

EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE LA GANADERÍA BOVINA DE MÉXICO: LA IMPORTANCIA DE CONTAR CON INVENTARIOS NACIONALES PRECISOS Y DE ESTRATEGIAS VIABLES DE MITIGACIÓN

METHANE EMISSIONS FROM ENTERIC FERMENTATION OF MEXICAN CATTLE: THE IMPORTANCE OF ACCURATE NATIONAL INVENTORIES AND VIABLE MITIGATION STRATEGIES

María Fernanda Vázquez-Carrillo¹, Juan Carlos Ku-Vera², Manuel González-Ronquillo³, Epigmenio Castillo-Gallegos¹, Ermias Kebreab⁴, Octavio Alonso Castelán-Ortega^{3†}.

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, carretera Mérida-Xmatkuil km 15.5, Mérida, Yucatán, México

³Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del estado de México. Instituto Literario 100, Colonia Centro, Toluca, CP 50000, Estado de México

⁴Department of Animal Science, University of California, Davis, CA 95616, USA.

†Autor para correspondencia: oacastelano@uaemex.mx

RESUMEN

El sector ganadero contribuye al calentamiento global con el 18% de la emisión antropogénica total de gases de efecto invernadero (GEI), estas emisiones tienen su origen en la producción y procesamiento de alimento para el ganado, el uso de tierra, la fermentación entérica y el manejo de desechos de los animales. Gracias a su eficiente sistema digestivo los rumiantes pueden aprovechar una gran diversidad de plantas forrajeras y transformarlas en alimentos de alto valor biológico para la humanidad, no obstante, como resultado de este proceso se pierde parte de la energía consumida por el animal en forma de gas metano (CH₄). Para el año 2018, México contaba con un inventario de casi 32 millones de cabezas de ganado bovino (la más numerosa después de las aves de corral), el cual generaba alrededor de 2039.21 ± 205.5 Gg de CH₄ al año, ocupando el octavo lugar entre los países productores de metano por fermentación entérica a nivel mundial. Por lo tanto, es importante, por un lado conocer, e identificar los factores que intervienen en la emisión de CH₄ por fermentación entérica de los bovinos en México, para mejorar la eficiencia de utilización de la energía de los alimentos por los animales y reducir las pérdidas a través del CH₄. Y, por otro lado, desarrollar métodos y procedimientos robustos para la generación de inventarios de éste gas, con el objetivo de desarrollar estrategias y políticas nacionales para la mitigación de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino en México, tales como la inclusión de plantas taníferas en la alimentación animal, y así diseñar e implementar políticas públicas adecuadas al contexto ganadero del país.

Palabras Clave: alimentación; GEI; GHG; metano; rumiantes.

ABSTRACT

The livestock sector contributes to global warming with ~18% of the total anthropogenic emission of greenhouse gases (GHG), these emissions have their origin in the production and processing of feed for livestock, land-use change, enteric fermentation and animal waste management. The efficient digestive system of ruminants can take advantage of a great diversity of forage plants and transform them into foods of high biological value for humanity. However, as a result of this process, part of the energy consumed by the animal is lost in the form of methane gas (CH₄), a potent green house gas. For 2018, Mexico had an inventory of almost 32 million head of cattle (the most numerous livestock species after poultry), which generated around 2,039.21 ± 205.5 Gg of CH₄ per year, ranking eighth among methane-producing countries by enteric fermentation worldwide. Therefore, it is crucial to know and identify the factors that intervene in the emission of CH₄ by enteric fermentation of cattle in Mexico in order to improve the efficiency of the use of energy from food by animals and reduce the losses through CH₄. On the other hand, it is necessary to develop robust methods and procedures for the calculations of inventories of this gas, aimed at developing national strategies and policies for the mitigation of methane emissions originated from enteric fermentation of cattle in Mexico. These strategies can include the inclusion of tanniferous plants as a supplement to cattle's feed, and thus design and implement appropriate public policies for the country's livestock context.

Index words: *feed; GEI; GHG; methane; ruminants.*

INTRODUCCIÓN

Debido al aumento progresivo de la población mundial y la demanda de proteínas de origen animal para consumo humano, existe una elevada preocupación por el papel que desempeñan los rumiantes domésticos en el calentamiento global, principalmente por la producción de gases de efecto invernadero (GEI), pues en forma directa contribuyen con la emisión de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) a partir de la fermentación ruminal y de óxido nitroso (N₂O) por la degradación de sus heces y orina en el ambiente (Eckard *et al.*, 2010; FAO, 2018); y en forma indirecta a través de las actividades que involucran la producción de forrajes y la conversión de bosques en pasturas para su alimentación. De acuerdo con Steinfeld *et al.* (2006) el sector ganadero emite 7.1 Gt de CO₂ eq aproximadamente, es decir, alrededor del 18% de la emisión antropogénica global de GEI. Entre los GEI que emite el ganado, el metano juega un papel muy importante ya que lo producen en grandes volúmenes, y es 28 veces más potente que el CO₂ para contribuir al efecto invernadero. Por otro lado, el metano, tiene una vida media de 9 a 15 años en la atmósfera (Eckard *et al.*, 2010), periodo relativamente corto en comparación

con otros GEI. En este contexto, los resultados de las acciones y políticas de mitigación del cambio climático, en particular para la reducción de la emisión de metano por fermentación entérica del ganado bovino, se apreciarían en el corto-mediano plazo en comparación con otros GEI en donde se tendría que esperar decenas sino cientos de años antes de observar un efecto.

En la actualidad, la mayoría de los estudios en ganadería y cambio climático en América Latina están enfocados en la cuantificación de los volúmenes de la emisión de CH₄, la determinación de los factores de emisión y el cálculo de los inventarios nacionales; pocos estudios se enfocan en el desarrollo de estrategias de mitigación (Benaouda *et al.*, 2017). Para el año 2017, México se encontró dentro de los 10 países con mayor producción de GEI, con una contribución equivalente al 1.68% de las emisiones globales (WRI, 2017) (Figura 1). Recientemente, se publicó el Primer Inventario Nacional Tier 2 de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino de México, registrando 2039.21 ± 205.5 Gg de CH₄ al año (Castelán-Ortega *et al.*, 2019), para una población aproximada de 31.8 millones de cabezas, registradas por el Padrón Ganadero Nacional (2016).

