



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

Licenciatura en Ingeniero Agrónomo Fitotecnista

**Modelización de emisiones de gases de efecto invernadero de la
cadena de valor para ganado bovino de México y desarrollo de una
alternativa sustentable**

T E S I S

**Que como trámite para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo Fitotecnista**

P R E S E N T A:

**CRISTIAN CRUZ MATÍAS
(45ª GENERACIÓN)**

Directores:

Dr. OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

Dr. RODOLFO SERRATO CUEVAS

**CAMPUS UNIVERSITARIO “EL CERRILLO”, EL CERRILLO PIEDRAS
BLANCAS, TOLUCA, ESTADO DE MÉX.**

29 DE JUNIO DEL 2023



AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento para la realización de este trabajo al proyecto de investigación intitulado “Estimación y comparación de emisiones de gases de efecto invernadero entre la cadena de valor de la producción ganadera de bovinos convencional y una opción sustentable” registrado con la clave UAEM 6511/2022B, y bajo la responsabilidad del Dr. Octavio Alonso Castelán Ortega.

CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	13
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
2.1. Objetivo General	16
2.2. Objetivos específicos	16
2.3. Hipótesis.....	16
III. REVISIÓN DE LITERATURA	17
3.1. El papel de la agricultura en la emisión de gases de efecto invernadero y el calentamiento global.....	17
3.2. Principales gases de efecto invernadero y su potencial para inducir cambio climático.....	20
3.2.1. Emisiones de CH ₄	22
3.2.2. Emisiones de CO ₂	24
3.2.3. Emisiones de N ₂ O.....	24
3.3. Emisiones de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O por la ganadería bovina en la cadena convencional de producción de carne de bovino.	26
3.4. Ejemplos de sistemas sustentables de producción de ganado bovino bajos en emisiones de gases de efecto invernadero.	28
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	31

4.1.	Localización del lugar de estudio.....	31
4.2.	Metodología	31
V.	RESULTADOS	44
5.1.	Emisiones de GEI.....	44
5.2.	Consumo de alimento.....	54
5.3.	Intensidad de la emisión de GEI	56
VI.	DISCUSIÓN	59
6.1.	Selección de los escenarios con una menor emisión de GEI	59
6.2.	Efecto del consumo de forrajes y suplementos por el gando sobre las emisiones de GEI. 60	
6.3.	Incremento en pequeñas cantidades de grano en la dieta del ganado bovino como una opción de mitigación.....	63
VII.	CONCLUSIONES	65
VIII.	LITERATURA CITADA.....	66
IX.	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Escenarios simulados empleando el modelo GLEAM-i por sistema de producción y dieta empleada en la alimentación de vacas adultas.	40
Figura 1. Emisión y flujo de gases de efecto invernadero a partir de la agricultura y la ganadería según el IPCC, (2006).	18
Figura 2. Desarrollo de la metodología para el diseño de un sistema de producción de ganado bovino bajo en emisiones de gases de efecto invernadero.....	32
Figura 3. Secuenciación para realizar el análisis de ciclo de vida utilizado por la FAO, 2017.	33
Figura 4. Ganado productor de carne.	35
Figura 5. Ganado productor de leche.....	36
Figura 6. Ganado productor de leche consumiendo una dieta con ingredientes locales.	39
Figura 7. Ejemplo de forraje y concentrado administrado al ganado.	42
Figura 8. Emisiones de CH ₄ por fermentación entérica en Gg CO ₂ eq para los cinco escenarios, todas las categorías de ganado y todos los sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.....	44
Figura 9. Emisiones de CO ₂ en Gg a partir de los cinco escenarios, para todas las categorías de ganado y todos los sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.....	45
Figura 10. Emisiones de N ₂ O, en Gg de CO ₂ eq, derivadas por gestión del estiércol y la degradación de la orina para los cinco escenarios, todas las categorías de ganado y todos los	

sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5 = Escenarios.46

Figura 11. Emisiones individuales promedio por año de los tres GEI por cabeza para los sistemas PCar y PLec y ambos sistemas de alimentación (SAM y SAP), expresados en kg CO2 eq. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.47

Figura 12. Emisiones globales de todos los GEI por el hato de ganado bovino productor de leche y carne, en ambos sistemas de alimentación (SAM y SAP), en México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.48

Figura 13. Comparación de las emisiones totales de todos los GEI de vacas adultas entre los sistemas de PCar y PLec en un sistema de alimentación en pastoreo (SAP) de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.49

Figura 14. Emisiones totales de todos los GEI producidas por todas las categorías bovinos productores de leche PLec, menos vacas adultas, con una alimentación en pastoreo (SAP). Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.50

Figura 15. Emisiones globales de todos los GEI derivadas del hato PCar donde su alimentación del ganado en pastoreo (SAP) en siete categorías menos vacas adultas y cada uno de los escenarios desarrollados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos

productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.....51

Figura 16. Comparación entre las emisiones de GEI producidas por las hembras adultas de PCar y PLec en un sistema de alimentación mixto (SAM) de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.....52

Figura 17. Emisiones de todos los GEI emitidos por el ganado bovino productor de leche (PLec) bajo un sistema de alimentación mixto (SAM) en siete categorías (menos vacas adultas), y cada uno de los escenarios simulados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.53

Figura 18. Emisiones de todos los GEI por el ganado bovino PCar bajo un sistema de alimentación SAM, y siete categorías (menos vacas), y seis escenarios simulados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.54

Figura 19. Consumo total de alimento expresado en Gg MS/año en el sistema de alimentación mixto (SAM) para ganado PLec y PCar en México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.....55

Figura 20. Consumo total de alimento bajo un sistema de alimentación en pastoreo (SAP) expresado en Gg MS/año dentro del sistema de producción de leche y carne. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.....56

Figura 21. Intensidad de emisión, en kg CO₂Eq/kg proteína animal, para la PCar y PLec en un SAP. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: IE-Lec= Intensidad de Emisión de leche, IE-Car= Intensidad de Emisión para carne.57

Figura 22. Intensidad de emisión, en kgCO₂eq/kg proteína animal, para la PLec y PCar en un SAM. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: IE-Lec= Intensidad de Emisión de leche, IE-Car= Intensidad de Emisión para carne.58

RESUMEN

Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, los científicos están observando cambios en el clima de la Tierra en todas las regiones y en el sistema climático en su conjunto. Muchos de los cambios observados en el clima no tienen precedentes en miles, sino en cientos de miles de años, y algunos de los cambios que ya se están produciendo, como el aumento continuo del nivel del mar, no se podrán revertir hasta dentro de varios siglos o milenios. El sector agropecuario, forestal y otros usos de la tierra aporta ~24% de todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo, mientras que todas las especies domésticas de ganado emiten ~14.5% de emisiones antropogénicas de GEI, y sólo el ganado bovino emite 9.4% de las emisiones. El objetivo del presente estudio fue modelizar las emisiones de GEI de la cadena de valor ganado bovino de México y desarrollo de una alternativa sustentable de producción y mitigación. La metodología consistió en tres partes, 1. Cálculo del inventario de emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ por el ganado bovino productor de carne y leche a lo largo de los diferentes eslabones de la cadena de producción, 2. Modelación de las emisiones potenciales de GEI en la cadena de producción de ganado bovino de carne y leche a partir de cinco sistemas potencialmente más sustentables, y 3. Comparación de las emisiones de GEI entre el sistema convencional y el sustentable. Para llevar a cabo estas fases se utilizó el Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM-i, por sus siglas en inglés), que simula las actividades y procesos bio-físicos de las cadenas de suministro de la ganadería siguiendo la metodología de análisis de ciclo de vida según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Los resultados sugieren que las dietas diseñadas y simuladas,

dentro de cada uno de los escenarios, no se redujeron las emisiones de GEI debido a las características del modelo GLEAM-i, los resultados sí se pueden tomar como referentes para determinar cuáles son los ingredientes que componen a la dieta de los bovinos que ayudan a reducir la emisión GEI por la ganadería. Se concluye que es posible modelar las emisiones de GEI de la cadena de producción de bovino de México utilizando el modelo GLEAM-i. El inventario de emisiones de GEI de toda la cadena de producción dio como resultado para las emisiones de GEI del ESC-1 102,062.33 GgCO₂eq/año mientras que para la propuesta sustentable dio un total de 91,708.682 GgCO₂eq/año, de estas emisiones totales la mayor parte proviene de las emisiones de CO₂ las cuales están asociadas a la producción de forraje, fertilizantes/pesticidas y transporte del alimento. El ESC-5 es el que emite una menor cantidad de GEI debido a que incluye el uso de una mayor cantidad de concentrado en la dieta en comparación con los demás escenarios, los cuales se basan principalmente en el consumo de dietas altas en contenido de pastos frescos y vegetación natural. De esta forma la estrategia sustentable de alimentación es el ESC-5. Por tanto, se concluye que es posible desarrollar una cadena de producción de ganado más sustentable usando el modelo GLEAM-i.

ABSTRACT

According to the latest report from the Intergovernmental Panel on Climate Change, scientists are observing changes in the Earth's climate in all regions and in the climate system as a whole. Many of the observed changes in climate are not unprecedented in miles, if not hundreds of miles of years, and some of the changes that are already taking place, such as continued sea level rise, it cannot be reversed for several years. centuries or millennia. The agriculture, forestry and other land use sector contributes ~24% of all anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions in the world, while all domestic livestock species emit ~14.5% of anthropogenic GHG emissions, and only cattle emit 9.4% of the emissions. The objective of this study was to model GHG emissions from the Mexican cattle value chain and develop a sustainable production and mitigation alternative. The methodology consists of three parts, 1. Calculation of the inventory of CH₄, N₂O and CO₂ emissions by cattle producing meat and milk throughout the different links of the production chain, 2. Modeling of potential emissions of GHG in the beef and dairy cattle production chain from five potentially more sustainable systems, and 3. Comparison of GHG emissions between the conventional and sustainable systems. To carry out these phases, the Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM-i) was obtained, which simulates the activities and biophysical processes of livestock supply chains following the methodology of Life cycle analysis according to the United Nations Organization for Agriculture. The results suggest that the diets designed and simulated, within each of the scenarios, GHG emissions were not reduced due to the characteristics of the GLEAM-i model, the results can be taken as references to determine which are the ingredients that they make up the diet of bovines that

help reduce GHG emissions from livestock. It is concluded that it is possible to model GHG emissions from the Mexican beef production chain using the GLEAM-i model. The inventory of GHG emissions of the entire production chain resulted in GHG emissions of ESC-1 of 102,062.33 GgCO₂eq/year, while for the sustainable proposal it gave a total of 91,708.682 GgCO₂eq/year, of these total emissions, most of it comes from CO₂ emissions which are associated with the production of fodder, fertilizers/pesticides and transport of feed. ESC-5 is the one that emits the least amount of GHG because it includes the use of a greater amount of concentrate in the diet compared to the other scenarios, which are based mainly on the consumption of diets high in grass content. fresh and natural vegetation. Thus, the sustainable feeding strategy is the ESC-5. Therefore, it is concluded that it is possible to develop a more sustainable livestock production chain using the GLEAM-i model.

I. INTRODUCCIÓN

Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), publicado en el mes de agosto de 2021, los científicos están observando cambios en el clima de la Tierra en todas las regiones y en el sistema climático en su conjunto. Muchos de los cambios observados en el clima no tienen precedentes en miles, sino en cientos de miles de años, y algunos de los cambios que ya se están produciendo, como el aumento continuo del nivel del mar, no se podrán revertir hasta dentro de varios siglos o milenios (IPCC, 2021).

El sector agropecuario, forestal y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) aportan ~24% de todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo, mientras que el ganado (todas las especies domésticas) emiten ~14.5% de emisiones antropogénicas de GEI, y sólo el ganado bovino emite 9.4% de las emisiones (Van Lingen *et al.*, 2019). Para el caso de la agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) a la atmósfera. El aumento de las concentraciones de estos gases provoca un calentamiento de la superficie terrestre y la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera (Primavesi *et al.*, 2004).

Entre los gases de efecto invernadero se considera al CO₂ como el más abundante y el que actualmente tiene un mayor aporte al incremento del calentamiento global. En la actualidad las concentraciones de CH₄ son inferiores a las de CO₂, sin embargo, el CH₄, se está

incrementando rápidamente debido al aumento en el consumo de carne y leche de bovino, y además posee una capacidad de producir efecto invernadero 21-30 veces más alta con respecto al CO₂, considerándose que en el tiempo el CH₄ pueda ser predominante si se continúa la tendencia actual (Carmona *et al.*, 2005).

En el caso de la ganadería bovina, la producción de leche y carne provenientes del ganado bovino tienen una elevada demanda por la sociedad, por lo que uno de los objetivos de la cadena convencional de producción de carne es la producción de este alimento en volúmenes suficientes de manera que se cubra la demanda de la población, pero sin tener altas emisiones de CH₄ y N₂O para así evitar afectar al medio ambiente. En este sentido el desarrollo de sistemas de producción de ganado bovino bajos en emisiones de GEI es una prioridad mundial con el objeto de mitigar el calentamiento de la tierra y el cambio climático (Castelán-Ortega *et al.*, 2019).

Lo expuesto anteriormente permite reflexionar sobre los métodos que deben de manejarse para la producción más sustentable de carne y leche procedente de los rumiantes domésticos, ya que en forma directa contribuyen a la emisión de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) debido a la fermentación ruminal, así como también al óxido nitroso (N₂O) que surge a partir de la degradación de heces y orina de los rumiantes en el suelo (Castelán-Ortega *et al.*, 2019); y de manera indirecta surge durante el proceso de producción de forraje.

El CH₄ es un producto final en la fermentación que sufren los alimentos en el rumen, que en términos de energía constituye una pérdida del sistema y en términos ambientales contribuye al calentamiento de la atmósfera y al cambio climático global y este permanece en la atmósfera entre 9 y 15 años capturando el calor proveniente del sol (Eckard *et al.*, 2010).

Para poder medir el CH₄ producido por el ganado bovino se emplea el uso de cámaras de respiración, ya que con esta técnica hay una mayor precisión para determinar la cantidad de CH₄ producido por el animal (Castelán-Ortega et al., 2019).

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.*, 2019a), para una población aproximada de 31.8 millones de cabezas, registradas por el Padrón Ganadero Nacional (2016). Sin embargo, en el mencionado estudio no se hizo el inventario de las emisiones de N₂O y CO₂, los cuales son importantes forzadores de cambio climático y que se producen en grandes cantidades por la ganadería y tampoco se evaluaron las emisiones de estos gases a lo largo de la cadena productiva, ya que sólo se determinó el inventario para emisiones de CH₄ por fermentación entérica debido a que no se cuenta en México con factores de emisión (FE) nacionalmente determinados. Por otro lado, no se cuenta en México con modelos de producción alternativos encaminados a mitigar las emisiones de GEI por la ganadería (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2020).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue modelizar las emisiones de gases de efecto invernadero de la cadena de valor ganado bovino de México y desarrollo de una alternativa sustentable de producción y mitigación.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo General

- El objetivo del presente estudio fue modelar las emisiones de gases de efecto invernadero de la cadena de valor ganado bovino de México y desarrollo de una alternativa sustentable de producción y mitigación empleando el modelo GEAM-i.

2.2. Objetivos específicos

- Calcular el inventario de emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ por el ganado bovino productor de carne y leche a lo largo de los diferentes eslabones de la cadena de producción.
- Modelar las emisiones potenciales de GEI de una cadena de producción de ganado bovino de carne y leche a partir de cinco sistemas potencialmente más sustentables.
- Comparar las emisiones de GEI entre el sistema convencional y el sustentable.

2.3. Hipótesis

Los inventarios de CO₂, CH₄ y N₂O son menores en un sistema ganadero sustentable en comparación con la cadena convencional de producción de leche y carne de bovino de México.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. El papel de la agricultura en la emisión de gases de efecto invernadero y el calentamiento global.

Una de las actividades desarrolladas por el ser humano que genera grandes cantidades de emisiones de GEI es la agricultura (Figura 1), con lo cual se contribuye al calentamiento global y por consiguiente al cambio climático (International Atomic Energy Agency [IAEA] 2023). El sector agropecuario aporta el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, teniendo así una contribución de 12% en la generación de GEI dentro de las emisiones nacionales de México. Entre los gases de mayor importancia se encuentran CH_4 y N_2O con un poder de calentamiento aproximado de 28 y 265 veces, respectivamente, estas emisiones surgen a partir de la fermentación entérica, el manejo del estiércol, la respiración del suelo, la descomposición de la biomasa por la microflora del suelo, y por el uso de fertilizantes en los suelos agrícolas como se muestra en la Figura 1 (Saynes *et al.*, 2016).

