



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

Cristóbal
Villanueva Najarro

Tesis doctoral

Análisis de las emisiones de
gases de efecto invernadero en
fincas productoras de leche de
Costa Rica



Lugo, 2022

Programa de doctorado en Ciencias Agrícolas y Medioambientales



TESIS DE DOCTORADO

**ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE
GASES DE EFECTO
INVERNADERO EN FINCAS
PRODUCTORAS DE LECHE DE
COSTA RICA**

Cristóbal Villanueva Najarro

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO
2022





D./Dña. **Cristóbal Villanueva Najarro**

Título de la tesis: **Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica**

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

- 1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
- 2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
- 3) Confirmando que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.
- 4) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide la versión impresa con la presentada en formato electrónico.

Y me comprometo a presentar el Compromiso Documental de Supervisión en el caso que el original no esté depositado en la Escuela.

En **Lugo, 11 de noviembre de 2021.**

Firma electrónica





AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR/TUTOR DE LA TESIS

D./Dña. **Agustín Merino García**

En condición de: **Tutor/a**

Título de la tesis: **Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica**

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/Dña **Cristóbal Villanueva Najarro**, bajo mi dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director/tutor de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Lugo, **18 de enero de 2022**

Firma electrónica





AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR/TUTOR DE LA TESIS

Dña. **Cristina Castillo Rodriguez**

En condición
de: **Director/a**

Título de la
tesis: **Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica**

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/Dña **Cristóbal Villanueva Najarro**, bajo mi dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director/tutor de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Lugo, 12 de noviembre de 2021

Firma electrónica





AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR/TUTOR DE LA TESIS

D. **Muhammad Ibrahim**

En condición de: **Director/a**

Título de la tesis: **Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero en fincas productoras de leche de Costa Rica**

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/Dña **Cristóbal Villanueva Najarro**, bajo mi dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director/tutor de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Lugo, **12 de noviembre de 2021**

Firma electrónica



DEDICATORIA

A Dios por ser fuente de paz y sabiduría para las mejores decisiones en la vida.

A mis padres Francisca Najarro Peñate y José Luis Villanueva Florián (QEPD), por su ejemplo de valorar la vida con acciones positivas. Mi padre, entre tantos uno como este: "Solo el que no arriesga no sabe que es perder, ganar y seguir".

A mi esposa Ericka Najarro Téllez, por ser parte de este proyecto en el que seguimos remando despacio, pero sin parar.

A mis hijas Clarissa, Cristina y Cristel inspiración maravillosa para ver y sentir la vida en sus distintas dimensiones. Que este logro signifique que todo es posible en la vida. Cristel, con pocos años, pero nos has dado un gran ejemplo de lucha para superar cualquier situación difícil y buscar trascender en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por darme un espacio para seguir apoyando la misión institucional producción y conservación, lo cual ha sido valioso para seguir creciendo a nivel personal y profesional. También, por la oportunidad de utilizar datos de proyectos para la investigación de mi tesis.

Al Dr. Muhammad Ibrahim por creer en mi persona y brindarme la oportunidad de participar en el desarrollo de la ganadería sostenible en la región mesoamericana. Además, por la orientación y consejos en el proyecto de investigación.

A la Dra. Cristina Castillo Rodríguez, por la confianza depositada en mi persona y sus valiosos aportes pragmáticos en los momentos clave del proceso de la construcción de la obra. Asimismo, por sus palabras de motivación para terminar esta tarea.

Al Dr. Fernando Casanoves de la Unidad de Estadística del CATIE, por su apoyo y orientación con los análisis estadísticos aplicados a los datos de la investigación.

Al Dr. Agustín Merino García, por haberme abierto las puertas para participar en este estratégico Programa Internacional en Ciencias Agrícolas y Medioambiente.

A todas las personas que participaron en la realización de este trabajo.