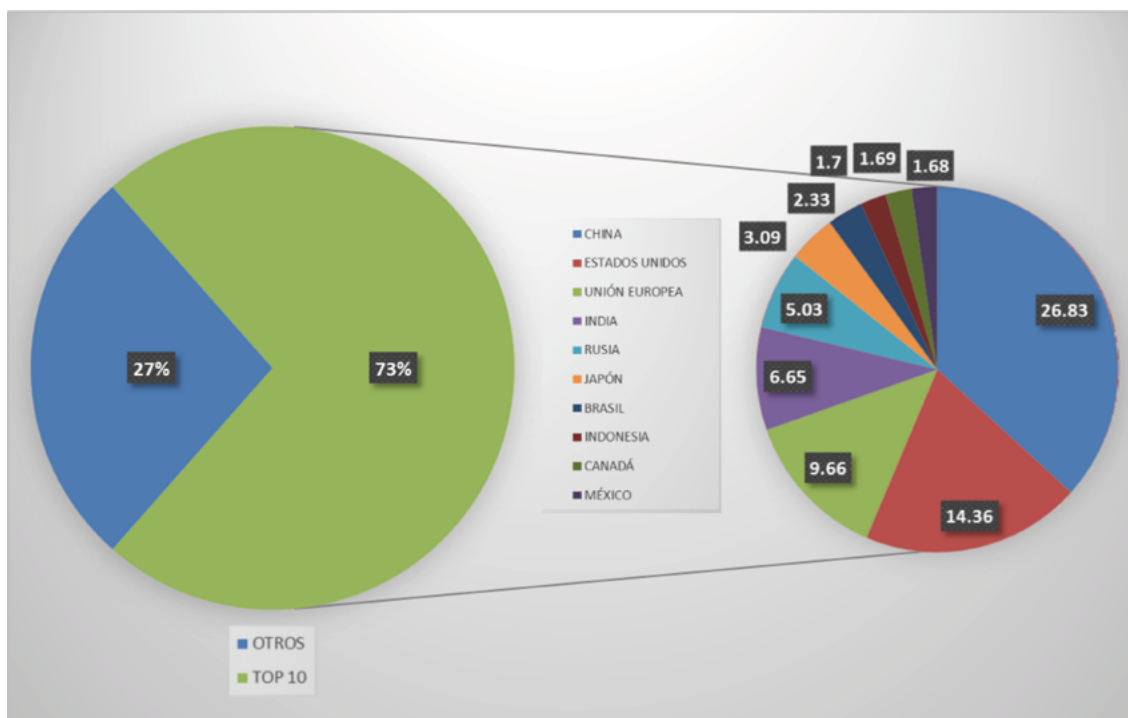


Figura 1. Principales países generadores de gases de efecto invernadero. Modificado de WRI, 2017.

Existen diferentes técnicas para cuantificar las emisiones de metano por los bovinos (es la especie doméstica que más metano emite), como son analizadores portátiles, el método trazador de gases como SF₆ (Hexafluoruro de Azufre) (Johnson *et al.*, 1994), sistema de túnel de polietileno, GreenFeed, cámaras de respiración, entre otros (Cersosimo y Wright, 2015); la técnica que emplea cámaras de respiración es considerada la de mayor precisión, ya que se mide todo el metano producido por el animal. Hasta hace poco, México carecía de información precisa sobre emisiones de metano entérico por bovinos debido a la falta de laboratorios especializados donde se pudieran llevar a cabo mediciones *in vivo*. Desde el año 2014 se cuenta en el país con dos laboratorios con la infraestructura para medir *in vivo* las emisiones de metano en bovinos alojados en cámaras de respiración de circuito abierto; ubicados estratégicamente en dos importantes regiones geo-climáticas de México, el primero localizado en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), el cual estudia las emisiones de CH₄ de las regiones de clima tropical del sur, Golfo de México y las regiones de clima tropical de la Costa del Pacífico; mientras que el segundo ubicado en la FMVZ de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), en el

Estado de México, estudia los sistemas ganaderos de las regiones de clima templado, árido y semi-árido de México (Castelán-Ortega *et al.*, 2019). Recientemente se ha implementado un Laboratorio de Cromatografía de Gases para medir emisiones de metano entérico y óxido nítrico en sistemas ganaderos en pastoreo, usando la técnica de SF₆, el cual se encuentra en el El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) en el Estado de Chiapas, México.

La producción de metano entérico se encuentra influenciada por diversos factores, principalmente por la composición química y calidad de la dieta, así como el nivel de consumo del animal (Johnson y Johnson, 1995; Hook *et al.*, 2010). El metano es un producto resultado de la fermentación de los carbohidratos del alimento ingerido, durante ésta fermentación, las bacterias arqueas metanogénicas presentes en el rumen, utilizan como sustrato el CO₂ y el H₂ para formar CH₄ y así reducir la acumulación de H₂ en el rumen evitando problemas digestivos y metabólicos en el animal (Benaouda *et al.*, 2017); la producción de metano implica una pérdida energética para el animal, que puede llegar a representar hasta el 12% de la energía bruta (EB) total consumida en el alimento (Johnson y Johnson, 1995). El patrón de fermentación ruminal depende principalmente del

tipo de carbohidratos contenidos en la dieta animal, por ejemplo, los carbohidratos estructurales de los forrajes (celulosa, hemi-celulosa y lignina) agrupados en la porción conocida como fibra detergente neutro (FDN) dirigen la fermentación ruminal hacia una de tipo acética, donde se liberan ocho iones de hidrógeno por cada mol de acetato producido, mientras que una fermentación de tipo propiónica, dada por una dieta alta en alimentos concentrados, no libera moléculas de hidrógeno y por lo tanto no promueve la formación de metano (Johnson y Johnson, 1995; Moss y Givens, 2002). De esta manera, modificar la inclusión de diferentes tipos de carbohidratos en la dieta puede definir el tipo de fermentación y por ende la cantidad de metano producido por fermentación entérica. Es por lo anterior, que algunas de las estrategias de mitigación de metano producido por fermentación entérica más prometedoras se basan precisamente en modificar la composición de la dieta y se encuentran asociadas al uso de recursos alimenticios locales y de bajo costo, los cuales puedan producir una fermentación de tipo propiónica. Existen también otras estrategias que favorecen una menor producción de metano, las cuales se basan en diferentes niveles de inclusión de plantas taníferas y saponíferas en la dieta de los rumiantes como se describe ampliamente en Ku-Vera *et al.* (2020) y Vázquez-Carrillo *et al.* (2020), las cuales han mostrado resultados prometedores y de aplicabilidad para México, ya que fueron desarrolladas en el país.

El presente documento tiene como objetivos el presentar una síntesis del estado actual de las investigaciones sobre emisiones de metano por fermentación entérica de los bóvidos en México; y presentar algunas estrategias y políticas públicas sugeridas para la mitigación de las emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino, pensadas para el contexto ganadero del país.