Para el caso de la producción de alimentos hay una emisión de GEI del 27% del cual el 21% proviene de la producción de alimentos destinados al consumo humano y el 6% restante es para los alimentos que se administran a los animales, los tres gases principales que se producen son el N_2O por la aplicación de agroquímicos y el estiércol, el CH_4 por la producción de arroz y la ganadería, y el CO_2 por la utilización de la maquinaria agrícola para el cultivo de la tierra y el transporte de alimentos e insumos (Hannah, 2019).

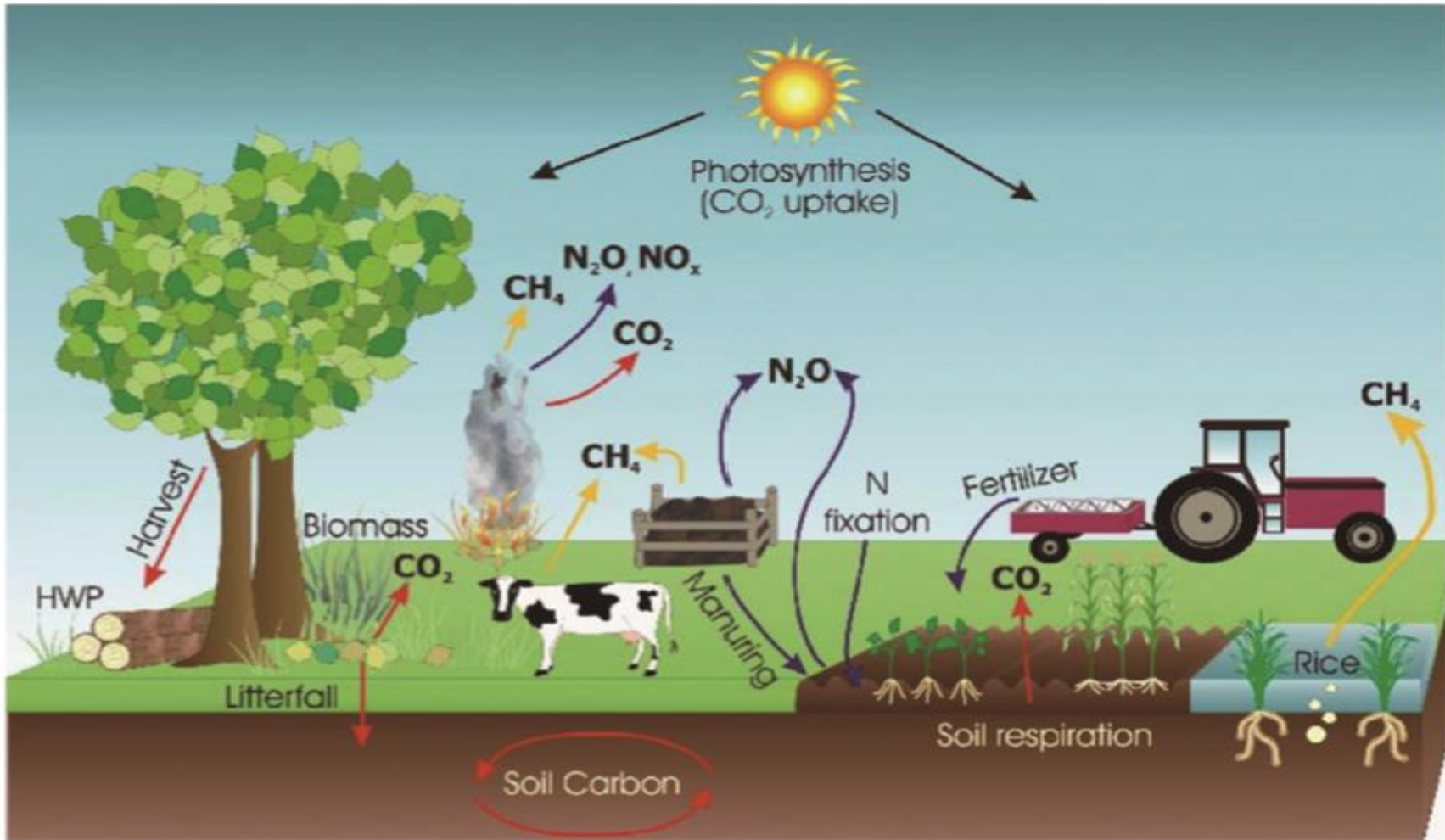


Figura 1. Emisión y flujo de gases de efecto invernadero a partir de la agricultura y la ganadería según el IPCC, (2006).

En este sentido, la ganadería juega un papel muy importante como una fuente principal de suministro de alimento y por lo tanto al crecimiento económico mundial, sin embargo, al desarrollarse la ganadería hay un desgaste en los recursos naturales y esto genera impactos al ambiente, su aporte al deterioro ambiental es debido a las emisiones antropogénicas de GEI mediante las cadenas de suministro del ganado (IPCC, 2007).

El sector ganadero es una fuente significativa de la emisión de GEI contribuyendo así al cambio climático ya que de manera directa emite CH₄ y N₂O a través de la fermentación ruminal, así como la degradación de heces y orina, de manera indirecta por medio de las actividades que involucran la producción de forrajes y la conversión de bosques en pasturas para alimentar al ganado (Castelán-Ortega *et al.*, 2019b). En un estudio realizado por Steinfeld *et al.*, (2006) determinó que la ganadería emite 7.1 Gt de CO₂-eq, aproximadamente 18% de la emisión antropogénica global de GEI. De los GEI que produce específicamente el ganado se puede decir que una vaca adulta genera al día 700L de CH₄, además, es el CH₄ es 28 veces más activo en su efecto invernadero que el CO₂ (IPCC, 2013), considerando que tiene una vida media de entre 9 a 15 años en la atmósfera (Eckard *et al.*, 2010).

Parte de las emisiones generadas por el sector AFOLU se deben a las cadenas de suministro, ya que el 18% de las emisiones derivan de actividades como el transporte, envasado y la venta de productos e insumos, ya que también estas actividades requieren usar recursos y energías fósiles (Hannah, 2019). En el 2010 los rumiantes contribuyeron con el 29% de la producción de carne a nivel mundial, mientras que para el sector lácteo tuvo una producción mundial del 83%, por lo que desarrollar estrategias que ayuden a bajar las emisiones de gases de efecto invernadero es fundamental, ya que se espera que la actividad ganadera tenga un

crecimiento exponencial debido a la creciente demanda de leche y carne, y por lo tanto los niveles de GEI que se emiten también van en aumento (Opio *et al.*, 2013).

Desarrollar estrategias de producción ganadera en donde bajen los niveles de emisiones de GEI sin que se vea comprometida la calidad y rendimiento del producto final es de vital importancia, ya que la producción conduce a generar aumentos estrechamente proporcionales a las emisiones, es decir, por cada kilogramos de producto animal producido hay un aumento en los kilogramos de GEI MacLeod *et al.*, (2017).

Se estima que los rumiantes producen aproximadamente 5.7 Gt de CO₂-eq/año del total de las emisiones de GEI por el sector ganadero, el cual tiene una representación de 80% (4.6 Gt CO₂-eq), para el caso de las emisiones que se desprenden en la producción de leche y carne son del 30% y 35% respectivamente (Opio *et al.*, 2013).

3.2. Principales gases de efecto invernadero y su potencial para inducir cambio climático.

El CH₄, CO₂ y N₂O son los principales GEI, el metano deriva de la fermentación ruminal, el CO₂ se desprende debido a la combustión de energía fósil para la elaboración de alimentos y fertilizantes, fabricación y utilización de maquinaria, por mencionar algunos ejemplos, y finalmente el N₂O surge a partir del manejo del estiércol, la aplicación de fertilizantes químicos y durante los procesos de nitrificación y desnitrificación del suelo. El potencial para generar calentamiento global es diferente entre ellos (Vicente, 2019).

Las concentraciones de CH₄, CO₂ y N₂O en la atmosfera son considerablemente más altas en los últimos años en comparación con la época previa a la revolución industrial (IPCC, 2013).

La manera en la que estos gases contribuyen al calentamiento global es mediante la absorción de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre (IPCC, 2007). La tasa de incremento de estos gases va creciendo exponencialmente debido al incremento en la demanda de alimentos tanto de origen animal (láctico y cárnico) como de origen vegetal (maíz, frijol, arroz) y esto se deriva por el incremento de la población mundial. Se identifican cuatro fuentes principales de emisión por parte de la ganadería (FAO, 2023):

- **Fermentación entérica:** En este proceso se genera el CH_4 durante la digestión de los rumiantes; la calidad de la dieta se relaciona estrechamente con las emisiones entéricas, ya que las dietas con un porcentaje de inclusión alto en fibras traerán como consecuencia mayores emisiones entéricas de CH_4 . Esta fuente representa el 44% de las emisiones GEI del sector ganadero.
- **Producción de alimentos:** La expansión de pastizales y tierras de cultivo usadas para la alimentación animal, la fabricación de fertilizantes y pesticidas para los cultivos, así como su procesado y transporte emiten CO_2 , mientras que el uso de fertilizantes nitrogenados y la aplicación de estiércol promueven la emisión de N_2O . Esta es la segunda fuente importante de GEI con un aporte de 3,3 Gt de CO_2 -eq lo cual representa un 41% del total.
- **Gestión de estiércol:** En este proceso se genera CH_4 cuando el estiércol se almacena y se trata en sistemas líquidos mientras que los sistemas de almacenamiento y tratamiento sólido tiende a desarrollar emisiones de N_2O , con estos dos gases se están emitiendo 0.8 Gt de CO_2 lo cual representa el 10% de las emisiones para el sector.

- **Consumo de energía:** Se generan cerca de 0.4 Gt de CO₂-eq (5% del total) durante toda la cadena de producción.

3.2.1. Emisiones de CH₄

La presencia de CH₄ en la atmósfera es vital, ya que ayuda a retener el calor a la atmósfera, sin embargo, cuando hay demasiado CH₄ en la atmósfera las capas de gases de efecto invernadero se vuelven mucho más densas lo que provoca que haya una retención de calor que sobrepasa los límites normales ayudando de esta manera al calentamiento en la superficie terrestre y, por lo tanto, a la destrucción de la capa de ozono (Caballero *et al.*, 2017). Este gas además de contribuir la crisis climática también es partícipe en el deterioro de la calidad del aire y por lo tanto esto genera un impacto en la salud humana, (CEMDA, 2018).

El CH₄ es el más abundante después del CO₂ y según Montzka *et al.*, (2011) es 28 veces mayor su potencial de calentamiento en comparación con CO₂, su periodo de vida en la atmósfera es entre 9 a 15 años (IPCC, 2013). El CH₄ forma parte del grupo de Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC), por lo que es importante desarrollar estrategias que regulen las emisiones de este gas y así poder bajar las emisiones en un periodo de tiempo más corto (CEMDA, 2018), pues se sabe que los niveles de CO₂ en la atmósfera no bajarán en cientos de años.

De manera global alrededor del 60% de la emisión de CH₄ surge de actividades humanas como fugas de los sistemas de gas natural, industria, manejo de desechos y de la ganadería principalmente (FAOSTAT, 2014).

En el sector agropecuario el CH₄ tiene un aporte del 52% (Baumert, *et al.*, 2005) y este proviene principalmente de la fermentación entérica, de cultivos de maíz, así como también de desechos animales (Bousquet *et al.*, 2006). Por parte de la agricultura hay un aporte del 8% de las emisiones de CH₄ vinculadas a los seres humanos, entre otros cultivos, el cultivo de arroz forma parte de los cultivos que emiten grandes cantidades de CH₄, ya que los campos en donde se produce deben de estar inundados lo cual evita que el oxígeno penetre en el suelo favoreciendo así las condiciones ideales para el desarrollo de las bacterias emisoras de CH₄ (UNEP, 2023).

Dentro de la ganadería los rumiantes son los principales contribuyentes al deterioro de la capa de ozono y por consiguiente al calentamiento global debido a las altas cantidades de gases que liberan, en especial por la emisión de CH₄ el cual se genera a partir de los procesos fermentativos del alimento al ingresar al rumen, contribuyendo aproximadamente con el 15 al 20% de las emisiones mundiales de CH₄. La producción de CH₄ en los bovinos deriva porque en su proceso digestivo, que ocurre bajo condiciones anaeróbicas, hay la participación de diferentes tipos de bacterias entre ellas se encuentran las metanogénicas, las cuales degradan la celulosa ingerida a glucosa, que fermentan luego a ácido acético y por lo tanto se reduce el CO₂ formando así al gas CH₄ durante el proceso (Carmona *et al.*, 2005).

La emisión de CH₄ por los rumiantes se atribuye al consumo de alimento, composición de la dieta, digestibilidad del alimento, procesamiento previo del alimento y frecuencia de la alimentación; entre las estrategias para disminuir las emisiones de CH₄ se propone: bajar el número de rumiantes, manipulación genética de los microorganismos ruminales metanogénicos, desarrollo de razas que tienen una baja producción de CH₄ y manipulación

de la dieta destinada al ganado rumiante, de las opciones mencionadas la última es más factible ya que muestra resultados en un corto tiempo (Bonilla y Lemus, 2011).

3.2.2. Emisiones de CO₂

El uso de combustibles fósiles para generar electricidad, el uso de transporte y maquinaria, así como los procesos de manufactura e industrialización generan emisiones en un 93% de las emisiones de CO₂ (Osorio, 2021).

En el caso del dióxido de carbono, no es considerado un GEI importante dentro del sector AFOLU, ya que las emisiones registran un rango entre 3 a 4.5% dentro del sector agropecuario (Sauerbeck, 2001). Sin embargo, las actividades derivadas de manera indirecta de las actividades agrícolas sí son altamente significativas al reducir la fertilidad y productividad de los suelos cultivados (Paustian *et al.*, 2000). Las emisiones de CO₂ provienen de la expansión de pastizales y tierras de cultivo para destinarlas a la alimentación animal en zonas naturales o de bosque, la fabricación de fertilizantes y pesticidas para dichos cultivos, así como su procesado y transporte también provoca que aumenten las emisiones dentro del sector agropecuario de dicho gas (FAO, 2023).

En estudios anteriores realizados por Six *et al.*, (1999) reportan que las emisiones de CO₂ pueden ser significativas bajo un sistema de labranza convencional y por la incorporación de abonos orgánicos.

3.2.3. Emisiones de N₂O

El N₂O es uno de los gases de efecto invernadero que tiene un impacto significativo para el surgimiento del cambio climático, ya que su presencia en la atmosfera propicia el deterioro

y destrucción de la capa de ozono (Núñez-Ramos *et al.*, 2021). La agricultura, la combustión de combustible, el manejo de aguas residuales y los procesos industriales están incrementando las emisiones de N₂O las cuales son desarrolladas por el ser humano, de manera natural el N₂O también está presente ya que forma parte del ciclo del nitrógeno en la atmosfera. Es importante mencionar que las moléculas de N₂O tiene un periodo de vida de 114 años en la atmosfera (EPA, 2022).

Las emisiones de N₂O de origen natural se asocian al ciclo del nitrógeno, por ejemplo: la circulación natural del nitrógeno en la atmosfera, las plantas, los animales, así como también los microorganismos que viven en la tierra y en el agua. Entre las formas naturales de absorber el N₂O presente en la atmosfera es cuando las bacterias del género *Rhizobium* (fijadoras de nitrógeno) se encuentra en simbiosis con las raíces de las plantas leguminosas, al introducirse en los tejidos radiculares de las plantas se forman nódulos en los cuales el nitrógeno atmosférico se fija y se proporciona a la planta en forma de compuestos orgánicos nitrogenados (EPA, 2022; Fertilab, 2011).

El óxido nitroso tiene una capacidad de retención de calor 265 veces superior a la del dióxido de carbono aun a pesar de que el N₂O está presente en la atmósfera en cantidades muy reducidas (IPCC, 2013). El N₂O no solo contribuye al calentamiento global sino también al deterioro de la capa de ozono (Castelán-Ortega *et al.*, 2021).

Como ya se mencionó, la agricultura es una de las fuentes principales de emisiones de N₂O, el cual se produce a través de la nitrificación y desnitrificación (Illarzea *et al.*, 2017), en este sentido, las praderas que forman parte del sistema agropecuario tienen un aporte importante de N₂O a causa del estiércol y orina producida por ganado, los cuales eliminan entre el 75 y

90% del nitrógeno consumido en el pastoreo, ya que el ganado bovino es poco eficiente en el uso del nitrógeno de la dieta. Por ejemplo, del 100% de nitrógeno consumido por los bovinos, sólo se retiene entre el 5 y 30% y el sobrante de excreta a través de la orina y las heces (Oenema *et al.*, 2005).