RESUMO

O sector gandeiro está conformado por 37.171 leiras distribuídas en sistemas de produción de carne (52,3), dobre propósito (31,3%) e lechería especializada (16,2%). A actividade contribúe con 2.445,35 Gg de CO_{2eq} (22,5%) das emisións totais do país e das cales o 42% corresponden ás leiras produtoras de leite. Nese sentido, é importante realizar unha avaliación das emisións de gases de efecto invernadoiro (GEI) nos sistemas de produción de leite para identificar as oportunidades que contribúan coa mitigación ao cambio climático e a estimación de factores de emisión local de metano entérico en vacas leiteiras con distinto perfil xenético. Por tanto, levou a cabo unha avaliación das emisións de GEI en sistemas de produción de leite e a estimación de metano entérico (o principal GEI das leiras gandeiras) en vacas leiteiras con diferente perfil xenético.

Na avaliación das emisións de GEI en sistemas de produción de leite foi seleccionada unha base de datos de 87 leiras produtoras de leite (69 de lechería especializada e 18 de dobre propósito), en cada leira estimáronse as emisións de GEI (fontes primarias e secundarias) e determinou a pegada de carbono por medio da Análise de Ciclo de Vida. A información dos sistemas de produción foi analizada por medio da proba de T; análise de conglomerados para coñecer os grupos de leiras segundo o nivel de intensificación produtiva; análise de varianza con modelos lineais xerais e mixtos para avaliar o efecto do nivel de intensificación sobre a pegada de carbono e outras variables de emisións de GEI. Tamén, foron realizados análise de compoñentes principais para identificar as variables biofísicas, socioeconómicas e de emisións de GEI relacionadas cos grupos de leiras segundo o nivel de intensificación.

Existen diferenzas marcadas ($p < 0,05$) entre os sistemas de produción de lechería especializada e dobre propósito en termos de carga animal e produción de leite. Estas variables son maiores no sistema de lechería especializada (5,41 vs 2,55 UA/ha e 17.097 vs 3.688 kg/ha/ano) e é a resposta a un maior uso de insumos como concentrado e fertilizante nitrogenado. En lechería especializada predomina o uso de razas puras de leite (*Bos taurus*) e nas de dobre propósito cruces de *Bos indicus* x *Bos taurus*. As fontes de emisión de GEI como insumos externos, gando comprado e fertilización nitrogenada foron diferentes entre os sistemas de produción ($p < 0,05$). Mentres, a fermentación entérica e o manexo do esterco foron similares ($p > 0,05$). A fermentación entérica foi a maior fonte de emisión de GEI con 49,82% e 48,11% para lechería especializada e dobre propósito respectivamente. Tamén, a pegada de carbono para leite e carne foi diferente ($p < 0,05$) entre sistemas de produción. En lechería especializada foi de 2,28 e 11,06 kg CO_{2eq}; e en dobre propósito foi de 5,45 e 23,72 kg CO_{2eq} respectivamente.

Con respecto á estrutura do rabaño e emisións de GEI, en ambos os sistemas de produción as vacas en muxido mostraron a maior emisión (65,91% para lechería especializada e 39,78% para dobre propósito), seguido das vacas secas, os xatos 1-2 anos e as tenreiras. As outras categorías rexistran a menor achega de GEI, e xeralmente son as menos frecuentes nas leiras gandeiras. As emisións por categoría de gando foron significativamente diferentes entre os sistemas de produción ($p < 0,05$), excepto as categorías os xatos 1-2 anos e tenreiras. O sistema dobre propósito tivo o maior valor, excepto para vacas en muxido, no caso dos xatos 1-2 anos e tenreiras foron similares. En ambos os sistemas de produción, cando a estrutura do hato actual foi axustada polos parámetros porcentaxe de vacas en muxido en relación co total de vacas (75% e 80%) e a taxa de substitución (20%) tívoise unha redución de emisións de GEI por leira de 3% e 14%, para lechería especializada e dobre propósito respectivamente.

