 2014. Sistemas Silvopastoriles en Honduras: Una Alternativa para Mejorar la Ganadería. Tegucigalpa. Honduras.
- Sanders A, McLean D, Manueles A. 2015. Land Use and Climate Change Impact on the Coastal Zones of Northern Honduras. Sustainability of Integrated Water Resources Management. Springer, Cham. P. 505-530.
- Sanders A, Thomas S, Rios A, Dunston S. 2019. Climate Change, Agriculture, and Adaptation Options for Honduras. The International Food Policy Research Institute (IFPRI). Tegucigalpa, Honduras.
- Statistical Analysis System (SAS). 2019. SAS. 9.4. Cary, NC: SAS Institute.

- Seré C, Stenfield H, Groenewold J. 1996. World livestock production systems: Current status, issues and trends. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Tedeschi LO, Muir JP, Naumann H, Norris A, Ramírez-Restrepo CA, Talcott S. 2021. Nutritional and methodological aspects of ecologically relevant phytochemicals in ruminant production. *Front Vet Sci*, 8:685262. <https://www.readcube.com/articles/10.3389/fvets.2021.628445>. DOI: 10.3389/fvets.2021.628445.
- Thoma G, Popp J, Nutter D, Shonnard D, Ulrich R, Matlock M, Kim DS, Neiderman Z, Kemper N, East C, Adom F. 2013. Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. *Int Dairy J*. 31:S3-S14. <https://doi:10.1016/j.idairyj.2012.08.013>.
- Thompson LR, Rowntree JE. 2020. Invited Review: Methane sources, quantification, and mitigation in grazing beef systems. *Appl Anim Sci*. 36, 4:556-573. <https://doi:10.15232/aas.2019-01951>.
- Thornton PK. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. *Philos. Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 365(1554):2853-2867. <https://doi:10.1098/rstb.2010.0134>.
- Tobar D, Vega A, Jiménez JA, Díaz R, Sepúlveda C. 2017. Prácticas de manejo para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en fincas ganaderas en Honduras. Tegucigalpa, Honduras: NCF, CATIE, FONTAGRO, UNEP DTU Partnership.
- Vega A. 2016. Análisis de herramientas para la estimación de gases de efecto invernadero (GEI) y su aplicación en sistemas de producción doble propósito en fincas ganaderas de la cuenca del río Jesús María, Costa Rica. Tesis de Maestría en Ciencias. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Weißhuhn P, Helming K, Ferretti J. 2018. Research impact assessment in agriculture—A review of approaches and impact areas. *Res Eval*. 27(1):36-42. <https://doi:10.1093/reseval/rvx034>.
- Wright IA, Tarawali S, Blümmel M, Gerard B, Teufel N, Herrero M. 2012. Integrating crops and livestock in subtropical agricultural systems. *J Sci Food Agric*. 92(5):1010-1015. <https://doi:10.1002/jsfa.4556>.
- Zaman M, Heng L, Müller C. 2021. Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using nuclear and related techniques. Cham: Springer International Publishing.

Forma de citación del artículo:

Marín-López D, Matamoros-Ochoa IA, Ramírez-Restrepo CA. 2022. Dinámicas de producción y emisiones modeladas de gases de efecto invernadero en sistemas regionales de producción lechera de Honduras. *Rev Med Vet Zoot*. 69(1): 46-62. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101526>