Globalmente, de las emisiones de N₂O con origen antropogénico un 65% corresponden al sector pecuario, el resto son las emisiones agrícolas, por lo tanto, la ganadería es responsable de aproximadamente 75 a 80% de las emisiones de N₂O (FAO, 2006). Las actividades agrícolas son la principal fuente de óxido nitroso ya que es emitido principalmente por los suelos (Snyder *et al.*, 2009), constituyen el 8% de las emisiones totales de GEI por lo que del sector agrícola genera aproximadamente la mitad. Las emisiones son generadas a partir de heces y orina animal, del uso excesivo e inadecuado de fertilizantes nitrogenados en los suelos agrícolas, así como de la quema de biomasa según Montzka *et al.*, (2011) y Snyder *et al.*, (2009). Las camas del ganado, el estiércol sólido y las capas superficiales de estiércol almacenado, y en el suelo después de la adición de estiércol son fuentes importantes de N₂O.

3.3. Emisiones de CH₄, CO₂ y N₂O por la ganadería bovina en la cadena convencional de producción de carne de bovino.

En los últimos años el análisis de ciclo de vida (ACV) en estudios de impacto ambiental se ha vuelto más frecuente, debido a las condiciones climáticas a las que nos enfrentamos, y a la necesidad de poder encontrar una solución a este problema. En resumen, el ACV genera escenarios de los procesos de producción de uno a más bienes y de esta manera se identifican las etapas importantes en donde se generan los impactos más relevantes para identificarlos y

así tomar mejores decisiones para bajar en este caso las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2023).

Las emisiones de GEI pueden tener un origen directo o indirecto, por lo que conocer su nivel de impacto permite desarrollar estrategias para disminuir o mitigar estas emisiones. Para realizar su cuantificación se realiza un ACV del producto, el cual pasa regularmente por las siguientes etapas: generación, producción, procesamiento, distribución, venta, uso y eliminación (FAO, 2017). Para el caso del modelo GLEAM-i identifica tres áreas importantes en el desarrollo del análisis de las cadenas de producción: Las emisiones previas a la producción ganadera, que están relacionadas con la elaboración, procesamiento y transporte de los alimentos; la gestión del estiércol y el consumo de la energía en la granja las cuales forman parte de las fuentes de las emisiones relacionadas con la cría de los animales y finalmente las emisiones que son posteriores a la producción las cuales incluyen el procesamiento y transporte de los productos finales (FAO, 2023).

Ahora bien, la producción de alimentos es considerada una de las actividades que más efecto tiene sobre el medio ambiente, ya que, considerando todas las fases para su producción, incluyendo la eliminación de residuos, aporta un 19% y hasta el 29% de las emisiones antropogénicas de GEI a nivel mundial (Vitali *et al.*, 2018).

A nivel mundial, se reconoce a las actividades ganaderas como una de las principales fuentes de emisiones de GEI (Dangal *et al.*, 2017, pues sus cadenas de producción emitieron un total de 8.1 Gt de CO₂-eq en el 2010 (FAO, 2017). El CH₄ aporta 50% mientras que el y CO₂ el N₂O aportan el 26% y 24% del total de las emisiones. Considerando las emisiones por especie se determinó que el ganado vacuno es el mayor emisor con aproximadamente 5,0 GtCO₂-eq

el cual representa el 62% del total de las emisiones, por lo anterior tanto la carne como la leche proveniente de ganado bovino son los principales productos que aportan el 3,0 y 1,6 GtCO₂-eq del total de las emisiones de GEI, (FAO, 2023). Aunado a lo anterior, el impacto de la ganadería también se observa en el porcentaje de las tierras que son dedicadas a la producción de alimentos para el ganado; de acuerdo con la FAO (2019), 80 % de los pastizales y suelos de cultivo se emplean para este propósito (Galicía *et al.*, 2021).

3.4. Ejemplos de sistemas sustentables de producción de ganado bovino bajos en emisiones de gases de efecto invernadero.

En 2018 se realizó un estudio en Italia, donde se sometieron a evaluación dos sistemas de producción para la producción de carne, uno bajo el sistema convencional y otro orgánico, con el objetivo de estimar las emisiones de GEI producidos durante el ciclo de vida. Para determinar las emisiones de los GEI se hizo mediante un enfoque de evaluación del ciclo de vida del producto, de esta manera se calcula la huella de carbono por un kilogramo de carne de peso vivo. Las variables que se tomaron en cuenta para comparar el ciclo de vida de las dos producciones fueron los aportes de la producción de alimentos, la fermentación entérica y el manejo del estiércol, así como la evaluación del balance de carbono en el suelo. Los resultados para el sistema orgánico fueron 24,62 kg CO₂-eq /kg peso vivo mientras que el convencional obtuvo 18,21 kg CO₂-eq /kg peso vivo, por lo que el sistema orgánico produce más emisiones de GEI que el convencional (Vitali *et al.*, 2018)

En otro estudio realizado en Portugal en el año 2018 reportó que para un sistema semi-intensivo se emiten 22,3 kg CO₂-eq kg⁻¹ mientras que en un sistema orgánico intensivo se

producen 16,4 kg CO₂-eq kg⁻¹, este estudio se enfocó en bovinos de carne, dentro del estudio se tomó en cuenta la cadena de producción del ganado bovino desde la producción de alimentos hasta el matadero (Presumido *et al.*, 2018).

Los sistemas silvo pastoriles y agro-silvo-pastoriles son también una opción relevante para desarrollar sistemas más sustentables de producción de ganado bovino y que se han venido evaluando desde ya hace varios años. Por ejemplo, Said *et al.*, (2021) llevaron a cabo un experimento en Brasil con el objetivo de entender la relación entre el ganado, la producción de árboles y la emisión de gases de efecto invernadero en un sistema de producción silvo-pastoril. Utilizaron arboles *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, la especie de pasto *Brachiaria decumbes* vacas lecheras cruzadas de cebú x Holstein, todos integrados en un sistema semi-intensivo de producción de leche. El balance de carbono lo obtuvieron al comparar las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI) a partir de fermentación entérica y heces del ganado, consumo de electricidad, combustible fósil, nitrógeno, y cal de uso agrícola; con la fijación de nitrógeno por los árboles y el pasto. Estos autores reportaron que el incremento anual de carbón capturado fue de 7.631 Mg CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹ y la emisión promedio anual de 5.817 Mg CO₂-eq ha⁻¹ year⁻¹, concluyendo que el balance de carbono en todos los años evaluados fue positivo evidenciando la contribución del sistema silvo-pastoril para minimizar la emisión de GEI asociados a la producción de leche.

Igualmente, Murgueitio-Restrepo *et al.*, (2014) mencionan que los sistemas silvo-pastoriles intensivos (SSi) son una herramienta emergente para la mitigación y adaptación de la ganadería al cambio climático. Estos autores mencionan que con los SSi se puede producir hasta 12 veces más carne que en los sistemas intensivos tradicionales sin que ello conlleve a

un incremento en la emisión de metano de la misma magnitud, la cual sería de sólo 6.8. a 2.8 más alta en los SSi. Por lo tanto, la emisión de metano por kilogramo de carne sería 1.8 veces más baja en un SSi comparado con un sistema extensivo. Los mismos autores también menciona que producir 10,000 ton. de carne por año requiere de 150,000 ha de praderas en sistemas extensivos, las cuales tienen un balance de emisiones de GEI negativo de más de 48,000 ton de CO₂-eq mientras que con SSi sólo se requiere de 12,000 ha con un balance positivo de más de 3,000 ton de CO₂-eq reducido.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del lugar de estudio

El presente estudio se inició durante el mes de marzo de 2022 y se finalizó en el mes de febrero de 2023 dentro del Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables (LAGMAER) de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México (FMVZ-UAEMex), ubicado en El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, con una latitud norte de 19° 24' 15", longitud oeste de 99° 41' 06", y a una altura de 2 632 msnm.

4.2. Metodología

La metodología se compone de tres partes, 1. Cálculo del inventario de emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ por el ganado bovino productor de carne y leche a lo largo de los diferentes eslabones de la cadena de producción empleando el modelo GLEAM-i, 2. Modelación de las emisiones potenciales de GEI en la cadena de producción de ganado bovino de carne y leche a partir de cinco sistemas potencialmente más sustentables, y 3. Comparación de las emisiones de GEI entre el sistema convencional y el sustentable. La Figura 2 muestra las etapas antes mencionadas, en donde se utilizó el Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM-i, por sus siglas en inglés), el modelo GLEAM-i es un entorno SIG en línea que simula las actividades y procesos bio-físicos de las cadenas de suministro de la ganadería siguiendo la metodología de análisis de ciclo de vida propuesta por la FAO, (2023) como se muestra en la Figura 3. El objetivo de GLEAM-i es cuantificar la producción ganadera bovina y el uso de recursos naturales del sector, así como identificar los impactos ambientales de la ganadería, a través del cálculo de inventarios de emisiones de GEI, a fin de contribuir para la evaluación de escenarios de mitigación de estos gases para el desarrollo de un sector ganadero más sustentable.

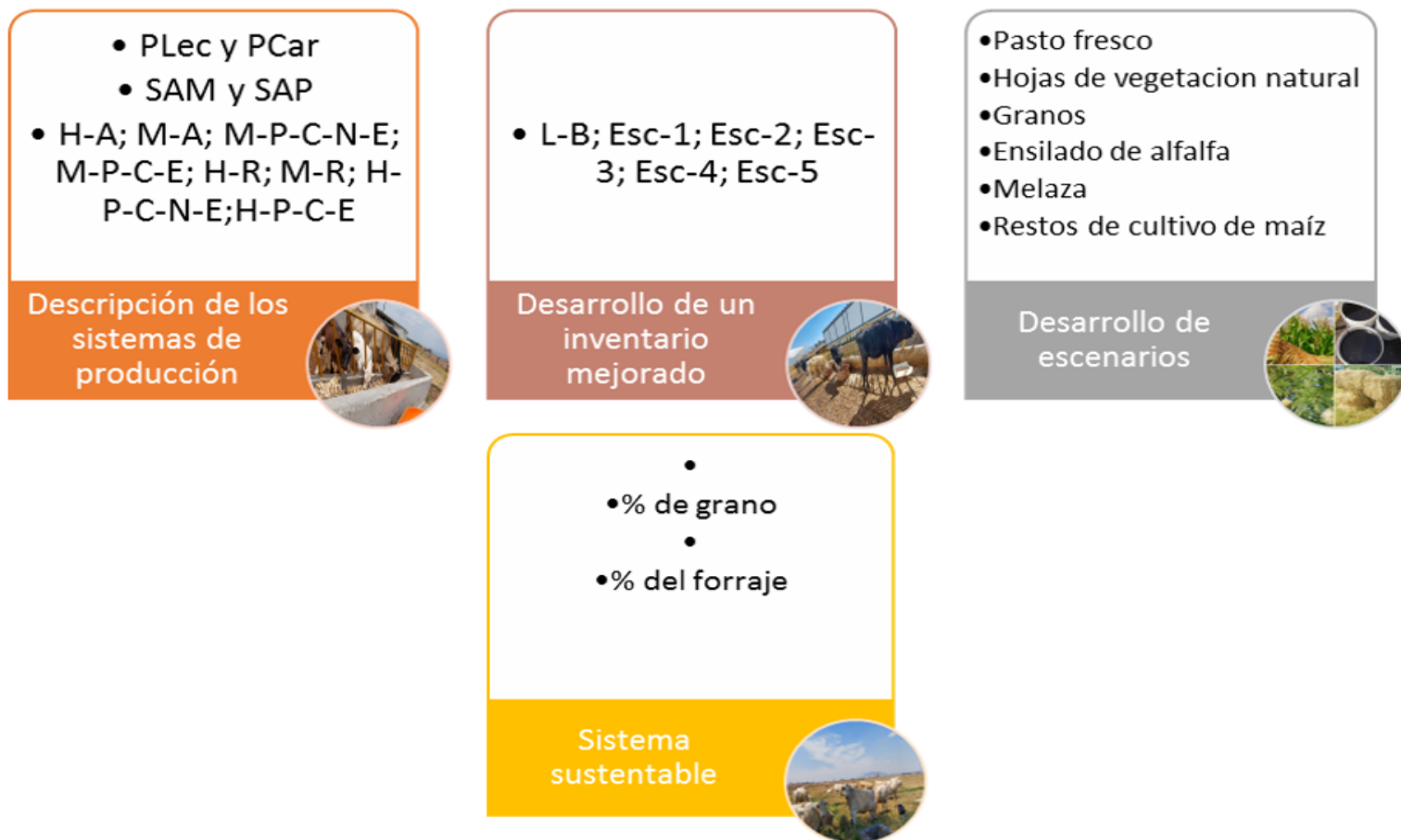


Figura 2. Desarrollo de la metodología para el diseño de un sistema de producción de ganado bovino bajo en emisiones de gases de efecto invernadero.

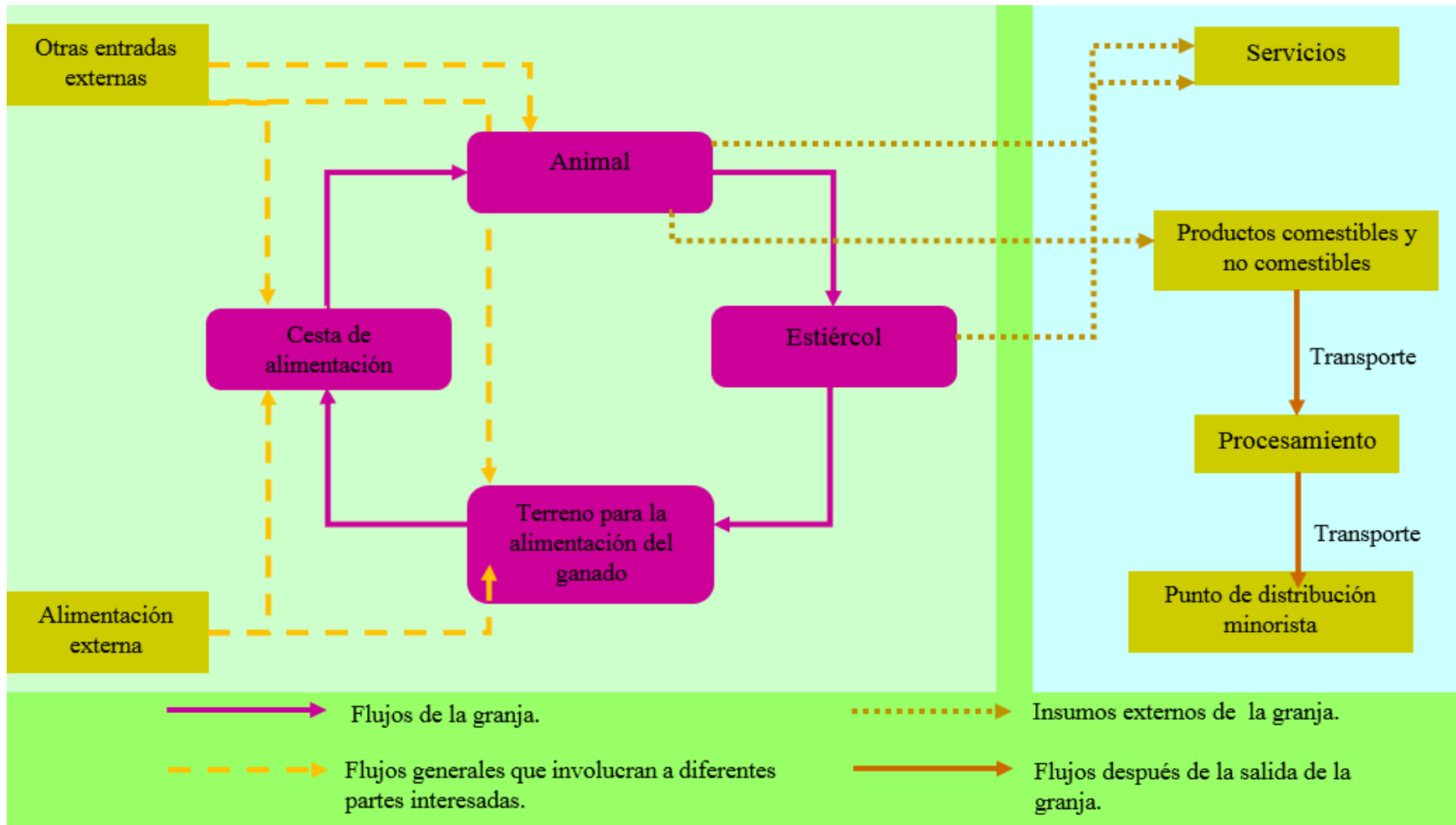


Figura 3. Secuenciación para realizar el análisis de ciclo de vida utilizado por la FAO, 2017.

1.- Cálculo del inventario de emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ por el ganado bovino a lo largo de los diferentes eslabones de la cadena de producción empleando el modelo GLEAM-i.