As leiras produtoras de leite agrupáronse en tres niveles de intensificación (alto, medio e baixo) por medio das variables altitude, carga animal, produtividade, consumo de concentrado e fertilización nitrogenada. As emisións por fermentación entérica e o manexo do esterco non foron afectadas polo nivel de intensificación das leiras ($p > 0,05$). Pola contra, as emisións por uso de insumos externos e fertilización nitrogenada foron maiores en leiras cun nivel de alto e medio de intensificación ($p < 0,05$). Similar tendencia ocorreu coa pegada de carbono de leite, xa que esta foi menor nas leiras con maior nivel de intensificación ($p < 0,05$), mentres para a pegada de carbono de carne non houbo efecto da intensificación produtiva ($p > 0,05$).

En conclusión, as leiras produtoras de leite con maiores indicadores de produtividade e intensificación produtiva están asociadas cunha alta carga animal, maior uso de concentrado e fertilización nitrogenada nas pasturas. Este grupo de leiras (representado polo sistema lechería especializada) presentaron as menores pegadas de carbono de leite e tiveron maiores emisións polo uso de insumos externos e fertilizantes nitrogenados que as leiras con baixo nivel de intensificación (sistema dobre propósito). A fermentación entérica foi a principal fonte de emisión de GEI nas leiras cunha achega próxima ao 50%. Os axustes na estrutura do rabaño, por exemplo, maior porcentaxe de vacas en muxido e taxa de substitución do 20% pareceron ter un impacto na redución das emisións de GEI por leira en termos do 3% e 14% para os sistemas de lechería especializada e dobre propósito respectivamente.

Con respecto á estimación de metano entérico en vacas leiteiras con diferente perfil xenético, foron seleccionadas 16 vacas, quen foi distribuídas nos seguintes 3 grupos xenéticos: 7 F1 (50% Jersey x 50% Gyr), 5 Triplo cruzamento (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) e 4 Jersey. Neste grupo de vacas foi medido na última semana de cada mes o metano entérico, usando a técnica SF₆ durante 15 meses. Ás emisións de metano entérico, ao factor de conversión de enerxía bruta a metano (FCM), ao consumo de e á intensidade de emisións (por unidade de leite e de materia seca) realizóuselles unha análise de varianza usando modelos lineais xerais e mixtos. Os niveis de significación establecéronse para unha $p < 0,05$. A emisión de metano entérico non mostrou unha diferenza estatística significativa ($p > 0,05$) entre grupos raciais, aínda que se variou en función da fase de lactación, atribuíble á produción de leite e o consumo de materia seca (MS). Así, a emisión diaria media foi de 274,49, 322,69 e 297,77 g/vaca para os grupos F1, Triplo cruzamento e Jersey respectivamente. Mentres a emisión anual foi de 91,22, 111,82 e 111,42 kg/vaca para cada un dos respectivos grupos raciais.

De feito, o consumo de MS total, pasto e intensidade de emisións de metano/ unidade de MS se variaron significativamente dependendo de se as vacas estaban en fase de secado ou lactación. A inxesta de MS foi maior en lactación mentres que a emisión de metano entérico/ unidade de MS consumida foi maior cando as vacas estaban no período seco. Con respecto á eficiencia no uso da enerxía, a raza influíu significativamente na fase de secado, non así durante a lactación. Cando as vacas están secas son menos eficientes no uso da enerxía xa que presentaron un maior FCM, mentres que variou segundo a fase de lactación, sendo menor no período < 76 días, incrementándose entre os 76-150 días e tendendo á redución ao final desta fase (> 150 días). Considerando a media anual de todo o estudo as vacas con maior proporción da xenética *Bos taurus* presentaron un maior FCM de 5,90, 7,22 e 7,05 % para F1, Triplo cruzamento e Jersey respectivamente. En conclusión, os grupos raciais non mostraron diferenza estatística significativa na emisión de metano entérico e FCM. Aínda que, de acordo ás tendencias as vacas F1 mostraron unha menor emisión de metano entérico e FCM en comparación ás vacas con maior xenética europea (*Bos taurus*).