DESARROLLO DEL PRIMER INVENTARIO NACIONAL NIVEL TIER 2 DEL IPCC DE EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA, EMPLEANDO MEDICIONES *in vivo* EN MÉXICO

En México, hasta hace poco, no se habían realizado mediciones *in vivo* de las emisiones de metano por fermentación entérica en ganado bovino, y por ende existía poca información sobre este tema. Además, no se contaba con estudios de emisiones de metano por

regiones geo-climáticas del país, lo cual generaba una sub o sobreestimación de emisiones de metano por fermentación entérica por la variación que existe en la composición y calidad de los forrajes y dietas entre regiones geo-climáticas, siendo menor la calidad en los forrajes de clima tropical respecto a los de clima templado (Castelán-Ortega *et al.*, 2014). Se sabe que los primeros generan una menor emisión mientras que los segundos presentan una mayor emisión de metano (Castelán-Ortega *et al.*, 2014).

Los estudios generados por el presente grupo de trabajo permitieron publicar en el año 2019 el primer inventario nacional, con factores de emisión de metano específicos para el ganado bovino de México (Castelán-Ortega *et al.*, 2019), el cual se llevó a cabo utilizando una metodología más completa que la usada hasta el momento por el gobierno mexicano, el nivel 2 (Tier 2, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Antes de nuestro inventario de nivel Tier 2, los inventarios en México se calculaban con base en factores de emisión por defecto recomendados en las directrices del IPCC (2006), en su forma más simple que es el nivel Tier 1, que consiste en multiplicar el número de cabezas de ganado por un factor de emisión por defecto, sin considerar los factores que influyen en el volumen de las emisiones, como la función productiva del ganado (leche, carne, doble propósito), el sistema de producción, el consumo de materia seca (CMS), y sobre todo, el tipo y la calidad de la dieta, el clima y la eficiencia productiva (IPCC, 2006; Sejian *et al.*, 2011), en resumen no se consideraba el efecto de la región geo-climática sobre la emisión de metano entérico. Es por lo anterior, que los resultados derivados de modelos como el Tier 1 son cuestionables debido a su baja precisión y elevada incertidumbre. Sin embargo, la implementación de un inventario de nivel 2, es complejo, debido a la falta infraestructura y financiamiento para el desarrollo de estudios más rigurosos como lo plantea Sejian *et al.* (2011), así como la necesidad de mantener animales en experimentación y en condiciones ambientales específicas (Marques *et al.*, 2020). México al ser un país con una gran diversidad climática, posee diferentes sistemas de producción de bovinos, tipos de alimentación, ganado con diferente fin zootécnico, razas, entre otros; por lo anterior el hacer uso del nivel Tier 1 del IPCC (2006) sin duda sub-estima o sobre-estima las emisiones de metano en los inventarios regionales y/o nacionales.

Procedimiento para el desarrollo del inventario Tier 2

El desarrollo del inventario, publicado por Castelán-Ortega *et al.* (2019), consistió en la recopilación de información bibliográfica y estadística sobre las características de los sistemas de producción de ganado bovino, su población y estructura del hato en México, para ello se utilizó como base el Padrón

Ganadero Nacional (2016) y su clasificación para dicho fin, de igual forma se colectó información sobre la alimentación de los bovinos y composición química de forrajes y alimentos. Después, se dividió el territorio nacional en regiones geo-climáticas y se ubicó la población nacional de ganado bovino correspondiente a cada región, obteniéndose cinco regiones: cálido húmedo, cálido sub-húmedo, templado, seco y muy seco como se muestra en la Figura 2.

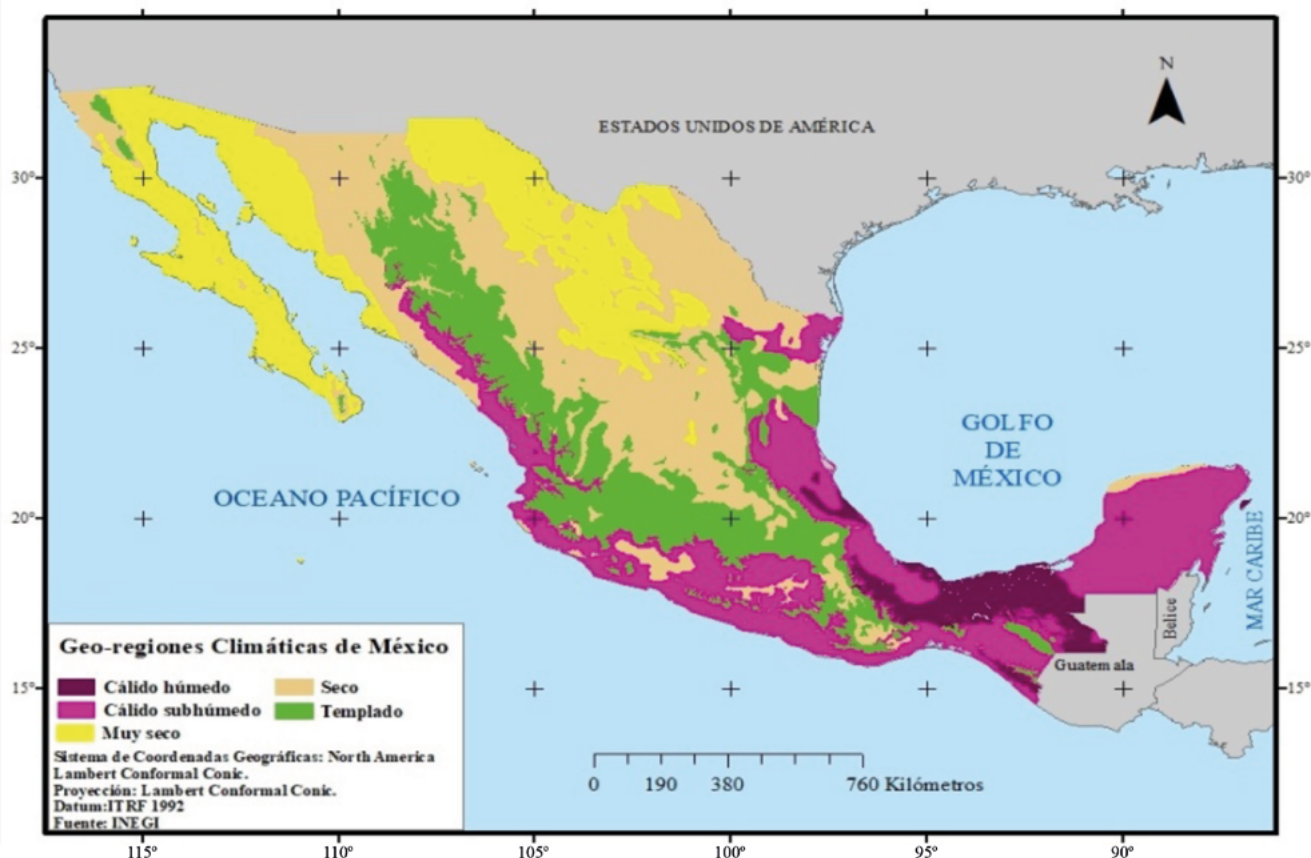


Figura 2. Regiones geo-climáticas de la República Mexicana empleadas en la elaboración del inventario de nivel Tier 2 de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino. Tomado de: Castelán-Ortega *et al.* (2019).