El sistema GLEAM-i divide para realizar el proceso de simulación y cálculo del inventario al hato ganadero de los países en: Sistemas de producción de leche (PLec) y carne (PCar), y para cada uno de estos utiliza dos sistemas de alimentación: mixta (SAM) y pastoreo (SAP). Con respecto a las categorías del hato GLEAM-i desagrega al hato en: hembras adultas, animales de reemplazo y machos adultos, ganado productor de carne que no está en engorda, animales en engorda, y para cada una de estas categorías divide al hato en:

Ganado productor de carne:

1. Hembras adultas (HA).
2. Machos adultos (MA).
3. Machos productores de carne que no están en engorda (MPCNE).
4. Machos productores de carne en engorda (MPCE).
5. Hembras de reemplazo (HR).
6. Machos de reemplazo (MR).
7. Hembras productoras de carne que no están en engorda (HPCNE).
8. Hembras productoras de carne en engorda (HPCE).



Figura 4. Ganado productor de carne.

Ganado productor de leche:

1. Hembras adultas (HA).
2. Machos adultos (MA).
3. Machos productores de carne que no están en engorda (MPCNE).
4. Machos productores de carne en engorda (MPCE).
5. Hembras de reemplazo (HR).
6. Machos de reemplazo (MR).
7. Hembras productoras de carne que no están en engorda (HPCNE).
8. Hembras productoras de carne en engorda (HPCE).

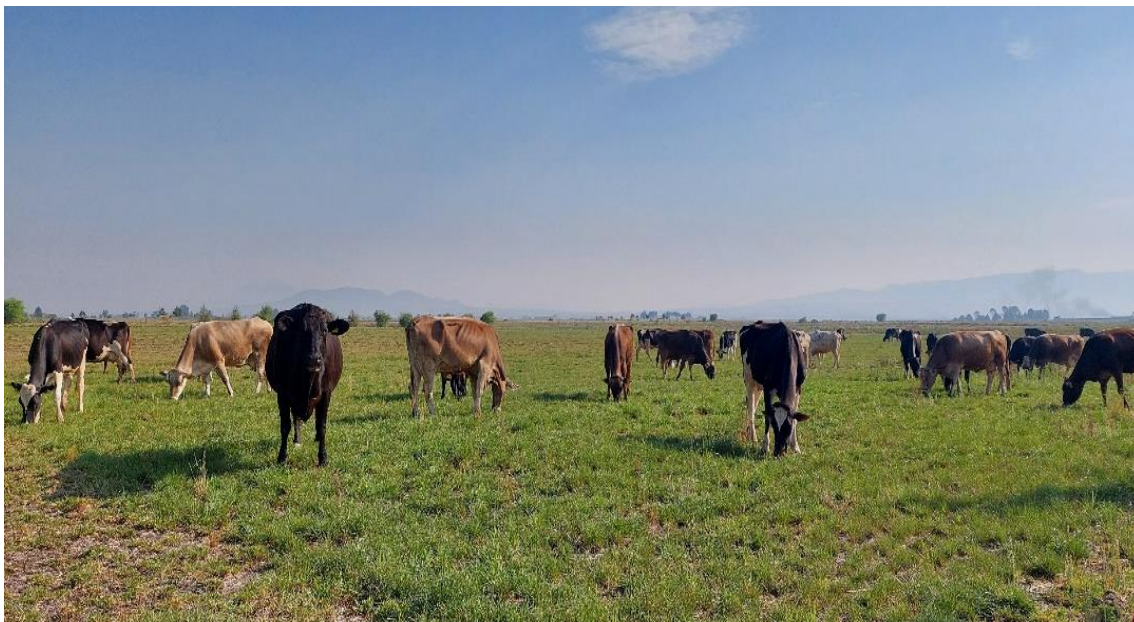


Figura 5. Ganado productor de leche.

Es decir, GLEAM-i desagrega al hato en 16 categorías de ganado, esta división del hato se debe a que no todos los animales produce la misma cantidad de CH_4 y otros gases de efecto invernadero, por ejemplo la categoría que emite más CH_4 son las vacas adultas que están produciendo leche, seguida por las vacas adultas productoras de carne, mientras que las categorías que menos emiten son los animales jóvenes, y las hembras y machos que están en engorda, debido a que la dieta, alta en granos, con que se alimenta a esta última categoría resulta en una baja producción de CH_4 como se discutirá más adelante.

- **Desarrollo de un inventario mejorado**

Para este inventario se tomaron los datos de actividad (DA) para tamaño de la población de ganado bovino, categorización del hato, sistemas de alimentación y factores de emisión (FI) de GEI por defecto que utiliza la FAO (2019), en el modelo GLEAM-i para México, para calcular el inventario de emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O . El resultado de este

inventario simulado fue considerado como la línea a base (LB) del presente estudio, a partir del cual se contrastaron los escenarios que fueron desarrollados en la siguiente fase.

2.- Modelación de las emisiones potenciales de GEI de la cadena de producción de ganado bovino de carne y leche a partir de cinco sistemas potencialmente más sustentables.

Para el desarrollo de los inventarios se simularon “escenarios” empleando el modelo GLEAM-i. Los escenarios son simulaciones desarrolladas a través de modelos matemáticos cuyo objetivo principal es responder a la pregunta ¿Qué pasaría sí? Por ejemplo, ¿Qué pasaría sí se emplea un sistema de producción de ganado bovino basado en una alimentación más sustentable? ¿Cómo este escenario impactaría en las emisiones de GEI? ¿Ayudaría un sistema de alimentación alternativo a mitigar el cambio climático?

- **Descripción del proceso de formulación de escenarios**

Se simularon cinco escenarios empleando el modelo GLEAM-i, como se muestra en el Cuadro 1, en donde cada escenario consiste en cuatro dietas, de las cuales dos son para la categoría de vacas adultas en PLec, y dos para vacas adultas de PCar. Así mismo, se consideraron los dos sistemas de alimentación para cada categoría de ganado: SAP, el cual se encuentra en áreas dominadas por pastos y pastizales con un periodo corto de crecimiento, menor a 60 días, o baja densidad humana (menor a 20 personas /Km²) en la que más del 10% de MS se produce en una explotación agrícola, y cuya carga animal media anual es inferior a 10 unidades de ganado/ha de tierra agrícola. El otro sistema, SAM, el cual se encuentra en áreas dominadas por cultivos o áreas con un periodo de crecimiento mayor a 60 días, y una densidad humana mayor a 20 personas/km² y donde

más del 10% de la MS proviene de subproductos de cultivos o rastrojos, y más del 10% del valor de la producción proviene de actividades no ganaderas, lo anterior de acuerdo con la definición de FAO (2017).

Es decir, en total se simularon 20 escenarios más la LB, para cada escenario se desarrolló una dieta como se muestra en el Cuadro 1, en donde se observan los ingredientes que conforman cada una, así como su porcentaje de inclusión. La selección de la dieta para el ganado PLec y PCar se determinó a partir de la región geo-climática en donde su ubica geográficamente la mayor población de ganado en México y, dependiendo el sistema de alimentación, SAP y SAM, se seleccionaron los ingredientes que funcionan como suplemento y como forraje. Los ingredientes se seleccionaron de la base de datos del modelo GLEAM-i, donde no existe la posibilidad de agregar algún ingrediente adicional.

- **Los criterios para la formulación de las dietas fueron:**

1. Inclusión de forrajes y suplementos comúnmente empleados por los ganaderos en México de acuerdo con la descripción aportada por Castelán-Ortega-Ku-Vera *et al.*, (2019).
2. Ingredientes que pueden tener algún efecto anti-metanogénico.
3. Ingredientes que se producen localmente, y su producción no representa una huella de carbono importante. Por ejemplo, la mayor parte de la soya que se emplea para alimentar al ganado en México es importada de otros países, por un lado, y, por otro lado, se talan bosques y selvas para su producción en los países donde se cultiva como Brasil. En el Escenario 1 (Esc-1) se asumió que los animales en todos los sistemas de producción y

alimentación consumieron solamente pasto, ya que, en la mayoría de los casos en México, el ganado bovino se mantiene bajo condiciones de pastoreo.



Figura 6. Ganado productor de leche consumiendo una dieta con ingredientes locales.

Cuadro 1. Escenarios simulados empleando el modelo GLEAM-i por sistema de producción y dieta empleada en la alimentación de vacas adultas.

Sistema de Producción	Ingrediente	Sistema de Producción	Ingrediente	Sistema de Producción	Ingrediente	Sistema de Producción	Ingrediente
Escenario 1 (Esc-1)							
Leche -SAP	%	Carne-SAP	%	Leche-SAM	%	Carne-SAM	%
Pasto	100	Pasto	100	Pasto	100	Pasto	100
Escenario 2 (Esc-2)							
Leche -SAP		Carne-SAP		Leche-SAM		Carne-SAM	
Pasto fresco	60	Pasto fresco	30	Pasto fresco	40	Pasto fresco	40
Hojas de vegetación natural	30	Hojas de vegetación natural	50	Hojas de vegetación natural	10	Heno o Ensilado de Alfalfa	20
Granos	10	Heno o Ensilado de Alfalfa	10	Residuos de cultivo de Maíz	10	Ensilado de plantas integrales	10
		Granos	10	Ensilado de Maíz	10	Subproducto seco de las industrias de granos	10
				Granos	30	Granos	20
Escenario 3 (Esc-3)							
Leche -SAP		Carne-SAP		Leche-SAM		Carne-SAM	
Mezcla fresca de pastos y legumbres	45	Pasto fresco	75	Mezcla fresca de pastos y legumbres	45	Pasto fresco	75
Ensilado de maíz	30	Melaza	5	Ensilado de maíz	30	Melaza	5
Granos	20	Residuos de cultivo de maíz	10	Granos	20	Residuos de cultivo de maíz	10
Subproductos de semilla de algodón	5	Granos	10	Subproductos de semilla de algodón	5	Granos	10
Escenario 4 (Esc-4)							
Leche -SAP		Carne-SAP		Leche-SAM		Carne-SAM	
Mezcla fresca de pastos y legumbres	40	Pasto fresco	70	Mezcla fresca de pastos y legumbres	40	Pasto fresco	70
Ensilado de maíz	30	Melaza	5	Ensilado de maíz	30	Melaza	5
Granos	25	Residuos de cultivo de maíz	10	Granos	25	Residuos de cultivo de maíz	10
Subproductos de la semilla de algodón	5	Granos	15	Subproductos de semilla de algodón	5	Granos	15
Escenario 5 (Esc-5)							
Leche -SAP		Carne-SAP		Leche-SAM		Carne-SAM	
Mezcla fresca de pastos y legumbres	35	Pasto fresco	65	Mezcla fresca de pastos y legumbres	35	Pasto fresco	65
Ensilado de maíz	30	Melaza	5	Ensilado de maíz	30	Melaza	5
Granos	30	Residuos de cultivo de maíz	10	Granos	30	Residuos de cultivo de maíz	10
Subproductos de semilla de algodón	5	Granos	20	Subproductos de semilla de algodón	5	Granos	20

Clave: SAP= sistema de alimentación en pastoreo, SAM=sistema de alimentación mixto.

En el Escenario 2 (Esc-2) se simularon las principales estrategias de alimentación que se emplean para las vacas productoras de leche y carne en México (Castelán-Ortega y Ku-Vera, 2019). Por ejemplo, en el sistema PLec+SAP la dieta tuvo una relación forraje:concentrado de 90:10, es decir este tipo de sistema se basa principalmente en el pastoreo de praderas nativas o inducidas, además se incluyó hojas de vegetación natural en grandes proporciones (30%). Por otro lado, en el sistema PLec+SAM la relación F:C fue 70:30, ya que se incluyó como forraje, además del pasto y las hojas de vegetación natural, 30% de concentrado, 10% de ensilado de maíz y 10% de residuos del cultivo del maíz, por lo tanto, se trata de una dieta de mejor calidad y se considera típica de un sistema de producción de leche semi-estabulado en México. La dieta para el sistema PCar+SAP tiene una relación F:C=90:10 al tratarse de un sistema en pastoreo, con 50% de vegetación natural, 30% de pasto, 10% de ensilado y sólo 10% de granos como concentrado. Para el sistema PCar+SAM se incrementó ligeramente la proporción de concentrado con una relación F:C=85:15, y se incluyó 30% de forrajes cultivados ensilados, ya que se asume que los animales no permanecen todo el tiempo en la pradera, y una parte de su consumo de forraje les es provisto en el pesebre durante la estabulación.

En el Esc-3 se incrementó la cantidad de concentrado, por ejemplo, la dieta del sistema PLec+SAP tiene una relación F:C 75:25, se redujo la cantidad de forraje a 75% y se aumentó la cantidad de concentrado en forma de granos (20%) y semilla de algodón (5%), además se incluyó forraje de buena calidad como ensilado de maíz (30%) y una mezcla de pastos y legumbres (45%) como la que se encontraría en una pradera cultivada de pasto y trébol. La misma dieta en el sistema PLec+SAM. Para el sistema PCar+SAP, también

del escenario Esc-3, la relación forraje concentrado fue 85:15, donde 75% fue pasto fresco, 10% residuos del cultivo de maíz y 15% de un concentrado compuesto de granos y melaza, ya que los animales en este sistema reciben cantidades muy pequeñas de concentrados o suplementos, y en muchas ocasiones no se les suplementa. En el sistema PCar+SAM, se usó la misma dieta.

En el escenario Esc-4 para los sistemas PLec+SAP y PLec+SAM se incrementó la concentración de concentrado a 30%, y el forraje estuvo compuesto de una mezcla fresca de pastos y leguminosas, de ensilado de maíz de buena calidad. De igual forma, en los sistemas PCar+SAP y PCar+SAM, se incrementó la proporción de concentrado en la dieta 20%, pero no se incluyó la mezcla de pasto + leguminosas.

Finalmente, en el Esc-5, se incrementó a 35% la proporción de concentrado en los sistemas PLec+SAP y PLec+SAM, y a 25% en los sistemas PCar+SAP y PCar+SAM, ya que se sabe que una mayor cantidad de concentrados en la dieta resulta en una menor emisión de CH₄ (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2020).



Figura 7. Ejemplo de forraje y concentrado administrado al ganado.

3. Comparación de las emisiones de GEI entre el sistema convencional y el sustentable.

El modelo GLEAM-i genera un documento en Excel, el cual contiene la información necesaria para manipularla y así poder crear las gráficas para las emisiones de GEI, emisiones por cabeza, emisiones de todo el hato ganadero, emisiones de las ocho categorías para cada sistema de producción, el consumo de alimento y la intensidad de emisión por cada kg de carne o leche producida, y con estas gráficas poder hacer la comparación más visual de los resultados numéricos obtenidos.

V. RESULTADOS

5.1. Emisiones de GEI

De acuerdo con las simulaciones realizadas se muestran en la Figura 8, la cual presenta las predicciones del modelo GLEAM-i para las emisiones de CH₄ por fermentación entérica, en CO₂-eq, para los cinco escenarios simulados considerando los sistemas de producción de ganado bovino de leche y carne y en dos sistemas de alimentación, mixto y pastoreo. Se observó que hay una disminución de CH₄ en el Esc-5 seguido del Esc-4 y Esc-3, así mismo se observó que el Esc-2 presentó las emisiones más altas, las cuales representan casi el doble de las emisiones reportadas por Esc-5 y la L-B.

Comparando las emisiones de CH₄ derivadas del hato bovino en México bajo la dieta propuesta por el modelo GLEAM-i y las dietas desarrolladas dentro de los cinco escenarios se concluye que el Esc-5 aporta menos emisión de este gas, teniendo una reducción de 4728.47GgCO₂-eq al año.