Palabras chave: Estrutura do rabaño, factor de conversión de metano, fermentación entérica, idade de lactación, intensificación, mitigación, sistemas de produción.

RESUMEN

El sector ganadero está conformado por 37.171 fincas distribuidas en sistemas de producción de carne (52,3), doble propósito (31,3%) y lechería especializada (16,2%). La actividad contribuye con 2.445,35 Gg de CO₂eq (22,5%) de las emisiones totales del país y de las cuales el 42% corresponden a las fincas productoras de leche. Por lo tanto, es importante realizar una evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante GEI) en los sistemas de producción de leche para identificar las oportunidades que contribuyan con la mitigación al cambio climático y la estimación de factores de emisión local de metano entérico en vacas lecheras con distinto perfil genético.

En la evaluación de las emisiones de GEI en sistemas de producción de leche fue seleccionada una base de datos de 87 fincas productoras de leche (69 de lechería especializada y 18 de doble propósito), en cada finca se estimaron las emisiones de GEI (fuentes primarias y secundarias) y determinó la huella de carbono por medio del Análisis de Ciclo de Vida. La información de los sistemas de producción fue analizada por medio de la prueba de T; análisis de conglomerados para conocer los grupos de fincas según el nivel de intensificación productiva; análisis de varianza con modelos lineales generales y mixtos para evaluar el efecto del nivel de intensificación sobre la huella de carbono y otras variables de emisiones de GEI. También, fueron realizados análisis de componentes principales para identificar las variables biofísicas, socioeconómicas y de emisiones de GEI relacionadas con los grupos de fincas según el nivel de intensificación.

Existen diferencias marcadas ($p < 0,05$) entre los sistemas de producción de lechería especializada y doble propósito en términos de carga animal y producción de leche. Estas variables son mayores en el sistema de lechería especializada (5,41 vs 2,55 UA/ha y 17.097 vs 3.688 kg/ha/año) y es la respuesta a un mayor uso de insumos como concentrado y fertilizante nitrogenado. En lechería especializada predomina el uso de razas puras de leche (*Bos taurus*) y en las de doble propósito cruces de *Bos indicus* x *Bos taurus*. Las fuentes de emisión de GEI como insumos externos, ganado comprado y fertilización nitrogenada fueron diferentes entre los sistemas de producción ($p < 0,05$). Mientras, la fermentación entérica y el manejo del estiércol fueron similares ($p > 0,05$). La fermentación entérica fue la mayor fuente de emisión de GEI con 49,82% y 48,11% para lechería especializada y doble propósito respectivamente. También, la huella de carbono para leche y carne fue diferente ($p < 0,05$) entre sistemas de producción. En lechería especializada fue de 2,28 y 11,06 kg CO₂eq; y en doble propósito fue de 5,45 y 23,72 kg CO₂eq respectivamente.

Con respecto a la estructura del hato y emisiones de GEI, en ambos sistemas de producción las vacas en ordeño mostraron la mayor emisión (65,91% para lechería especializada y 39,78% para doble propósito), seguido de las vacas secas, las novillas 1-2 años y las terneras. Las otras categorías registran el menor aporte de GEI, y generalmente son las menos frecuentes en las fincas ganaderas. Las emisiones por categoría de ganado fueron significativamente diferentes entre los sistemas de producción ($p < 0,05$), excepto las categorías novillas 1-2 años y novillos. El sistema doble propósito tuvo el mayor valor, excepto para vacas en ordeño, en el caso de novillas 1-2 años y novillos fueron similares. En ambos sistemas de producción, cuando la estructura del hato actual fue ajustada por los parámetros porcentaje de vacas en ordeño en relación con el total de vacas (75% y 80%) y la tasa de reemplazo (20%) se tuvo una reducción de emisiones de GEI por finca de 3% y 14%, para lechería especializada y doble propósito respectivamente.