Posteriormente, se realizaron encuestas en 15 estados representativos de cada región geo-climática de la república y con una población importante de ganado; también se empleó el método de observación directa y se recolectaron muestras de forrajes y dietas empleadas en las unidades de producción pecuaria, a éstas últimas se les determinó la concentración de energía bruta,

dato indispensable para el cálculo de los factores de emisión de metano de acuerdo con el método Tier 2 del IPCC (2006). En la Figura 3 se representan diferentes sistemas de producción, que ejemplifican algunos de los sistemas de México, con distintas razas de bovinos y tipos de alimentación.



Figura 3. Diferentes sistemas de producción y alimentación del ganado bovino en México. (a) Pastoreo en las regiones de clima cálido sub-húmedo, (b) Engorda intensiva en corrales en la región de clima muy seco y (c) Producción intensiva de leche en la región de clima seco.

Mediante un análisis estadístico multivariado de las encuestas aplicadas, se identificaron los principales ingredientes empleados en la alimentación, y posteriormente, se definieron las dietas tipo para cada región geo-climática y categoría de ganado. Las dietas tipo se reprodujeron y ofertaron a bovinos experimentales y sus emisiones de metano fueron medidas en las cámaras de respiración de circuito abierto (Figura 4), de los laboratorios de la UAEMex y la UADY; es decir una dieta tipo para cada región climática y categoría de ganado. Las cámaras de respiración están equipadas con aire acondicionado, luz artificial, ventilador y una jaula metabólica; ésta última provista de comedero, bebedero, piso antiderrapante y un contenedor en la parte inferior posterior, que permitió la colecta total de heces del animal como se describe en Canul *et al.* (2017); esta infraestructura fue necesaria para el cálculo de consumo de materia seca (CMS) y digestibilidad de la dieta, además de la emisión de metano. Los animales tuvieron un periodo de adaptación a las dietas tipo, para posteriormente seguir con un periodo de muestreo, en el cual se realizaron mediciones de consumo, digestibilidad de la

dieta y de la energía; finalizando con 24 hr de medición dentro de las cámaras de respiración para cuantificar la emisión de metano de los animales.

Una vez medida la emisión de metano se procedió a calcular el factor de partición de la energía consumida hacia metano conocido como factor Y_m (Y_m , por sus siglas en inglés). Este factor Y_m determina el porcentaje de energía consumida que se pierde en forma de metano. Los factores de emisión para las regiones de clima templado, seco y muy seco se generaron a partir de experimentos en bovinos de las razas Holstein y Charoláis realizados en el Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la FMVZ-UAEMex (Castelán-Ortega *et al.*, 2015; Hernández-Pineda *et al.*, 2018; Castelán-Ortega *et al.*, 2018; Castelán-Ortega *et al.*, 2020). Mientras que los factores de emisión para las regiones de clima cálido húmedo y cálido sub-húmedo se determinaron a través de experimentos *ex profeso* con ganado cebú en el Laboratorio de Cambio Climático y Ganadería de la FMVZ-UADY (Canul *et al.*, 2017; Ku-Vera *et al.*, 2018; Arceo-Castillo *et al.*, 2019).



Figura 4. Equipo de medición de emisiones de metano y cámaras de respiración de circuito abierto de la FMVZ-UAEMex.

Finalmente, con los datos obtenidos: factor Y_m , digestibilidad y variables sobre las características productivas del animal, se calculó el inventario de emisiones de metano por región geo-climática, función productiva y categoría del ganado, acorde al modelo del Tier 2 (IPCC, 2006), utilizando como base el censo del Padrón Ganadero Nacional al año 2016. También, se determinó la magnitud de la incertidumbre asociada al modelo (Valenzuela *et al.*, 2017), y la propagación de la incertidumbre por el método de simulación

matemática Monte Carlo. El inventario de metano por fermentación entérica Tier 2 obtenido de esta forma fue de 2039.21 Gg año⁻¹ y su incertidumbre asociada fue de -18.2 a 21.2 como se muestra en el Cuadro 1. La incertidumbre del inventario es muy similar a la reportada por otros países (Karimi-Zindashty *et al.*, 2012; Milne *et al.*, 2014; Hristov *et al.*, 2017). Para una descripción detallada del proceso de elaboración del inventario se sugiere consultar el documento publicado en Castelán-Ortega *et al.* (2019).

Cuadro 1. Inventario de emisiones de metano por fermentación entérica de bovinos en México para el año 2018 y su incertidumbre asociada.

	FD	y'	δ	λ	X_i	X	σ	I. C. 95%	(%)
CH ₄ total (Gg año ⁻¹)	Johnson SU	1037	1007.35	-6.06	6.97	2039.21	205.50	1666.36- 2471.61	-18.28 a +21.20

FD = Función Distribución de Probabilidad. Y = Gama. δ = parámetros. Λ = Lambda. X = media σ = desviación estándar. I.C. = Intervalo de confianza.

El inventario nacional expuesto anteriormente, es el reflejo del esfuerzo de investigación, metodologías planeadas y experimentos en cámaras de respiración de circuito abierto, así como el uso de métodos estadísticos robustos y confiables para el análisis correcto de información; tratándose del primer estudio en su tipo para México.

Consideraciones con respecto al inventario de aproximación Tier 2

Investigaciones como la que se describe en el presente documento son necesarias para la obtención de resultados más precisos acorde al contexto ganadero regional y nacional del país. Entre más información de calidad se obtenga del sector ganadero nacional, respecto a las variantes involucradas en la producción de GEI, se pueden reemplazar las aproximaciones cualitativas por cuantitativas y refinar los valores de los diferentes parámetros implicados en el modelo, para aumentar la precisión y reducir la incertidumbre de los inventarios. Siguiendo esta corriente de pensamiento, es necesaria la actualización del inventario nacional, para sentar las condiciones a las que se enfrenta el país en este campo, con la finalidad de desarrollar y mejorar políticas gubernamentales enfocadas a la mitigación de GEI. Por otro lado, es necesario tomar en cuenta las consideraciones señaladas por Marques *et al.* (2020), para regiones que no cuentan con cámaras de respiración; quienes enfatizan la necesidad de la implementación de modelos mecanísticos, los cuales disminuyen la necesidad de mantener animales en experimentación intensiva, y en condiciones

ambientales específicas. Estos modelos estiman las emisiones de GEI basándose en procesos metabólicos, pero tienen que ser desarrollados, calibrados y validados usando información generada en México y relevante para el contexto ganadero nacional.