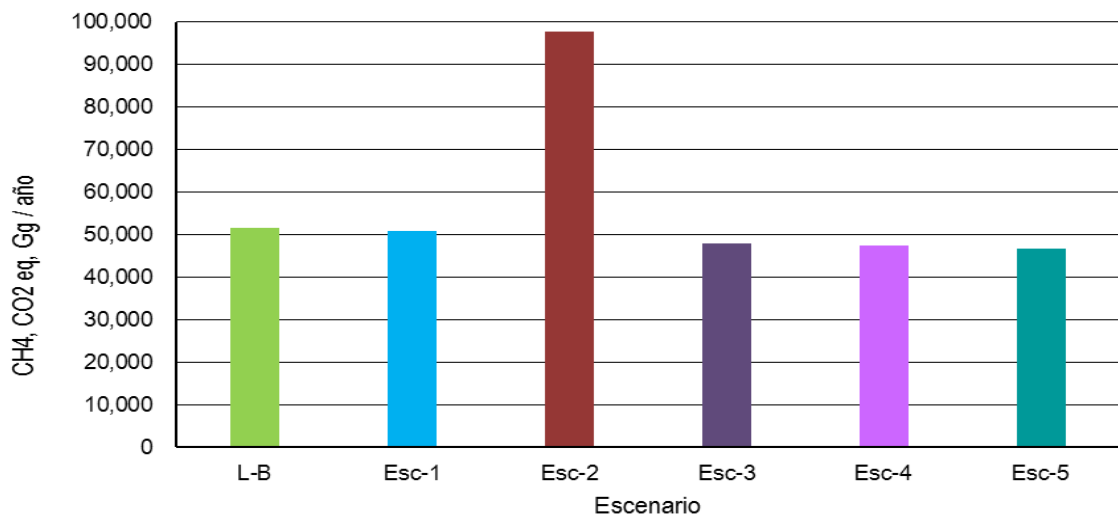


Figura 8. Emisiones de CH₄ por fermentación entérica en Gg CO₂eq para los cinco escenarios, todas las categorías de ganado y todos los sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

La Figura 9 presentan las emisiones globales de CO₂ de los cinco escenarios para toda la cadena de producción de ganado bovino en México, tanto de leche como de carne y en todas las categorías de ganado, y sistemas de producción, lo cual incluye las emisiones directas del ganado, así como las emisiones de todos los eslabones de la cadena de producción como son las emisiones de CO₂ asociadas al cultivo de los alimentos para el ganado, los fertilizantes y pesticidas aplicados a los cultivos, su transporte a las unidades de producción, y las asociadas a la gestión del estiércol. Se observó que también el Esc-2 es donde se emiten los volúmenes más altos de dicho gas, mientras que el Esc-1 se observaron los niveles más bajos de emisión incluso por debajo del L-B.

Al realizar la comparación del total de la emisión de CO₂ derivada del hato ganadero entre la L-B y los cinco escenarios, en los cuales se contemplan sus respectivas dietas desarrolladas y propuestas, se puede observar una disminución de 1,015.2 Gg CO₂-eq de dicho gas en el Esc-1 con respecto a la L-B. Así mismo, se observan menores reducciones en los escenarios 3 y 4.

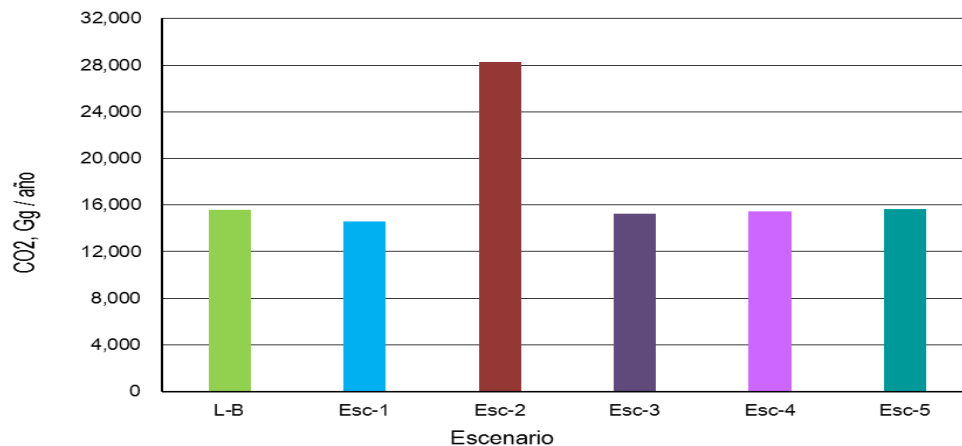


Figura 9. Emisiones de CO₂ en Gg a partir de los cinco escenarios, para todas las categorías de ganado y todos los sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

La Figura 10 presenta las emisiones de N₂O de los cinco escenarios simulados asociadas a la gestión del estiércol y la degradación de la orina del ganado en el suelo. En dicha figura se puede observar que, de los cinco escenarios desarrollados, el Esc-5 presentó los niveles más bajos de emisiones de N₂O, mientras que el Esc-2 lo sobrepasa por más de 100% de la emisión de los demás escenarios. Sin embargo, cuando comparamos las emisiones de N₂O producidas por el hato bovino a partir de la dieta base (L-B), propuesta por defecto por GLEAM-i para México, y las dietas desarrolladas en los escenarios, podemos observar que hay un aumento de N₂O en todos los escenarios. Sin embargo, en el que menos emisión predijo fue el Esc-5, en donde si se compara con la L-B hay un aumento anual de 6,460.7 Gg CO₂-eq.

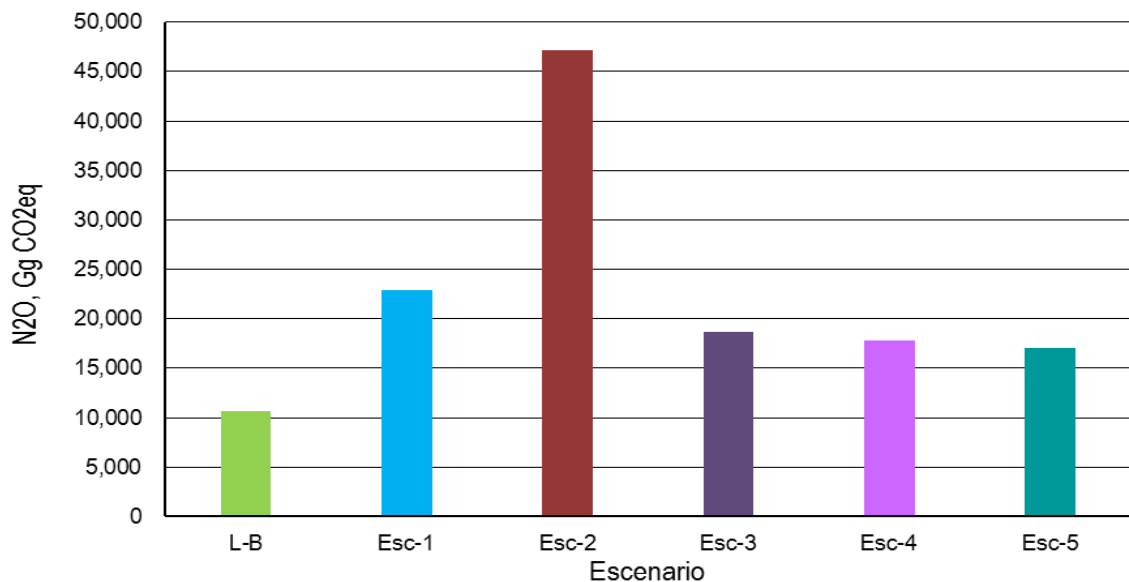


Figura 10. Emisiones de N₂O, en Gg de CO₂eq, derivadas por gestión del estiércol y la degradación de la orina para los cinco escenarios, todas las categorías de ganado y todos los sistemas de producción de ganado bovino de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5 = Escenarios.

La Figura 11 compara las emisiones individuales promedio anuales de los tres GEI simulados en conjunto, expresados en CO₂-eq, para todas las categorías de ganado, todos los sistemas de producción de carne y leche tanto en pastoreo como mixto, y los cinco escenarios simulados. Los resultados muestran que hay una disminución de la emisión individual por animal en el Esc-5, sin embargo, el Esc-2 reporta nuevamente los niveles más altos de emisiones. Comparando las emisiones entre la L-B contra los escenarios propuestos y sus respectivas dietas observamos que hay un incremento de las emisiones en todos los escenarios, sin embargo, las dietas del Esc-5 tienen el menor incremento, sólo 49.24 kg CO₂-eq/cabeza/año con respecto a lo producido en la L-B.

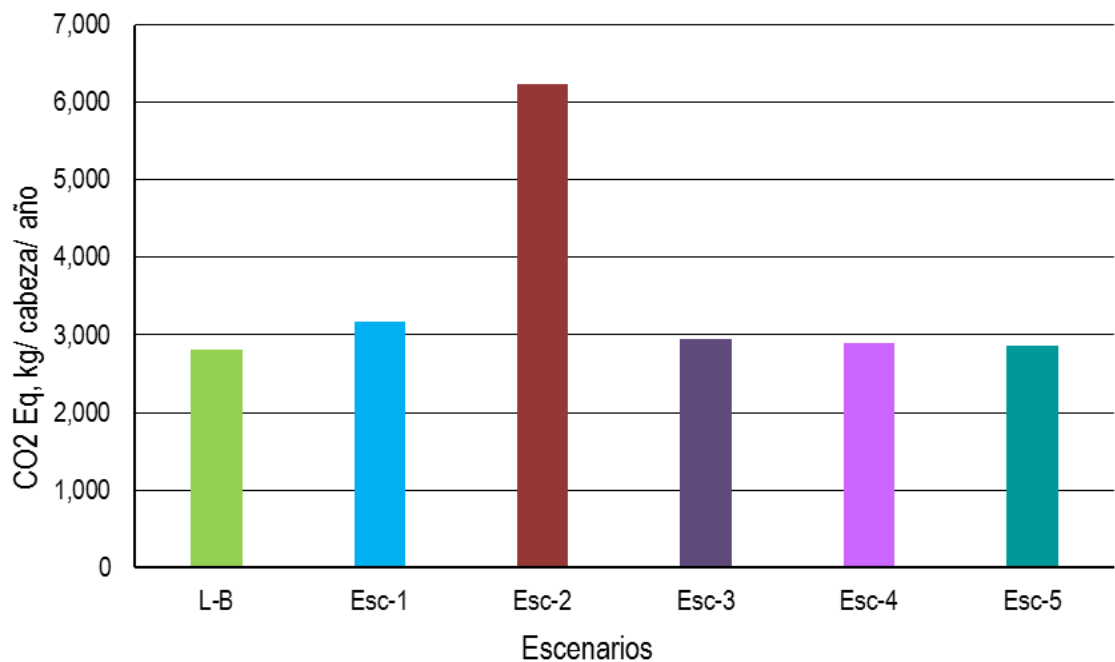


Figura 11. Emisiones individuales promedio por año de los tres GEI por cabeza para los sistemas PCar y PLec y ambos sistemas de alimentación (SAM y SAP), expresados en kg CO₂ eq. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

Las emisiones globales de todos los GEI producidas por todo el hato bovino productor de leche y carne en México se muestran en la Figura 12, en la cual se comparan las emisiones entre la L-B y los 5 escenarios. Se observa que la L-B y el Esc-5 tienen el más bajo volumen de emisiones seguidos por el Esc-4 y Esc-3 mientras que el Esc-2 supera las emisiones por más del 100% con respecto a los demás escenarios. Cuando comparamos las emisiones totales de GEI producidas por todo el ganado bovino entre las dietas propuestas, se observa que en el Esc-5 hay un incremento mínimo de 1,580.1 Gg CO₂-eq/año con respecto a lo que se emite con la L-B.

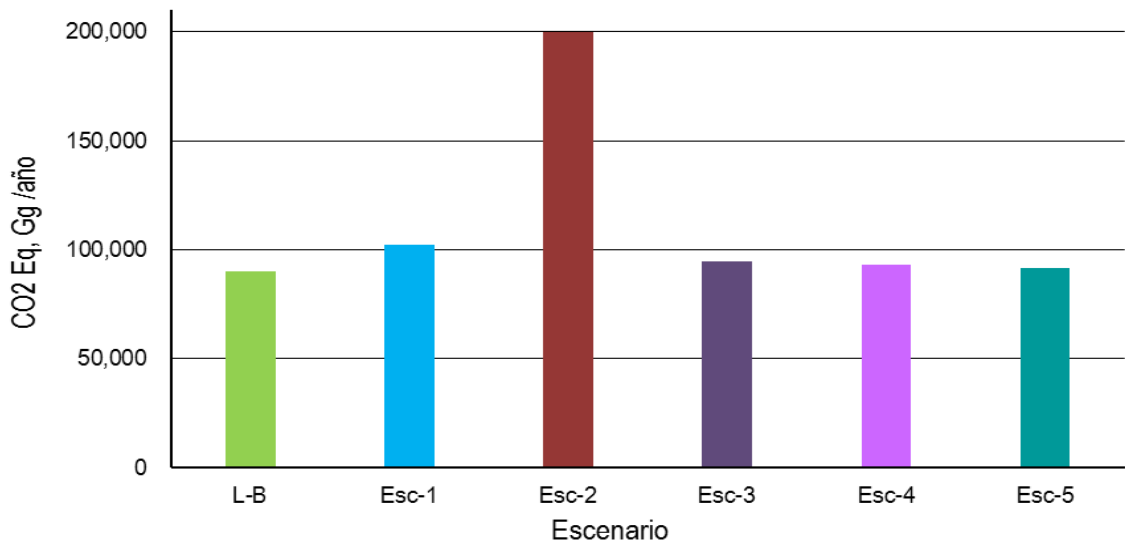


Figura 12. Emisiones globales de todos los GEI por el hato de ganado bovino productor de leche y carne, en ambos sistemas de alimentación (SAM y SAP), en México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

La Figura 13 muestra la emisión total de GEI de vacas adultas en producción de leche o de becerros en los sistemas de PLec y PCar bajo un sistema de alimentación SAP, en donde se observa que la producción de leche tiene una emisión inferior de GEI con respecto a la producción de PCar. Por lo tanto, la mayor producción de todos los gases de

efecto invernadero se observa en las vacas de productoras de carne en México. Ahora bien, en cuanto a la comparación de las emisiones totales entre escenarios, se observa que el Esc-2 es el que tiene las emisiones más altas con una gran diferencia con respecto a los demás escenarios, pero particularmente en el sistema PCar, seguido por el Esc-1 (también para PCar), pero la diferencia entre éste y los demás escenarios es pequeña. La L-B y el Esc-5 la menor emisión de GEI con respecto a todos los demás escenarios.

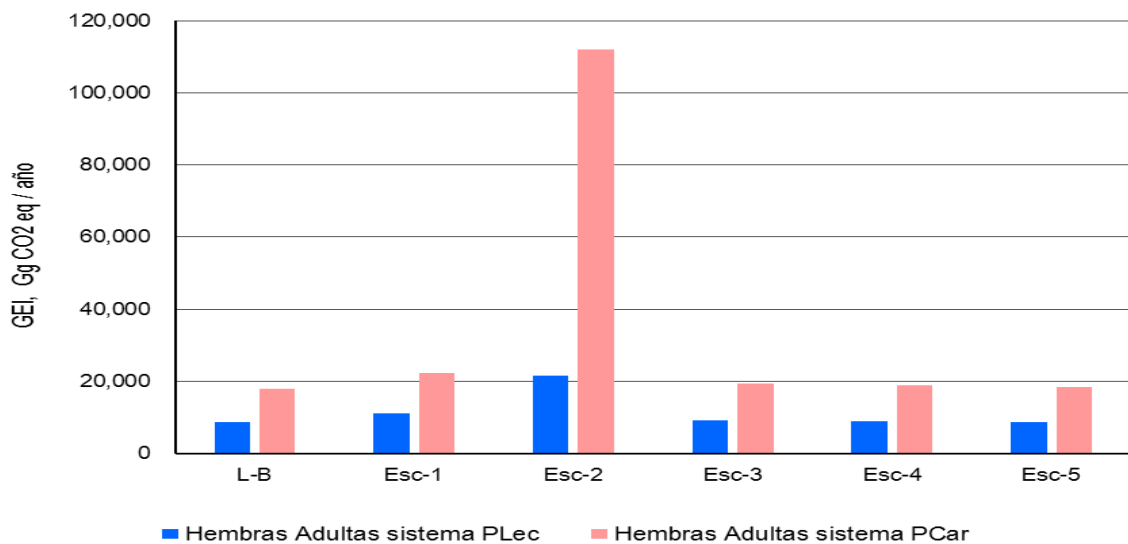


Figura 13. Comparación de las emisiones totales de todos los GEI de vacas adultas entre los sistemas de PCar y PLec en un sistema de alimentación en pastoreo (SAP) de México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

La Figura 14 representa las emisiones totales de GEI derivadas de todas las categorías de ganado productor de leche menos vacas adultas, a nivel nacional bajo un sistema de alimentación en pastoreo, en el cual, las hembras de reemplazo (HR) son la categoría que emite más GEI con un 51% del total de las emisiones, seguida por los machos productores de carne que no están en engorda (MPCNE) con un 27%, mientras que los MA, MR y HPCE son quienes tienen las emisiones más bajas con 1%, 1% y 2%, respectivamente, del

total de las emisiones asociadas a estas categorías. También se observa que los escenarios L-B y Esc-5 son los que menos GEI producen, mientras que el ESc-2 es el que más produce, sin embargo, la diferencia no es tan grande con respecto a los demás escenarios.