Las fincas productoras de leche se agruparon en tres niveles de intensificación (alto, medio y bajo) por medio de las variables altitud, carga animal, productividad, consumo de concentrado y fertilización nitrogenada. Las emisiones por fermentación entérica y el manejo del estiércol no fueron afectadas por el nivel de intensificación de las fincas ($p > 0,05$). Por el contrario, las emisiones por uso de insumos externos y fertilización nitrogenada fueron mayores en fincas con un nivel de alto y medio de intensificación ($p < 0,05$). Similar tendencia ocurrió con la huella de carbono de leche, ya que esta fue menor en las fincas con mayor nivel de intensificación ($p < 0,05$), mientras para la huella de carbono de carne no hubo efecto de la intensificación productiva ($p > 0,05$).

En conclusión, las fincas productoras de leche con mayores indicadores de productividad e intensificación productiva están asociadas con una alta carga animal, mayor uso de concentrado y fertilización nitrogenada en las pasturas. Este grupo de fincas (representado por el sistema lechería especializada) presentaron las menores huellas de carbono de leche y tuvieron mayores emisiones por el uso de insumos externos y fertilizantes nitrogenados que las fincas con bajo nivel de intensificación (sistema doble propósito). La fermentación entérica fue la principal fuente de emisión de GEI en las fincas con un aporte cercano al 50%. Los ajustes en la estructura del hato, por ejemplo, mayor porcentaje de vacas en ordeño y tasa de reemplazo del 20% parecieron tener un impacto en la reducción de las emisiones de GEI por finca en términos del 3% y 14% para los sistemas de lechería especializada y doble propósito respectivamente.

Con respecto a la estimación de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético, fueron seleccionadas 16 vacas, quienes fueron distribuidas en los siguientes 3 grupos genéticos: 7 F1 (50% Jersey x 50% Gyr), 5 Triple cruce (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) y 4 Jersey. En este grupo de vacas fue medido en la última semana de cada mes el metano entérico, usando la técnica SF₆ durante 15 meses. A las emisiones de metano entérico, al factor de conversión de energía bruta a metano (en adelante FCM), al consumo de materia seca (en adelante MS) y a la intensidad de emisiones (por unidad de leche y de MS) se les realizó un análisis de varianza usando modelos lineales generales y mixtos. Los niveles de significancia se establecieron para una $p < 0,05$. La emisión de metano entérico no mostró una diferencia estadística significativa ($p > 0,05$) entre grupos raciales, aunque sí varió en función de la fase de lactancia, atribuible a la producción de leche y el consumo de MS. Así, la emisión diaria promedio fue de 274,49, 322,69 y 297,77 g/vaca para los grupos F1, Triple cruce y Jersey respectivamente. Mientras la emisión anual fue de 91,22, 111,82 y 111,42 kg/vaca para cada uno de los respectivos grupos raciales.

De hecho, el consumo de MS total, pasto e intensidad de emisiones de metano/ unidad de MS sí variaron significativamente dependiendo de si las vacas estaban en el período de secado o lactancia. La ingesta de MS fue mayor en lactancia mientras que la emisión de metano entérico/ unidad de MS consumida fue mayor cuando las vacas estaban en el período de secado. Con respecto a la eficiencia en el uso de la energía, la raza influyó significativamente en el período de secado, no así durante la lactancia. Cuando las vacas están secas son menos eficientes en el uso de la energía ya que presentaron un mayor FCM, mientras que varió según la fase de lactancia, siendo menor en el período < 76 días, incrementándose entre los 76-150 días y tendiendo a la reducción al final de esta fase (> 150 días). Considerando el promedio anual de todo el estudio las vacas con mayor proporción de la genética *Bos taurus* presentaron un mayor FCM de 5,90, 7,22 y 7,05 % para F1, Triple cruce y Jersey respectivamente. En conclusión, los grupos raciales no mostraron diferencia estadística significativa en la emisión de metano entérico y FCM. Aunque, de acuerdo con las tendencias las vacas F1 mostraron una menor

emisión de metano entérico y FCM en comparación a las vacas con mayor genética europea (*Bos taurus*).