LA NECESIDAD DE CONTAR CON INVENTARIOS NACIONALES DE GEI PRECISOS PARA EL SECTOR AGROPECUARIO DE MÉXICO

El cambio climático influye sobre el aumento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos en México afectando a familias rurales, principalmente. La estela de destrucción e inundaciones dejada por la tormenta tropical “Cristóbal” tras su paso en junio de 2020 por el sur de México, es un signo tangible del impacto del cambio climático sobre la ganadería en México (Figura 5). Potreros inundados, ganado en el agua y forrajes perdidos, son muestra evidente de que la alteración de los ciclos de la naturaleza por la actividad antropogénica, tiene consecuencias graves sobre el bienestar económico de miles de personas en el sector rural. Por tales razones, es indispensable que el país cuente con inventarios precisos de emisiones de gases de efecto invernadero y estrategias eficientes de mitigación y adaptación al cambio climático. El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2024 no contiene un instrumento de política pública para tal efecto, por lo que es necesario diseñarla y ponerla en operación, so pena de pagar el precio social y económico de no haber tomado las medidas suficientes para mitigar los efectos del cambio climático.



Figura 5. Potreros inundados y vacas en el agua en Tizimín, Yucatán (impacto de la tormenta tropical Cristóbal en junio de 2020 en el sur de México).

Para obtener una mejor respuesta de los ganaderos hacia las estrategias de mitigación, es recomendable que estas se combinen con acciones de adaptación, dada la experiencia previa del productor. Folke (2006) subraya la importancia del aprendizaje social e institucional,

los cuales surgen como respuesta a crisis anteriores. De esta forma, las crisis son el momento clave para crear oportunidades dirigidas a la autoorganización, incluido el fortalecimiento de las instituciones locales y la construcción de vínculos entre escalas y redes

de resolución de problemas (Berkes, 2007). En este sentido el IPCC (2007), menciona que la capacidad de adaptación es dinámica y se ve influenciada por la sociedad y la experiencia previa, así como por el capital humano y las instituciones, la gobernanza, los ingresos nacionales, la salud y la tecnología; influyen también en ella una multiplicidad de factores de estrés climáticos y no climáticos, así como las políticas de desarrollo de los gobiernos. Desde este enfoque, los cambios no se pueden realizar de forma aislada de factores físicos y sociales, ya que se encuentran interrelacionados. Los sistemas sociales dependen en gran medida de las variables biofísicas y éstas, a su vez, de las actividades humanas. Estos sistemas (ambientales y sociales) han evolucionado en conjunto, por lo cual se necesita un análisis profundo de su interacción, para mejorar la capacidad de pronosticar y responder al cambio (Folke, 2006). Por lo anterior, es importante reforzar la innovación después de sucesos clave para estimular el aprendizaje de cómo afrontarlo, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante el cambio; un ejemplo muy claro de ello es toda innovación e investigación que se esta llevando a cabo para resolver la crisis humanitaria desatada por el virus SARS-CoV-2.

En México, se han realizado estudios acerca de la adopción de nuevas tecnologías, la respuesta de los ganaderos y cómo influye la experiencia obtenida por éstos para integrarla a sus unidades de producción pecuaria (UPP), como ejemplo, Zepeda-Cancino *et al.* (2016) realizaron un estudio sobre la adopción de sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en Chiapas, y encontraron que factores sociodemográficos, socioculturales, personales y de apoyos gubernamentales y académicos, influyen en la alta o baja adopción de nuevas tecnologías. Dentro de estos destacaron la edad (adultos mayores), grado de escolaridad (primaria), nivel de ingresos económicos (bajo), alto intermediarismo en la venta de los animales, la baja frecuencia con la que reciben apoyos gubernamentales y el conocimiento limitado, como factores que obstaculizan la adopción de SSPi. Lo anterior concuerda con lo mencionado por el IPCC (2007) y Clavero *et al.* (2006) en el sentido de que las limitaciones económicas, tecnológicas, cognitivas, políticas, institucionales y socio-culturales restringen tanto la aplicabilidad como la efectividad de las medidas de adaptación. Por otro lado, Villanueva *et al.* (2009) enfatizan la importancia del conocimiento local o adquirido de los ganaderos, con el cual reconocen la importancia económica, social y ambiental de los

sistemas silvopastoriles. Lo anterior demuestra que la educación e información es pieza clave para la adopción y el establecimiento de estrategias de mitigación. Resalta la importancia de la implementación de asesorías, talleres y cursos, para informar y capacitar al ganadero/productor, acerca del calentamiento global, el papel de la ganadería y el impacto que genera en el sistema socioambiental, las consecuencias a corto, mediano y largo plazo, para resaltar la importancia de su estudio, investigación, y el establecimiento de acciones de adaptación y estrategias de mitigación. Fomentar el aprendizaje y la colaboración entre las comunidades y las instituciones gubernamentales y académicas, para examinar los patrones de respuesta a las amenazas, permitiría conocer qué opciones de políticas son prometedoras (Folke, 2006). Un conocimiento limitado frena el proceso de adopción y el desarrollo de nuevas tecnologías, por lo tanto es una de las principales barreras para la adopción de las mismas (Clavero *et al.*, 2006; Zepeda-Cancino *et al.*, 2016).

Asimismo, el otorgar presupuestos suficientes, accesibles y estables, no temporales; incentivos económicos como pagos por servicios ambientales y de asistencia técnica para potencializar la adopción de nuevas tecnologías, política pública permanente dirigida a resolver los problemas de la cadena productiva, incrementaría la adopción y desarrollo de estrategias de mitigación (Aguirre-Ortega *et al.*, 2015).

HACIA UN CAMINO PARA EL DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE BOVINOS EN MÉXICO

En México no existe una política pública para mitigar las emisiones de metano por fermentación entérica provenientes de la ganadería bovina. El principal programa de impulso ganadero actual: “Crédito Ganadero a la Palabra”, no contempla medidas de adaptación o de mitigación ante los impactos del cambio climático en el sub-sector ganadero nacional (Presidencia de la República; Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024). En este sentido, se necesita el apoyo y financiamiento de las autoridades del sector agropecuario hacia la investigación, así como la cooperación y el entendimiento de la problemática por parte de los ganaderos, para la actualización y mejoramiento de los inventarios nacionales, el desarrollo de estrategias de mitigación de metano de

forma sustentable, todo lo cual redunde en la producción de proteína de origen animal de alto valor biológico, de buena calidad y con el menor impacto posible sobre el medio ambiente.

La FAO (2018), propone tres formas para reducir sustancialmente las emisiones de GEI de la producción ganadera: 1) realizando mejoras de la productividad animal para reducir las intensidades de emisiones, es decir menos metano por kilogramo de leche o carne; 2) la captura de carbono a través de un manejo mejorado de los pastos; y 3) una mejor integración ganadera en la bio-economía circular; como el uso de subproductos de la agroindustria en la alimentación animal, el aumento de la productividad de los cultivos a través del uso del estiércol como fertilizante y la tracción animal, así como el uso de biodigestores para el tratamiento de excretas.