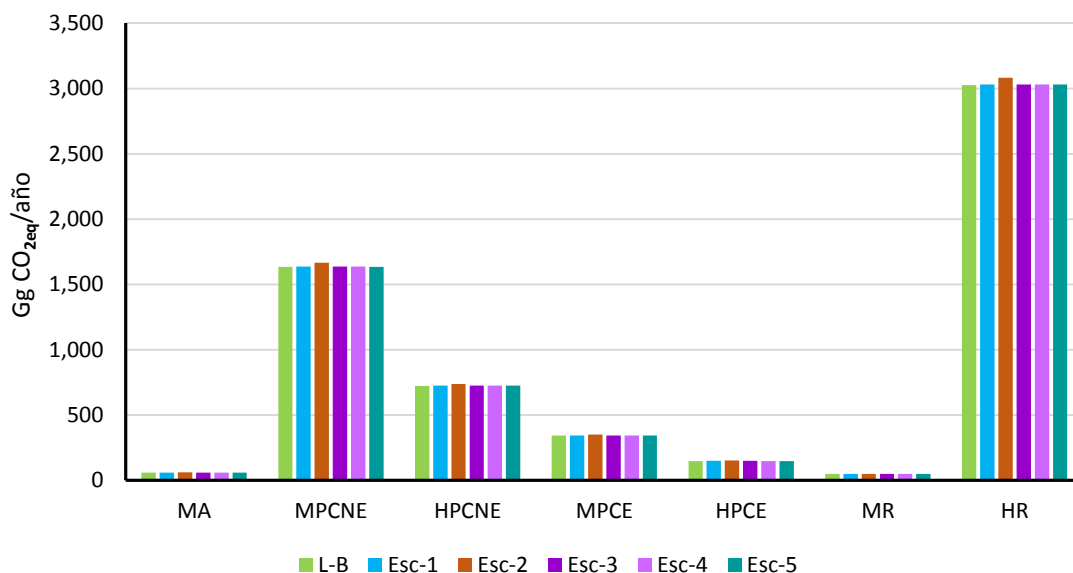


Figura 14. Emisiones totales de todos los GEI producidas por todas las categorías bovinas productoras de leche PLec, menos vacas adultas, con una alimentación en pastoreo (SAP). Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne en engorda; HPCNE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.

Con respecto a las emisiones totales de todos los GEI emitidas por los bovinos del grupo PCar en siete categorías, menos las vacas adultas, se observa que los MPCNE (32%) y las HPCNE (28%) generan los volúmenes más elevados de emisión, mientras que los que emiten menos son los MR (3%) y las MA (4%), como se muestra en la Figura 15. También se observa que no existen diferencias importantes entre los diferentes escenarios.

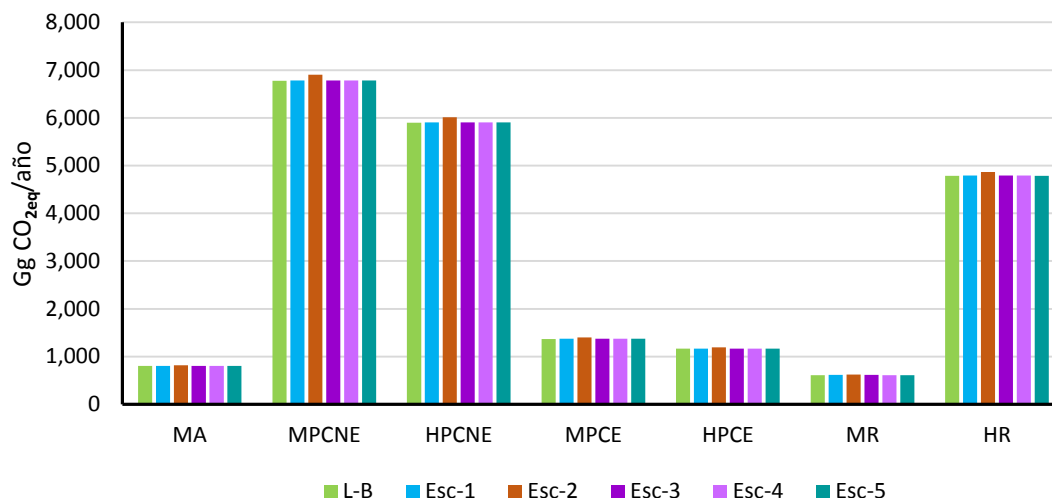


Figura 15. Emisiones globales de todos los GEI derivadas del hato PCar donde su alimentación del ganado en pastoreo (SAP) en siete categorías menos vacas adultas y cada uno de los escenarios desarrollados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.

En la Figura 16 se hace una comparación entre las emisiones de todos GEI de vacas adultas (HA) de ganado bovino PLec y PCar, bajo un sistema de alimentación SAM, en donde se observa que la PCar tiene los niveles más altos de emisión con respecto a la PLec, en todos los escenarios. En cuanto a la comparación entre escenarios, el Esc-1 tiene las emisiones más altas de GEI, para ambos PCar y PLec, siendo la LB y el Esc-5 quienes tienen el más bajo nivel de emisión.

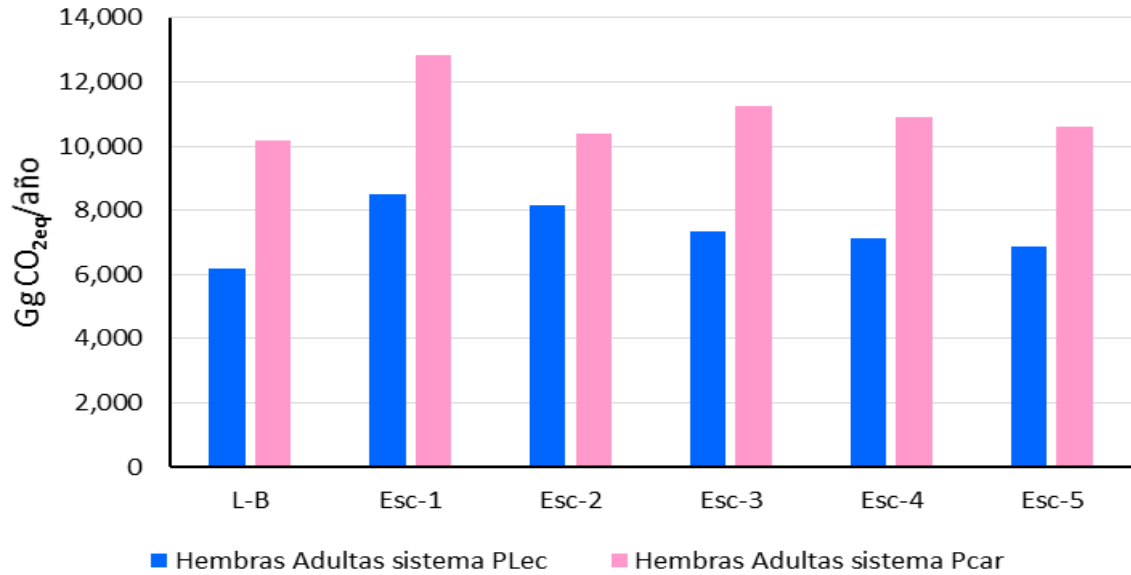


Figura 16. Comparación entre las emisiones de GEI producidas por las hembras adultas de PCar y PLeC en un sistema de alimentación mixto (SAM) de México.
Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

Las emisiones totales de todos GEI emitidos por el ganado bovino PLeC bajo un sistema de alimentación SAM se presentan en la Figura 17, en donde de las siete categorías consideradas (menos vacas adultas), la que representa a las HR aportan un 35% de las emisiones totales consideradas seguidas por MPCNE con un 32% mientras que las categorías de MA y MR aportan 1% cada una de las emisiones totales.

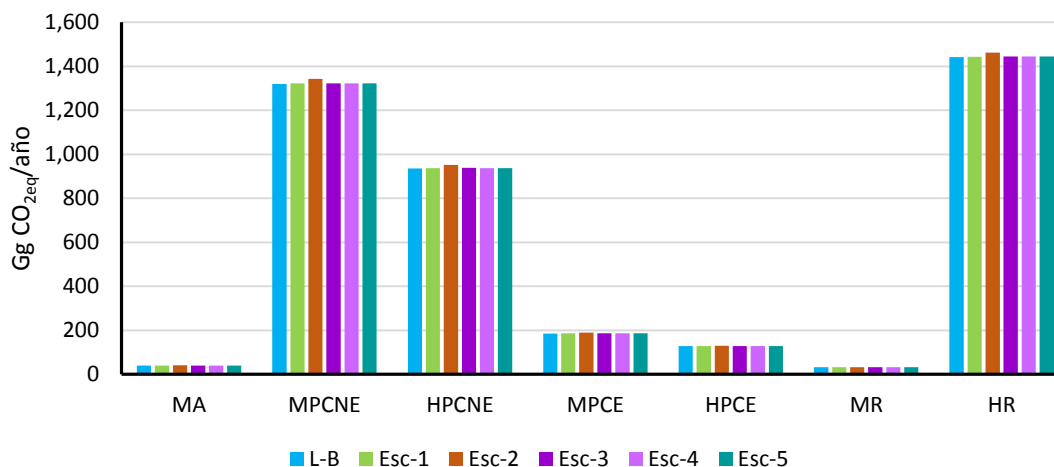


Figura 17. Emisiones de todos los GEI emitidos por el ganado bovino productor de leche (PLec) bajo un sistema de alimentación mixto (SAM) en siete categorías (menos vacas adultas), y cada uno de los escenarios simulados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.

En la Figura 18 se observan las emisiones totales de todos los GEI derivadas del ganado PCar con un sistema de alimentación SAM en donde los MPCNE, las HR y las HPCNE tiene un aporte del 38%, 25% y 24% respectivamente del total de las emisiones consideradas por las siete categorías (menos vacas), siendo estas las más altas mientras que las categorías con menor emisión son MR, MA y HPCE con un 2%, 3% y 3% respectivamente.

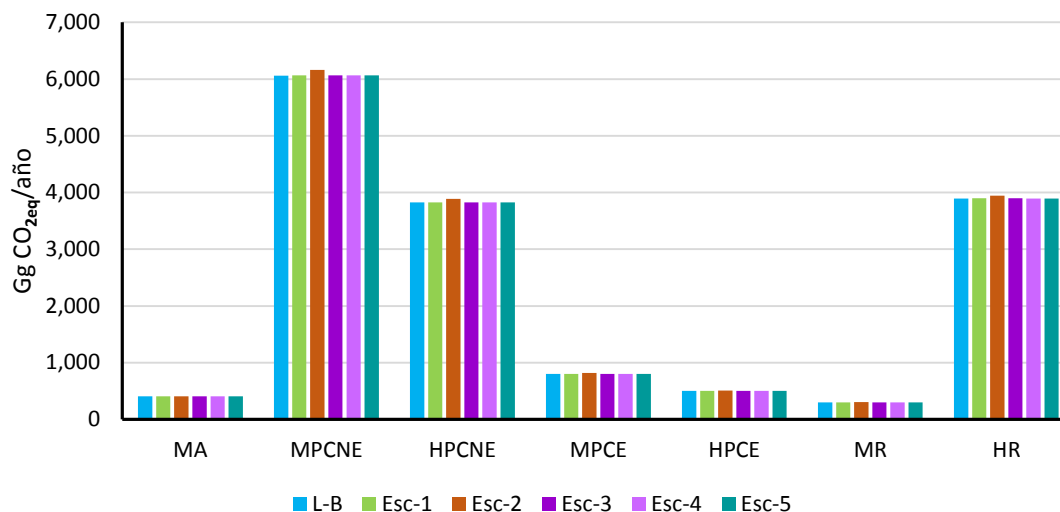


Figura 18. Emisiones de todos los GEI por el ganado bovino PCar bajo un sistema de alimentación SAM, y siete categorías (menos vacas), y seis escenarios simulados. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: MA: Machos adultos, MPCNE: Machos productores de carne que no están en engorda, HPCNE: Hembras productoras de carne que no están en engorda; MPCE: Machos productores de carne en engorda; HPCE: Hembras productoras de carne en engorda; MR: Machos de reemplazo; HR: Hembras de reemplazo.

5.2. Consumo de alimento

La Figura 19 muestra el consumo total/año de alimento en materia seca (MS) por el ganado bovino productor de PLec y PCar en el sistema de alimentación SAM, se observa que en el Esc-2 hay un consumo menor de alimento para el ganado PCar con respecto a lo consumido en los otros cuatro escenarios propuestos e incluso con respecto a la L-B mientras que, en caso contrario, la L-B y el Esc-1 son los escenarios que presentan los más altos consumos para el caso del ganado PCar. Por el contrario, para el caso del ganado productor de PLec, en el mismo sistema de alimentación, es el Esc-2 quien tiene el más alto consumo de alimento, y siendo el Esc-4 y el Esc-5 los que reportan los más bajos consumos de alimento para el ganado PLec.

Cuando comparamos el consumo total de alimento (CMS) entre la L-B y los cinco escenarios (Figura 19) para todo el hato de ganado de México, se observa que el Esc-5 tienen el menor consumo tanto en la PLec como en la PCar con una disminución de 437.1 Gg MS/año y 1,488.8 GgMS/año, respectivamente. Por lo tanto, se observa una disminución total en el consumo de alimento en el en el Esc-5 para SAM de 1,925.9 Gg MS/año.

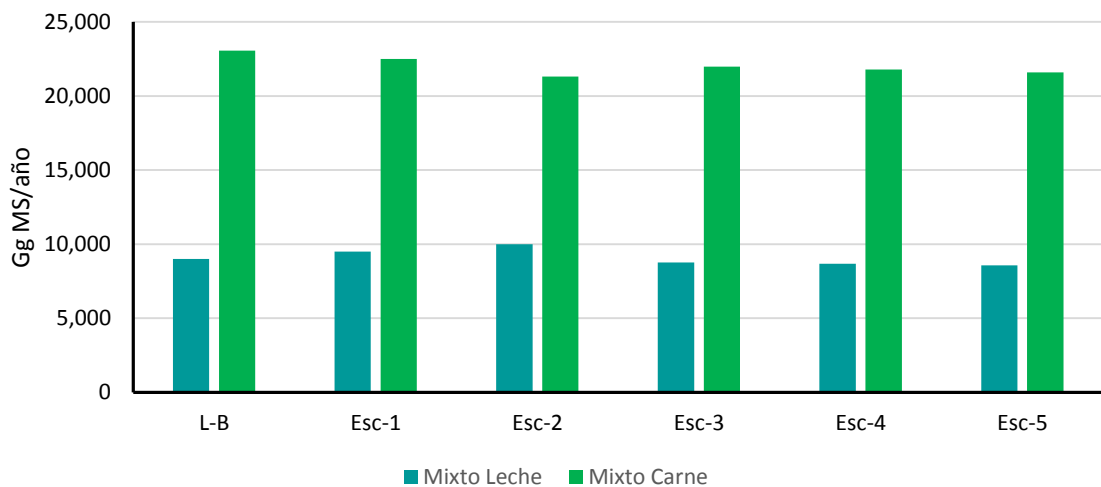


Figura 19. Consumo total de alimento expresado en Gg MS/año en el sistema de alimentación mixto (SAM) para ganado PLec y PCar en México. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

La Figura 20 muestra el consumo de alimento por el ganado productor PLec y PCar con el sistema de alimentación SAP. Se observa que el CMS más alto es en el Esc-2, tanto para PCar como para PLec, y éste es seis veces más alto en el ganado PCar que en el ganado PLec. Se observa que los Esc-5 y Esc-4 presentaron el consumo más bajo de MS para ambos tipos de ganado, leche y carne. Por otro lado, Si se compara el consumo de

alimento entre el SAM y el SAP se puede determinar que en el SAM tiene una demanda mucho más baja por año.

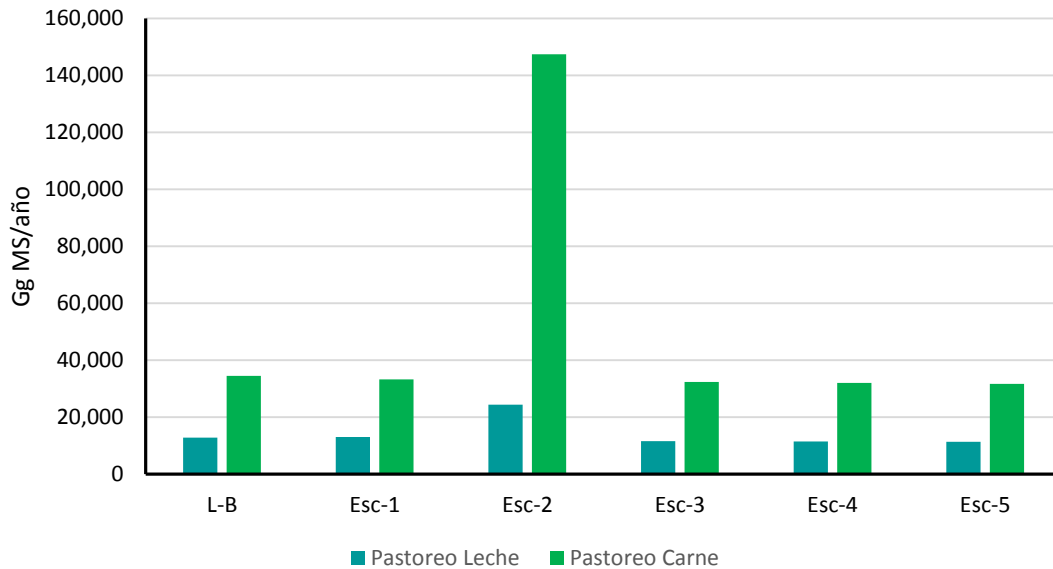


Figura 20. Consumo total de alimento bajo un sistema de alimentación en pastoreo (SAP) expresado en Gg MS/año dentro del sistema de producción de leche y carne. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios.

5.3. Intensidad de la emisión de GEI

La Figura 21 muestra la Intensidad de Emisión (IE), es decir, kilogramos de CO₂-eq emitidos por cada kilogramo de proteína animal producida. Se puede observar que para el caso del SAP la IE más alta se presenta en la producción de carne, siendo el Esc-2 quien tiene los valores más altos. Haciendo una comparación entre la L-B y los escenarios desarrollados, observamos que el Esc-5 presenta una menor emisión por cada kilogramo de proteína producida, y el Esc-2 es el que tiene la emisión más alta.

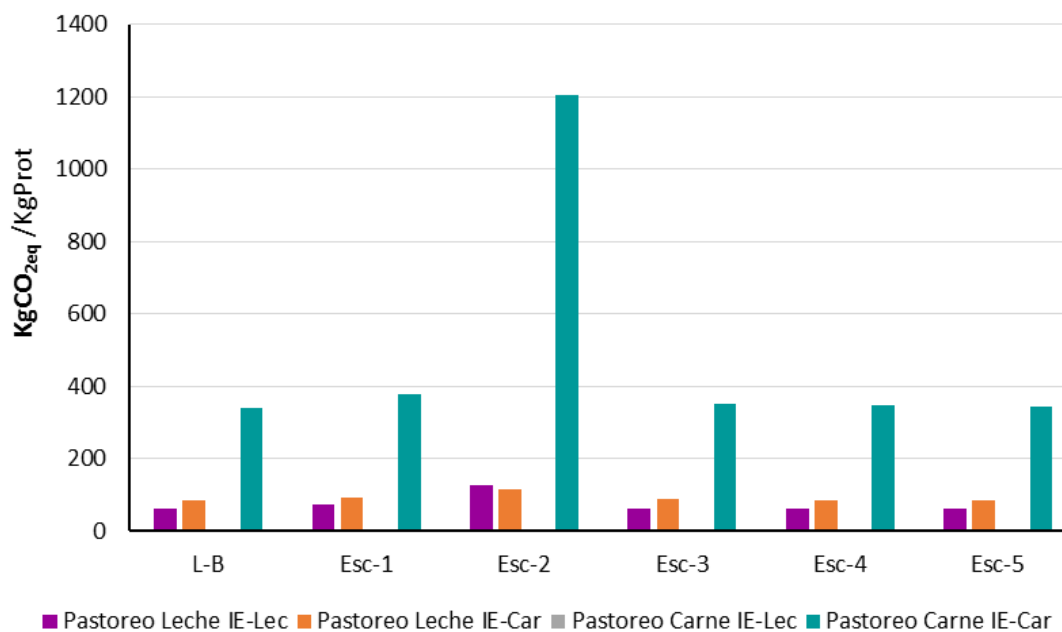


Figura 21. Intensidad de emisión, en kg CO₂Eq/kg proteína animal, para la PCar y PLec en un SAP. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: IE-Lec= Intensidad de Emisión de leche, IE-Car= Intensidad de Emisión para carne.

Para el caso del SAM la IE más alta se observa también en la PCar, como se aprecia en la Figura 22. Así mismo, si se compara la IE de la L-B con los escenarios desarrollados se observa que los escenarios propuestos tienen una emisión más alta, siendo el Esc-5 y el Esc-2 quienes presentan una menor intensidad de emisión. Por los que, para este sistema de alimentación se podría tomar como referente de dietas, para obtener la emisión de CO₂-eq por cada kg de proteína producida. También se observa que el SAM tiene una IE mucho más baja que la PLec, prácticamente tres veces más baja.

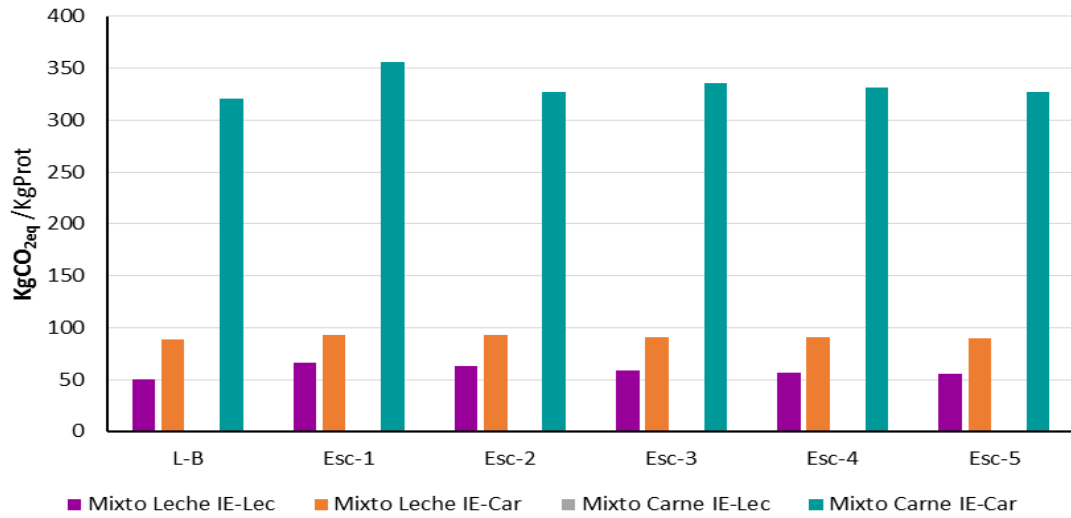


Figura 22. Intensidad de emisión, en kgCO₂eq/kg proteína animal, para la PLec y PCar en un SAM. Clave: L-B= Línea base, Esc-1 a 5= Escenarios. Clave: IE-Lec= Intensidad de Emisión de leche, IE-Car= Intensidad de Emisión para carne.

VI. DISCUSIÓN

6.1. Selección de los escenarios con una menor emisión de GEI

Los resultados obtenidos por el modelo GLEAM-i sugieren que en la mayoría de los escenarios planteados hubo un incremento de las emisiones de GEI, tanto por animal como para todo el hato de ganado bovino de México. Por lo tanto, el incremento de los tres gases con las dietas propuestas en comparación con las emisiones de la L-B determina que las estrategias de alimentación planteadas en los escenarios posiblemente no sean consideradas como viables para disminuir las emisiones de GEI. Sin embargo, es importante hacer notar que la dieta de la L-B planteada por la FAO por defecto para México, está compuesta por ingredientes variados y de buena calidad (consultar el apartado de anexos), lo cual la hace poco realista en comparación con el escenario real de los sistemas de alimentación del ganado bovino en México.

En este sentido el ESC-1 es posiblemente un mejor ejemplo del inventario nacional debido a que la mayor parte del ganado en México es producido en condiciones de pastoreo. Por ejemplo, está bien establecido que la mayoría de los sistemas de alimentación del ganado bovino del país se basan en el pastoreo de praderas nativas, y complementación con subproductos agropecuarios (Castelán-Ortega *et al.*, 2019), además, una alimentación basada en forrajes de baja calidad requiere de una mayor extensión para poder cubrir los requerimientos nutricionales del gando.

Así mismo, se debe consierar que el modelo GLEAM-i no incluye en el listado de ingredientes que se pueden emplear en la simulación sus características químicas y

nutritivas, que permita hacer una mejor selección de ingredientes que, se sabe, disminuyen las emisiones de GEI emitidas por el ganado bovino. Por ejemplo, para bajar las emisiones de CH₄ se han reportado especies vegetales como *Cosmos bipinnatus*, *Cymbopogon citratus*, los cuales en cierto porcentaje de inclusión ayudan a disminuir la producción de CH₄ cuando se suplementan al ganado bovino de las regiones de clima templado (Vazquez-Carrillo *et al.*, 2020), o bien el uso de *Samanea saman* en sistemas ganaderos de clima tropical (Valencia *et al.*, 2018). Es por ello que, en función de los resultados del modelo GLEAM-i, podríamos considerar que las dietas que emiten menor cantidad de GEI se podrían tomar como base para incluir dentro de esa dieta el aditivo para mitigar la emisión de GEI, y se obtengan resultados más favorables, aunque como ya se dijo, debido al modelo no se pueda tener una simulación más precisa con esos nuevos aditivos. Y por otro lado, la dieta empleada en la línea base no es realista porque difícilmente se podrá utilizar en la vida real una dieta que comprenda tal variedad de ingredientes que favorecen una buena nutrición y productividad del ganado y por otro lado, una menor emisión de CH₄.

6.2. Efecto del consumo de forrajes y suplementos por el ganado sobre las emisiones de GEI.

En los escenarios se observó un mayor consumo de alimento con respecto a la L-B, tal es el caso del SAP para la PCar, por lo tanto la demanda del alimento en estos escenarios es alta, ya que la calidad de las hojas de árboles y arbustos consumidos por el ganado de carne en pastoreo es baja, particularmente en términos de su disponibilidad de energía, por lo que los animales necesitan incrementar su consumo de materia seca para cubrir sus

necesidades energéticas. En este sentido, Johnson y Johnson (1995), y Hook *et al.* (2010) reportan que la emisión de CH₄ tiene una relación con la calidad y composición química del alimento administrado al ganado así como también el porcentaje de consumo, siendo la emisión mayor cuando la calidad del alimento es baja, en particular en lo que se refiere a la intensidad de la emisión de CH₄, es decir los gramos de CH₄ producido por kilogramo de leche o de carne.

Como se observa en los resultados, el Esc-2 reporta los niveles más altos de emisiones de GEI y esto se debió por dos razones importantes, la primera porque el contenido de hojas de vegetación natural destinada para el SAP fue del 30% de inclusión para la dieta propuesta en PLec mientras que para el caso de PCar el porcentaje de inclusión fue aún mayor, del 50%, como se puede observar en el Cuadro 1. Y la segunda razón, es el mayor número de cabezas en el SAP, ya que son aproximadamente 3.6 millones más de cabezas en este sistema en comparación con el SAM, además de que, el número de cabaezas en PCar es el más grande en México, con cerca de 14.3 millones de cabezas.

Por lo anterior, se concluye que el Esc-2 tiene los niveles más altos de emisión debido a que es el escenario con mayor proporción de hojas de vegetación natural contenida en la dieta, también de menor calidad, y por tanto de mayor consumo para cubrir las necesidades nutricionales de los animales. Así que, no es de extrañar que en este escenario se hayan observado las emisiones más altas de GEI claramente asociadas a un mayor consumo de alimento y a una mayor población de ganado.

Con respecto a las emisiones de N₂O, se ha observado una mayor emisión cuando el ganado está pastoreando sobre vegetación natural, ya que a lo largo del día el animal estará

produciendo y depositando heces y orina directamente sobre el suelo, las cuales al no estar bajo un adecuado manejo promueven la liberación de nitrógeno, el cuál a través de la acción de los microorganismos del suelo será transformado en N_2O (Trejo-Escareño *et al.*, 2012). Este comportamiento explica por qué en los SAM se observaron emisiones de GEI significativamente menores que los SAP, ya que en los primeros puede existir alguna forma de manejo de excretas que reducen la formación de N_2O y CH_4 , no siendo el caso de los sistemas en pastoreo.

Así mismo, la calidad de la dieta destinada al ganado tiene un efecto importante en los niveles de emisión de GEI, por ejemplo, en lo que respecta a las emisiones de CH_4 , Carmona *et al.*, (2005) reportaron que hay una emisión elevada cuando las gramíneas tienen una deficiente calidad nutricional, mientras que los datos más bajos de emisión se observan en praderas que han tenido un manejo agronómico adecuado. Por lo tanto, es posible sugerir que la calidad nutricional tiene un efecto directo en las emisiones de CH_4 , ya que a menor calidad del alimento mayor será la necesidad de alimento y de nutrientes para el ganado para cubrir sus necesidades nutritivas por lo que mayor será la emisión de este gas.

Por el contrario, si consideramos la parte agronómica de la conservación de los suelos, el pastoreo del ganado aporta nitrógeno orgánico a los mismos, el cual ayuda a reducir el uso de fertilizantes nitrogenados químicos, que se encuentran entre los fertilizantes más contaminantes de uso agrícola. Por ejemplo, en un experimento donde se compararon los rendimientos del maíz forrajero cuando se hace aplicación de estiércol bovino como fertilizante y urea realizado por Figueroa *et al.*, (2010), se concluyó que al aplicar estiércol

o compost al cultivo de maíz forrajero es posible sustituir la aplicación de fertilizantes químicos, sin que se afecte la calidad y el rendimiento del forraje.

Derivado del análisis de los resultados sobre la cadena de producción de ganado bovino, se pudo observar que los procesos de producción y manejo de los granos y cereales empleados su alimentación no emite grandes cantidades de CO₂, en comparación con los sistemas de alimentación en pastoreo, por lo tanto, incluir estos suplementos en la dieta ayuda a disminuir las emisiones, tal es el caso del Esc-5, en el cual se aumentó el porcentaje de inclusión del grano y se logró disminuir el porcentaje de inclusión del forraje resultando en menores emisiones de GEI. Por lo tanto, podemos concluir que incluir pequeñas cantidades de granos en la dieta del ganado puede contribuir a reducir las emisiones de GEI en comparación con sistemas basados únicamente en pastoreo.

6.3. Incremento en pequeñas cantidades de grano en la dieta del ganado bovino como una opción de mitigación

Derivado del análisis de los resultados obtenidos se contemplan como estrategia de mitigación el incremento de granos o subproductos agropecuarios con un elevado contenido de energía metabolizable, ya que en varios estudios se ha reportado que a mayor incremento en el contenido de granos en la dieta, se disminuye la emisión de GEI. Por ejemplo, Hernández & Corona en 2018 reportan que debido a la modificación fisiológica en el rumen hay un incremento en la producción de propionato en lugar del butirato o acetato por lo tanto las emisiones de CH₄ por fermentación entérica bajan. Lo anterior se debe a que este tipo de dietas genera una fermentación del tipo propiónica, en la cual no hay liberación de moléculas de hidrógeno (H) que son necesarias para la síntesis de CH₄,

mientras que las dietas basadas exclusivamente en forraje se genera una fermentación del tipo acética, en la cual se liberan ocho iones de H por cada mol de acetato producido debido a los carbohidratos estructurales que conforman al forraje (celulosa, hemiselulosa y lignina), generan una mayor producción de CH₄ Vasquez-Carrillo *et al.*, (2020). Es por lo anterior, que algunas de las estrategias de mitigación de CH₄ entérico en bovinos 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.

La segunda opción, es llevar a cabo un estudio en donde se determinen las especies vegetales nativas de cada región que cuenten con metabolitos secundarios que ayuden a inhibir la emisión de CH₄ en el rumen, por ejemplo, Benaouda *et al.*, (2017), reportaron que hay arbustos que cuentan con un alto contenido de taninos, saponinas, flavonoides, así como también aceites esenciales como los terpenoides que ayudan a reducir las emisiones del gas antes mencionado y además estos tienen un aporte nutricional alto para el ganado.

Finalmente, al compartir los resultados obtenidos por el modelo GLEAM-*i* para el caso de las emisiones de CH₄ y N₂O con los resultados obtenidos por Castelán-Ortega *et al.*, (2019), se observó que son similares, sin embargo, cuando se comparó con el trabajo realizado por Galicia *et al.*, (2021) se difiere un poco, ya que en ese estudio se hizo la simulación empleando la metodología del Tier 1 en comparación con los otros dos estudios en donde se utilizó la metodología Tier 2 del IPCC (2006).

VII. CONCLUSIONES

Se concluye que es posible modelar las emisiones de GEI de la cadena de producción de bovino de México utilizando el modelo GLEAM-i. El inventario de emisiones de GEI de toda la cadena de producción dio como resultado para las emisiones de GEI del ESC-1 102,062.33 GgCO₂eq/año mientras que para la propuesta sustentable dio un total de 91,708.682 GgCO₂eq/año, de estas emisiones totales la mayor parte proviene de las emisiones de CO₂ las cuales están asociadas a la producción de forraje, fertilizantes/pesticidas y transporte del alimento. El ESC-5 es el que emite una menor cantidad de GEI debido a que incluye el uso de una mayor cantidad de concentrado en la dieta en comparación con los demás escenarios, los cuales se basan principalmente en el consumo de dietas altas en contenido de pastos frescos y vegetación natural. De esta forma la estrategia sustentable de alimentación es el ESC-5. Por tanto, se concluye que es posible desarrollar una cadena de producción de ganado más sustentable usando el modelo GLEAM-i.