En México, en los últimos años se han dado importantes avances en la búsqueda de estrategias de mitigación de GEI en diversos sistemas ganaderos de diferentes zonas agroecológicas. Por ejemplo, ha tomado relevancia la utilización de recursos arbóreos locales para reducir la emisión de metano en diversas especies de rumiantes. Por ejemplo, la inclusión en la dieta animal del follaje de diversos árboles y arbustos con alto contenido de taninos como *Cosmos bipinnatus*, Cav., han mostrado su potencial para reducir las emisiones de CH₄ entérico. Hernández-Pineda *et al.* (2018) encontraron que con la adición de 0.5 kg de materia seca (MS) al día de *C. bipinnatus* se redujeron hasta en un 16% las emisiones de metano en vacas lecheras sin afectar el consumo de alimento ni la productividad animal; de igual forma, Apodaca-Martínez y Estrada-Montero (2018) en un estudio realizado con tres niveles de inclusión de *C. bipinnatus* (0, 5 y 10% del consumo de MS) en una dieta 50:50 forraje:concentrado, obtuvieron la mejor respuesta con el 5% de inclusión de la planta con respecto a la dieta control, lo que resultó en una disminución de 24% en el rendimiento de CH₄ en L kg⁻¹ de materia seca ingerida (MSI) en becerros Holstein. Así mismo, Vázquez-Carrillo *et al.* (2020) encontraron que la inclusión de 365 g MS día⁻¹ de *C. bipinnatus* o 100 g MS día⁻¹ de *Cymbopogon citratus* en dietas con proporción de 20:80 forraje:concentrado redujeron el rendimiento de CH₄ en g kg⁻¹ MSI en bovinos F1 productores de carne en un 27.6 y 32.5% respectivamente. Por otro lado, Benaouda (2018) evaluó el efecto de cuatro niveles crecientes de fibra de baja digestibilidad (FDN) en vacas lecheras y encontró que con el aumento de FDN el

rendimiento de metano disminuyó gradualmente (32.1, 28.1, 23.1 y 21.2 CH₄ L kg⁻¹ MSI, respectivamente), en dicho estudio se concluye que a mayor concentración de FDN en la dieta de vacas lecheras, es menor la digestibilidad de la MS y de la fibra, lo cual resulta en menor sustrato digestible en el rumen, lo que conlleva a una reducción en la emisión de metano, ya que disminuye el sustrato para la formación de CH₄ al haber una menor degradación de la fibra. En las regiones geoclimáticas tropicales del sureste de México, Piñero-Vázquez *et al.* (2017), en un estudio con niveles crecientes de *Leucaena leucocephala* (0, 20, 40, 60 y 80%) en una dieta a base de *Pennisetum purpureum*, encontraron que tanto la producción diaria de metano como el rendimiento en g kg⁻¹ MSI disminuyó desde un 29.5 hasta 63% en esta última variable con respecto a su dieta control; esta leguminosa tropical originaria de México ha mostrado ser eficaz en la reducción de las emisiones de metano por los rumiantes en regiones tropicales, y además incrementa la captura de carbono por el agroecosistema (Ku-Vera *et al.*, 2018).

El diseño de acciones y políticas para la mitigación de GEI y la adaptación de la ganadería al cambio climático debe contemplar varios aspectos, a fin de favorecer el desarrollo de sistemas de producción sostenibles. Los resultados anteriores evidencian el potencial de la inclusión de plantas taníferas, así como el uso de los sistemas silvopastoriles (Palmer, 2014) para contribuir hacia el desarrollo de una ganadería más amigable con el medio ambiente.

La implementación de las estrategias, descritas arriba, para mitigar las emisiones de metano por el ganado bovino, tienen que ser gestionadas de forma integral, con el fin de visualizar su escalamiento a nivel regional y posteriormente a nivel nacional. En las regiones tropicales, con sistemas extensivos, se pueden aprovechar gran cantidad de plantas forrajeras; para lograr una mejor calidad y digestibilidad de la dieta, lo cual se reflejaría en una mayor productividad animal y, por lo tanto, en una reducción en la intensidad de las emisiones de metano por fermentación entérica. Para ello, parte de la superficie ocupada para el pastoreo se puede dedicar a la implementación de bancos de leguminosas nativas, haciendo énfasis en sistemas agroforestales y/o agroecológicos (FAO, 2019).

La inclusión de follaje de plantas taníferas en la dieta, puede ser utilizado en un amplio abánico de sistemas ganaderos del país, de tal forma que se puede asegurar el consumo de la planta por los animales y tener beneficios productivos y ambientales. Para esto,

es necesario contemplar diversos factores, que permitan asegurar la distribución y manejo de la planta en las UPP y así, obtener una respuesta animal favorable, en términos productivos, pero también ambientales. Inicialmente, se deberá de contar con superficies con las condiciones adecuadas de temperatura, humedad, riego, entre otros factores, que permitan el crecimiento y desarrollo de las plantas taníferas, con la finalidad de asegurar el abastecimiento a las UPP. De igual forma, el corte de la planta debe ser en una etapa fenológica adecuada y el manejo posterior a su cosecha debe de ser cuidado con el fin de evitar la pérdida de los taninos u otros metabolitos secundarios de las plantas de interés. Dentro de los factores y recomendaciones a considerar, acorde a los estudios previamente expuestos, un aspecto que destaca es el secado bajo sombra de la planta con las condiciones apropiadas de temperatura, humedad y ventilación; todo lo anterior para asegurar un porcentaje de MS adecuado y concentración de metabolitos secundarios que se mantengan viables para que lleven a cabo su efecto antimetanogénico en el rumen del animal, una vez ingerida por éste. Posteriormente, es necesario realizar un mezclado adecuado de la planta tanífera/saponífera con su dieta, que asegure de esta forma el consumo diario de la planta con propiedades antimetanogénicas. También, es importante establecer la cantidad mínima necesaria de inclusión de la planta en la dieta animal y el periodo de consumo, esto para obtener resultados favorables en los bovinos, traducidos en una reducción en el largo plazo de la emisión de metano por fermentación entérica y en la obtención de productos de alta calidad como carne y leche. Sin embargo, es importante establecer con claridad que las posibilidades de implementación de estas estrategias dependerán del financiamiento y disponibilidad de recursos como son las tierras para la siembra de las plantas en cuestión; también de la capacitación técnica de los productores y disponibilidad de maquinaria para preparar las plantas con las características adecuadas, mediante el secado, el molido y la mezcla de las plantas taníferas con la dieta. La distribución de la plantas a nivel regional y nacional se plantea también como un reto importante.

CONCLUSIONES

Lo anteriormente expuesto demuestra que existen soluciones que se pueden llegar a adaptar al contexto regional y nacional, de tal forma que puedan ser aplicadas en las UPP. Sin embargo, se requieren

implementar a nivel nacional, principalmente en las grandes explotaciones pecuarias, haciendo visible la necesidad del trabajo interdisciplinario, para contemplar los diferentes escenarios que se puedan presentar en el desarrollo y la implementación de las acciones de adaptación y estrategias de mitigación de la emisión de GEI en el país.

Finalmente, para que las acciones de adaptación y mitigación se lleven a cabo es necesario, en principio, que las políticas nacionales respalden su necesidad. Por ello, se considera importante se contemplen en los planes y programas nacionales y a la par se les asigne el financiamiento enfocado a investigaciones que conlleven a la generación de información respecto a el potencial antimetanogénico de plantas taníferas/saponíferas nativas de México, así como pruebas de comportamiento en bovinos, no sólo para analizar su potencial para mitigar las emisiones de metano por fermentación entérica, sino evaluar que no afecten el comportamiento productivo y la salud de los animales. Asimismo, se requiere de talleres y cursos dirigidos a los ganaderos, con la finalidad de concientizarlos en este contexto, es sustancial, la implementación conjunta de programas con financiamiento que permitan el desarrollo de éstas estrategias, de tal forma que se facilite la adopción e implementación de las medidas mencionadas. Se necesita del genuino interés y compromiso del liderazgo pecuario federal de México, para que los inventarios y estudios de metano entérico bovino obtenidos a la fecha en los laboratorios de investigación de las universidades públicas, se traduzcan por medio de políticas públicas, en acciones concretas de mitigación en las diversas unidades ganaderas de México.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Ortega, J., J. Bonilla-Cárdenas, F. Carrillo-Díaz, A. Herrera-Corredor, F. Escalera-Valente, M. Rivas-Jacobo y S. Martínez-González. 2015. Alternativas para ganadería ante el cambio climático en Nayarit. *Abanico Veterinario* 5:28-37.
- Arceo-Castillo, J., M. Montoya-Flores, L. T. Molina, A. Piñero-Vázquez, C. Aguilar-Pérez, A. J. Ayala-Burgos, F. J. Sánchez, O. A. Castelán-Ortega, P. Quintana-Owen and J. Ku-Vera. 2019. Effect of the volume of methane released into respiration chambers on full system methane recovery. *Animal Feed Science and Technology* 249:54-61.
- Apodaca-Martínez, G. y B. P. Estrada-Montero. 2018. Efecto de *Cosmos bipinnatus* (planta tanífera) sobre la producción de metano ruminal en becerros de raza Holstein. Tesis de Li-

- cenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 34 p.
- Benaouda, M., M. González, L. T. Molina y O. A. Castelán. 2017. Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:965-974.
- Benaouda, M. 2018. Efecto de la calidad de la dieta y el nivel de la fibra en la cinética de digestión y la producción de metano en bovino lechero. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 95 p.
- Berkes, F. 2007. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Natural Hazards* 41:283-295.
- Canul, S. C. J., A. T. Piñeiro, J. I. Arceo, J. A. Alayón, A. J. Ayala, C. F. Aguilar, F. J. Solorio, O. A. Castelán, M. Lachica, P. Quintana and J. C. Ku V. 2017. Design and construction of low-cost respiration chambers for ruminal methane measurements in ruminants. *Revista Mexicana Ciencias Pecuarias* 8:185-191.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, L. T. Molina, P. E. Pedraza-Beltrán, J. Canúl-Solis, A. Piñeiro-Vázquez, G. Hernández-Pineda and M. Benaouda. 2015. First in vivo Measurements of Methane Emissions from Ruminant Livestock Enteric Fermentation in Mexico Using Respiration Chambers. *Proceedings of the American Geophysical Union, San Francisco California*. <https://agu.confex.com/agu/fm15/webprogram/Paper80839.html>
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera y J. Estrada-Flores. 2014. Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmósfera* 27:185-191.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, S. V. Castelán-Jaime, G. S. Hernández-Pineda, M. Benaouda, J. C. Ángeles-Hernández, A. R. Praga-Ayala and H. Montelongo-Pérez. 2018. Inventory of enteric methane emissions by cattle in the dry-land regions of México using the IPCC 2006 Tier 2 main method. Herbivore nutrition supporting sustainable intensification and agro-ecological approaches. *Proceedings of the 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores ISNH 2018. Advances in Animal Biosciences* 9:739 p.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, J. C. Ángeles-Hernández, M. Benaouda, G. S. Hernández-Pineda, T. L. Molina, L. Ramírez-Cancino, S.V. Castelán-Jaime, A. R. Praga-Ayala, F. Lazos-Balbuena, H. Montelongo-Pérez, M. González-Ronquillo, M. F. Vázquez-Carrillo, E. Cardoso-Gutiérrez, E. Aranda-Aguirre, D. Villegas-Estrada, A. P. Guadarrama-López y G. Apodaca-Martínez. 2019. Ganadería. Capítulo 22. pp. 492-528. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). 2019. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-7-4.
- Castelán-Ortega, O. A., P. E. Pedraza-Beltrán, G. S. Hernández-Pineda, M. Benaouda, M. González-Ronquillo, L. T. Molina, H. Montelongo-Pérez and M. F. Vázquez-Carrillo. 2020. Construction and operation of a respiration chamber of the head-box type for methane measurement from cattle. *Animals Basel* 10(2):227.
- Cersosimo, L. M. and A. G. Wrigh. 2015. Estimation Methodologies for enteric methane emission in ruminants. pp. 209-220. *In: Sejian V., J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad (eds.). 2015. Climate Change Impact of Livestock: Adaptation and Mitigation*. V. Springer, India. ISBN: 978-81-322-2264-4.
- Clavero, T. y J. Suarez. 2006. Limitaciones en la adopción de los sistemas silvopastoriles en México. *Pastos y Forrajes* 29:1-6.
- Eckard, R. J., C. Grainger and C. A. M. de Klein. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science* 130:47-56.
- FAO. 2006. Las repercusiones del ganado en el medio ambiente. El desafío estriba en reconciliar dos demandas: la de productos animales y la de servicios ambientales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, México. <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0612sp1.htm> (Consulta: febrero 03, 2020).
- FAO. 2018. Soluciones ganaderas para combatir el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, México. <http://www.fao.org/3/I8098ES/I8098es.pdf> (Consulta: mayo 11, 2020)
- FAO. 2019. Agroecological and other innovative approaches. HLPE Report 14, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome. 162 p.
- Folke, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for socio-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16:253-267.
- Hernández-Pineda, G. S., P. E. Pedraza-Beltrán, M. Benaouda, G. J. M. Palma, N. F. Avilés, L. T. Molina and O. A. Castelán-Ortega. 2018. *Pithecellobium dulce, Tagetes erecta and Cosmos bipinnatus* on reducing enteric methane emission by dairy cows. *Ciencia Rural* DOI:10.1590/0103-8478cr20170484.
- Hook, S. E., A. D. Wright and B. W. McBride. 2010. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea* 30:945785. DOI:10.1155/2010/945785.
- Hristov, A. N., M. Harper, R. Meinen, R. Day, J. Lopes, T. Ott, A. Venkatesh and C. A. Randles. 2017. Discrepancies and uncertainties in bottom-up gridded inventories of livestock methane emissions for the contiguous United States. *Environ. Sci. Technol.* 51:13668–13677.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Pro-