VIII. LITERATURA CITADA

- Baumert, K., Herzog, T. & Pershing, J. (2005). *Navigating the Numbers. Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. World Resources Institute. USA.
- Benaouda, M., González-Ronquillo, M., Molina, L. T. & Castelán-Ortega, O. A. (2017). *Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 8(4), 965-974. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.20>
- Bonilla, C. J. A & Lemus, F. C. (2011). *Enteric methane emission by ruminants and its contribution to global climate change*. Rev Mex Cienc Pecu 2012;3(2):215-246
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E. G., Carouge, C., Langenfelds R, L., Lathière, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C. & White, J. (2006). *Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability*. Nature 443, 439-443.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2017). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Revista Digital Universitaria. v: 8 n:10 ISSN: 1067-6079
- Carmona, J., Bolívar, D. M., & Giraldo, L. F. G. (2005). *El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo*. Revista Colombiana De Ciencias Pecuarias, 18(1), 49-63. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3240912.pdf>
- Castelán-Ortega, O. A., Ku-Vera, J. C., Ángeles-Hernández, J. C., Hernández-Pineda, G. S., Benaouda, M., Molina, T. L., Ramírez-Cancino, L., Castelán-Jaime, S.V., Praga-Ayala, A. R., Lazos-Balbuena, F., Montelongo-Pérez, H., González-Ronquillo, M., Vázquez-Carrillo, M. F., Cardoso-Gutiérrez, E., Aranda-Aguirre, E., Villegas-Estrada, D., Guadarrama-López, A. P. & Apodaca-Martínez, G. (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., Ku-Vera, J. C., Ángeles-Hernández, J. C., Hernández-Pineda, G. S., Benaoud, M., Molina, L.T., Ramírez-Cancino, L., Castelán-Jaime, S. V., González-Ronquillo, M., Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H., Cardoso-Gutiérrez, E. & Villegas- Estrada, D. (2019a). *First Tier 2 enteric methane emissions national inventory for cattle in Mexico and analysis of spatially distributed emissions. A baseline for mitigation*. In: Proceedings of the 7th GGAA – Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference August 4th to 8th, Iguassu Falls/Brazil. ISSN 1980-6841. Pag. 175
- Castelán-Ortega, O. A., Ku-Vera, J. C., Ángeles-Hernández, J. C., Hernández-Pineda, G. S., Benaouda, M., Castelán-Jaime, S. V., Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H. & Cardoso-Gutiérrez, E. (2019b). *Uncertainty of the Tier 2 enteric methane emissions inventory for cattle in Mexico: a Monte Carlo Approach*. In: Proceedings of the 7th GGAA – Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference August 4th to 8th, Iguassu Falls/Brazil. ISSN 1980-6841. Pag. 179.
- CEMDA. (2018). *GAS METANO. Organizaciones de la sociedad civil lanzan el Observatorio Mexicano de Emisiones de Metano*. <https://www.cemda.org.mx/gas-metano/>
- Dangal, S., H. Tian, B. Zhang, S. Pan, C. Lu and J. Yang. (2017). “*Methane emissions from global livestock sector during 1890-2014: Magnitude, trends and spatiotemporal patterns*”, en: *Global Change Biology*. pp. 4147-4161.
- Eckard, R. J., Grainger, C. & de Klein, C. A. M. (2010). *Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review*. *Livestock Science* 130:47-56.
- EPA. (2022). *Emisiones de óxido nitroso*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-oxido-nitroso>
- 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>
- FAO (2017). *Global Livestock Environmental Assessment Model. Model Description, Versión 2.0*. FAO, pp 109 <https://www.fao.org/gleam/resources/es/>

- FAO. (2017). Manual. Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM). Rome, 2017 <http://www.fao.org/gleam/results/es/#c330595>
- FAO. (2019) Ganadería sostenible y cambio climático en América Latina. Rome. <http://www.fao.org/americas/prioridades/ganaderia-sostenible/es/>
- FAO. (2023). GLEAM 2.0 -*Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación*. Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial(GLEAM). <http://www.fao.org/gleam/results/es/>
- FAOSTAT (The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). (2014). <http://faostat3.fao.org/home/E.2014>
- Fertilab. (2011). Bacterias fijadoras de nitrógeno en el suelo. fertilab.com.mx Consultado el 19 de abril de 2023
- Figueroa, V. U., Cueto, W., J. A., Delgado, J. A., Núñez, H. G., Reta, S. D. G., Quiroga, G. H. M., Faz, C. R. & Márquez, R. J. (2010). *Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero*. Terra Latinoamericana, 28(4), 361-369. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57318502008.pdf>
- Galicia, N. A., Ordóñez, D. J. A. B., Munguía, B. A., Venegas, M. N. J., Ortega, T. L. E., & Ordóñez, D. M. de J. (2021). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del ganado en México, 1990-2018*. Revista internacional de estadística y geografía. Vol. 12, Núm. 3.
- Hannah, R. (2019). "Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions", available at: <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>
- Hernández, M. J. H. & Corona, L. (2018). *El metano y la ganadería bovina en México: ¿parte de la solución y no del problema?* Agro productividad, 11(2).
- 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., Wright, A. D. & McBride, B. W. (2010). *Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies*. *Archaea* 30:945785. DOI:10.1155/2010/945785

Illarzea, G., del Pino, A., Sara Riccettoc, S. y Pilar, I. (2017). *Emisión de óxido nitroso, nitrificación, desnitrificación y mineralización de nitrógeno durante el cultivo del arroz en 2 suelos de Uruguay*. *Rev. Argent. Microbiol.*2018;50(1):97-104 <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.05.004>

International Atomic Energy Agency. (2023). *Greenhouse gas reduction*. <https://www.iaea.org/topics/greenhouse-gas-reduction>

IPCC. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>

IPCC. (2007). *Climate change 2007. Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (The Core Writing Team, R. K. Pachauri, & A. Reisinger, Eds.). WMO-UNEP.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC. (2021). *El cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando*. [Comunicado de prensa]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf

Johnson, K. A. & D. E. Johnson. (1995). Methane emission from cattle. *Journal of Animal Science* 13:2483-2492.

- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J. & Butler, J. H. (2011). *Non CO₂ greenhouse gases and climate change*. *Nature* 476: 43-50
- Murgueitio-Restrepo, E., CharÃi-Orozco, J. D., Barahona-Rosales, R., Cuartas-Cardona C.A. & Naranjo-Ramirez J.F. (2014). *Intensive silvopastoral systems (isps), mitigation and adaptation tool to climate change*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, [S.l.], v. 17, n. 3. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1558>
- Núñez-Ramos, P. A., García-Lagombra, G., Caridad del Rosario, J. & Asencio-Cuello, V. J. (2021). *Mediciones de óxido nitroso (N₂O) en suelo manejado bajo pastoreo con bovinos de leche*. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. e813. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.813>
- Oenema, O., Wrage, N., Velthof, G. L., van Groenigen, J. W., Dolfing, J., & Kuikman, P. J. (2005). *Trends in Global Nitrous Oxide Emissions from Animal Production Systems*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72(1), 51–65. Doi:10.1007/s10705-004-7354-2
- Opio, C., Gerber, P., Mottet, A., Falcucci, A., Tempio, G., MacLeod, M., Vellinga, T., Henderson, B. & Steinfeld, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains – A global life cycle assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Osorio, M. T. G. (2021). *Medición de emisiones de óxido nitroso en un sistema silvopastoril: gramíneas-leguminosas arbóreas, pastoreado por bovinos, en una región de clima tropical*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/111408>
- Said, S. B.L., Goncalves, J. L. A., de Oliveira, N. S. N., Eleto, T. C. M. M., Soares da Rocha, S. J. S., Henrique, V. P., Matos, O. A. de M. & Xavier, R. M. P. M. (2021) *Silvopastoral systems: how to use them for carbon neutral milk production?* *Carbon Management*, Vol. 12, No. 4, 377-384, <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1951843>
- Sauerbeck, D. R. (2001). *CO₂ emissions and C sequestration by agriculture—perspectives and limitations*. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 60: 253-266.

- Saynes, S. V., Etchevers, B. J. D., Paz, P. F. & Alvarado, C. L. O. (2016). *Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México*. Terra Latinoamericana 34: 83-96.
- Six, J., Elliott, E. T. and Paustian, K. (1999). *Aggregate and Soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems*. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1350-1358.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. & Fixen. P. E. (2009). *Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects*. Agric. Ecosyst. Environ. 133: 247-266.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & de-Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow*. FAO. Rome. 416 p.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T. & Hunt, H. W. (2000). *Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils*. Biogeochemistry 48: 147-163.
- Peel D. S., R. J. Johnson and K. H. Mathews. (2010). Cow-Calf Beef Production in Mexico. In: A Report from the Economic Research Service. United States Department of Agriculture pp.153-172
- Presumido, P.H., Sousa, F., Gonçalves, A., Dal Bosco, T.C. & Feliciano, M. (2018). *Environmental Impacts of the Beef Production Chain in the Northeast of Portugal Using Life Cycle Assessment*. Agriculture. 8, 165. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100165>
- Primavesi, O., Shiraishi, F. R. T., Dos Santos, P. M., Aparecida, de L. M., Teresinha, B. T., & Franklin, B. P. (2004). *Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras*. Pesq agropec bras, 39 (3): 277-283
- Sara S. Valencia Salazar, Angel T. Piñeiro Vázquez, Isabel C. Molina Botero, Freddy J. Lazos Balbuena, Jonatan J. Uuh Narváez, Maira R. Segura Campos, Luis Ramírez Avilés, Francisco J. Solorio Sánchez, Juan C. Ku Vera. (2018). Potential of *Samanea saman* pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 258, 2018, Pages 108-116, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.262>

- Trejo-Escareño, H. I., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D. & Vázquez-Vázquez, C. (2012). *Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4(5).
- UNEP. (2023). Methane emissions are driving climate change. Here's how to reduce them. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/methane-emissions-are-driving-climate-change-heres-how-reduce-them>
- Van Lingen, H. J., Niu, M., Kebreab, E., Filho, S. M., Rooke, J., Duthie, C. A., Schwarm, A., Kreuzer, M., Hynd, P. I., Caetano, M., Eugène, M., Martin, C., McGee, M., O'Kiely, P., Hünerberg, M., McAllister, T. A., Berchielli, T. T., Messana, J. D., Peiren, N., Hristov, A. N. (2019). *Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 283, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106575>
- Valencia, S.S. S., Vázquez, A. T. P., Botero, I. C. M., Balbuena, F. J. L., Narvaez, J. J. U., Segura-Campos, M. R., Avilés, L. A., Sánchez, F. A., & Vera, J. H. (2018). *Potential of Samanea saman pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass*. Agricultural and Forest Meteorology, 258, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.262>
- Vázquez-Carrillo, M. F., Ku-Vera, J. C., González-Ronquillo, M., Gallegos, E. C., Kebreab, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2020). *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*. Elementos para Políticas Públicas, 4(1), 13-26.
- Vázquez-Carrillo, M. F., Montelongo-Pérez, H. D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., & Castelán-Ortega, O. A. (2020). Effects of Three Herbs on Methane Emissions from Beef Cattle. *Animals*, 10(9), 1671. <https://doi.org/10.3390/ani10091671>
- Vitali, A., Grossi, G., Martino, G., Bernabucci, U., Nardoneb, A., & Laceterab, N. (2018). *Carbon footprint of organic beef meat from farm to fork: a case study of short supply chain*. J Sci Food Agric.v;98(14):5518-5524. doi: 10.1002/jsfa.9098

IX. ANEXOS

Dieta dada por default por el modelo GLEAM-i desarrollada por la FAO 2022 para el sistema en pastoreo para ganado productor de Leche.

Sistema	Orientación	Categoría	Ingrediente	Porcentaje de inclusión
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de alfalfa	4.82%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la remolacha azucarera	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de otros cereales	3.36%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Maíz	2%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Remolacha forrajera	11.39%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Granos	5%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Ensilado de plantas integrales.	9.66%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Hierba fresca	1.59%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de hierba cultivada	1.61%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Heno de áreas adyacentes	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Mezcla fresca de gramíneas y legumbres	4.82%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de gramíneas y leguminosas	1.61%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproducto seco de las industrias de granos	2.19%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproducto húmedo de las industrias de granos	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Hojas de vegetación natural	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Ensilado de planta entera de maíz	5.48%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la semilla de algodón	0.78%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproductos de colza (canola)	0.66%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la soja	1.27%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Melaza	5.67%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de mijo	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Pienso de gluten de maíz	0%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Harina de gluten de maíz	0.5%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Expeller de semilla de palma aceitera	1.93%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de arroz	8.53%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de sorgo	5.42%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de caña de azúcar	7.93%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de trigo	9.36%
Pastoreo	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de maíz	4.43%

Dieta dada por default por el modelo GLEAM-i desarrollada por la FAO 202 para el sistema en pastoreo para ganado productor de carne.

Sistema	Orientación	Categoría	Ingrediente	Porcentaje de inclusión
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de alfalfa	5.9%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la remolacha azucarera	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de otros cereales	4.12%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Maíz	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Remolacha forrajera	13.95%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Granos	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Ensilado de plantas integrales.	11.84%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Hierba fresca	1.95%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de hierba cultivada	1.98%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Heno de áreas adyacentes	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Mezcla fresca de gramíneas y legumbres	5.9%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de gramíneas y leguminosas	1.98%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproducto seco de las industrias de granos	0.14%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproducto húmedo de las industrias de granos	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Hojas de vegetación natural	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Ensilado de planta entera de maíz	6.71%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la semilla de algodón	0.16%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproductos de colza (canola)	0.13%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la soja	0.05%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Melaza	1.13%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de mijo	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Pienso de gluten de maíz	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Harina de gluten de maíz	0%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Expeller de semilla de palma aceitera	0.39%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de arroz	10.44%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de sorgo	6.64%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de caña de azúcar	9.72%
Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de trigo	11.46%

Pastoreo	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de maíz	5.42%
Total de % de inclusión				98.06

Dieta dada por default por el modelo GLEAM-i desarrollada por la FAO 2022 para el sistema mixto para ganado productor de leche.

Sistema	Orientación	Categoría	Ingredientes	Porcentaje de inclusión
Mixto	Leche	Hembras adultas	Hierba fresca	1.39%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de alfalfa	4.21%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la remolacha azucarera	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de otros cereales	2.94%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Maíz	3%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Remolacha forrajera	9.96%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Granos	7.5%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Ensilado de plantas integrales.	8.45%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de hierba cultivada	1.41%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Heno de áreas adyacentes	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Mezcla fresca de gramíneas y legumbres	4.21%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Heno o ensilado de gramíneas y leguminosas	1.41%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproducto seco de las industrias de granos	3.29%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproducto húmedo de las industrias de granos	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Hojas de vegetación natural	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Ensilado de planta entera de maíz	4.79%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la semilla de algodón	1.17%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproductos de colza (canola)	0.99%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Subproductos de la soja	1.91%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Melaza	8.5%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de mijo	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Pienso de gluten de maíz	0%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Harina de gluten de maíz	0.75%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Expeller de semilla de palma aceitera	2.89%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de arroz	7.46%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de sorgo	4.74%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de caña de azúcar	6.94%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de trigo	8.19%
Mixto	Leche	Hembras adultas	Residuos de cultivos de maíz	3.87%
Total de % de inclusión				99.97%

Dieta dada por default por el modelo GLEAM-i desarrollada por la FAO 2022 para el sistema mixto para ganado productor de carne.

Sistema	Orientación	Categoría	Ingrediente	Porcentaje de inclusión
Mixto	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de alfalfa	5.72%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la remolacha azucarera	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de otros cereales	3.99%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Maíz	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Remolacha forrajera	13.52%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Granos	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Ensilado de plantas integrales.	11.47%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Hierba fresca	1.89%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de hierba cultivada	1.92%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Heno de áreas adyacentes	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Mezcla fresca de gramíneas y legumbres	5.72%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Heno o ensilado de gramíneas y leguminosas	1.92%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproducto seco de las industrias de granos	0.35%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproducto húmedo de las industrias de granos	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Hojas de vegetación natural	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Ensilado de planta entera de maíz	6.51%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la semilla de algodón	0.39%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproductos de colza (canola)	0.33%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Subproductos de la soja	0.14%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Melaza	2.83%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de mijo	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Pienso de gluten de maíz	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Harina de gluten de maíz	0%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Expeller de semilla de palma aceitera	0.96%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de arroz	10.12%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de sorgo	6.43%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de caña de azúcar	9.42%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de trigo	11.11%
Mixto	Carne	Hembras adultas	Residuos de cultivos de maíz	5.26%
Total de % de inclusión				100%