- gramme Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html> (Consulta febrero 03, 2020)
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza. ISBN 92-9169-322-7.
- Johnson, K. A. and D. E. Johnson. 1995. Methane emission from cattle. *Journal of Animal Science* 13:2483-2492.
- Johnson, K., M. Huylar, H. Westberg, B. Lamb and P. Zimmerman. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. *Environmental Science & Technology* 28:359-362.
- Karimi-Zindashty, Y., J. D. Macdonald, R. Desjardins and D. E. Worth. 2012. Sources of uncertainty in the IPCC Tier 2 Canadian livestock model. *The Journal of Agricultural Science* 150:1-14.
- Ku-Vera J, C., S. S. Valencia-Salazar, A. T. Piñeiro-Vázquez, I. C. Molina-Botero, J. Arroyave-Jaramillo, M. D. Montoya-Flores, F. J. Lazos-Balbuena, J. R. Canul-Solis, J. I. Arceo-Castillo, L. Ramírez-Cancino, C. S. Escobar-Restrepo, J. A. Alayón-Gamboa, G. Jiménez-Ferrer, L. M. Zavala-Escalante, O. A. Castelán-Ortega, P. Quintana-Owen, A. J. Ayala-Burgos, C. F. Aguilar-Pérez and F. J. Solorio-Sánchez. 2018. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. *Agricultural and Forest Meteorology* 258:3-7.
- Ku-Vera, J. C., A. Piñeiro Vázquez, S. S. Valencia Salazar, F. J. Solorio Sánchez, C. F. Aguilar Pérez, A. J. Ayala Burgos y L. Ramírez Avilés. 2018. Mitigación de las emisiones de metano entérico en rumiantes alimentados con leguminosas tropicales. pp. 303-312. En: Herrera, C. J. A., A. J. Chay-Canul, F. Casanova-Lugo, A. Piñeiro-Vázquez, L. Márquez-Benavides, E. Santillán-Ferreyra, J. Arce-Menocal (eds.). 2018. Avances de la investigación sobre producción animal y seguridad alimentaria en México. Morelia, Michoacán, México. ISBN: 978-607-542-022-6.
- Ku-Vera, J. C., O. A. Castelán-Ortega, F. Galindo-Maldonado, J. Arango, N. Chirinda, R. Jiménez-Ocampo, S. Valencia-Salazar, E. J. Flores-Santiago, M. D. Montoya-Flores, I. C. Molina-Botero, A. T. Piñeiro-Vázquez, J. I. Arceo-Castillo, C. F. Aguilar-Pérez, L. Ramírez-Áviles and F. J. Solorio-Sánchez. 2020. Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal* 14:S453-S463. DOI:10.1017/S1751731120001780
- Marques, G. M., M. G. L. C. Teixeira, S. T. Tiago, T. Sousa, T. G. Morais, F. M. T. Teixeira and T. Domingos. 2020. Minimizing direct greenhouse gas emissions in livestock production: The need for a metabolic theory. *Ecological Modelling* 434:109259.
- Milne, A. E., M. J. Glendining, P. Bellamy, T. Misselbrook, S. L. Gilhespy, M. Rivas-Casado, A. Hulin, M. Van Oijen and A. P. Whitmore. 2014. Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture. *Atmospheric Environment* 82:94-105.
- Moss, A. R. and D. I. Givens. 2002. The effect of supplementing grass silage with soya bean meal on digestibility, in sacco degradability, rumen fermentation and methane production in sheep. *Animal Feed Science and Technology* 97:127-143.
- Padrón Ganadero Nacional. 2016. SIAP. 2019. Población ganadera. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). México.
- Palmer, L. 2014. A new climate for grazing livestock. *Nature Climate Change* 4:321-323.
- Piñeiro-Vázquez, A. T., J. R. Canul-Solis, J. A. Alayón-Gamboa, A. J. Chay-Canul, A. J. Ayala-Burgos, F. J. Solorio-Sánchez, C. F. Aguilar-Pérez and J. Ku-Vera. 2017. Energy utilization, nitrogen balance and microbial protein supply in cattle fed *Penisetum purpureum* and condensed tannins. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 101:159-169.
- Sejian, V., V. P. Maurya and S. M. K. Naqvi. 2011. Effect of thermal, nutritional and combined (thermal and nutritional) stresses on growth and reproductive performance of Malpura ewes under semi-arid tropical environment. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 95:252-258.
- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/516353/Inventario_2018_Bovinos.pdf (Consultado: Mayo 18, 2020).
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales and C. de-Haan. 2006. *Livestock's long shadow*. FAO. Rome. 416 p.
- Tukey, J. W. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley. Reading, Massachusetts. 717 p.
- Valenzuela, M. M., M. Espinosa, E. Virgüez and E. Behrentz. 2017. Uncertainty of Greenhouse Gas Emission Models: A case in Colombia's Transport Sector. *Transportation Research Procedia* 25:4606-4622.
- Vázquez-Carrillo, M. F., H. D. Montelongo-Pérez, M. González-Ronquillo, E. Castillo-Gallegos, O. A. Castelán-Ortega. 2020. Effects of Three Herbs on Methane Emissions from Beef Cattle. *Animals* 10:1671.
- Villanueva, C., I. Muhammad, F. Casasola, N. Rios y C. Sepúlveda. 2009. Sistemas silvopastoriles: una herramienta para la adaptación al cambio climático en las fincas ganaderas en América Central. pp. 103-125. En: Sepúlveda, C. y I. Muhammad (eds.). 2009. Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central. Turrialba, C.R.: CATIE. ISBN: 978-9977-57-485-1.

- WRI. 2017. Friedrich, M. J. and A. Pickens. This Interactive Chart Explains World's Top 10 Emitters, and How They've Changed. World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/blog/2017/04/interactive-chart-explains-worlds-top-10-emitters-and-how-theyve-changed> (Consultado: Mayo 11, 2020).
- Zepeda-Cancino, R. M., M. E. Velasco-Zebadúa, J. Nahed Toral, A. Hernández-Garay, J. y J. Martínez-Tinajero. 2016. Adopción de sistemas silvopastoriles y contexto sociocultural de los productores: apoyos y limitantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 7:471-488.