Palabras clave: Estructura del hato, edad de lactancia, factor de conversión de metano, fermentación entérica, intensificación, mitigación, sistemas de producción.

ABSTRACT

The Costa Rican livestock sector has 37,171 farms distributed in meat production systems (52.3%), dual purpose (31.3%), and specialized dairy (16.2%). This sector contributes with 2,445.35 Gg of CO_{2eq} (22.5%) of the country's total emissions, of which 42% belongs to milk-producing farms. In this sense, it is important to carry out an evaluation of greenhouse gas emissions (GHG) in milk production systems to identify opportunities that contribute to mitigate climate change and estimating local emission factors of enteric methane in dairy cows with different genetic profiles. Therefore, an evaluation of GHG emissions in milk production systems and the estimation of enteric methane (the main GHG of livestock farms) was carried out in dairy cows with different genetic profiles.

In the evaluation of GHG emissions in milk production systems, a database of 87 milk-producing farms was selected (69 from specialized dairy and 18 dual-purpose). In each farm the GHG emissions were estimated (primary sources and secondary) and determined the carbon footprint through the Life Cycle Analysis. The information from the production systems was analyzed through the T test; cluster analysis to identify the groups of farms according to the level of productive intensification; variance analysis with general and mixed linear models to evaluate the effect of the level of intensification on the carbon footprint and other variables of GHG emissions. Also, the analysis of main components was carried out to identify the biophysical, socioeconomic and GHG emissions variables related to the groups of farms according to the level of intensification.

There are big differences ($p < 0.05$) between the specialized dairy and dual-purpose production systems in terms of stocking rate and milk production. These variables are higher in the specialized dairy system (5.41 vs 2.55 AU/ha and 17,097 vs 3,688 kg/ha/year), and it is the response to a greater use of inputs such as concentrate and nitrogen fertilizer. In specialized dairy, the use of pure breeds of milk (*Bos taurus*) predominates and in dual-purpose *Bos indicus* x *Bos taurus* crosses. The sources of GHG emissions such as external inputs, purchased livestock and nitrogen fertilization were different between the production systems ($p < 0.05$). Meanwhile, enteric fermentation and manure management were similar ($p > 0.05$). Enteric fermentation was the largest source of GHG emissions with 49.82 and 48.11% for specialized dairy and dual purpose respectively. Also, the carbon footprint for milk and meat was different ($p < 0.05$) between production systems. In specialized dairy it was 2.28 and 11.06 kg CO_{2eq}; and in dual purpose it was 5.45 and 23.72 kg CO_{2eq} respectively.

Regarding the herd structure and GHG emissions, in both production systems, milking cows showed the highest emission (65.91% for specialized dairy and 39.78% for dual purpose), followed by dry cows, heifers 1-2 years and calves. The other categories show the lowest GHG contribution and are generally the least frequent on livestock farms. The emissions by category of cattle were significantly different between the production systems ($p < 0.05$), except the categories heifers 1-2 years and steers. The dual-purpose system had the highest value, except for milking cows. In the case of 1–2-year-old heifers and steers were similar. In both production systems, when the current herd structure was adjusted by the parameters of the percentage of milking cows in relation to the total number of cows (75 and 80%) and the replacement rate (20%), there was a reduction of GHG emissions per farm of 3% and 14% for specialized dairy and dual purpose, respectively.

The milk-producing farms were grouped into three levels of intensification (high, medium, and low) through the variables of altitude, stocking rate, productivity, consumption of concentrate and nitrogen fertilization. Emissions from enteric fermentation and manure management were not affected by the level of intensification of the farms ($p > 0.05$). On the other hand, emissions from the use of external inputs and nitrogen fertilization were higher on farms with a high and medium level of intensification ($p < 0.05$). A similar trend occurred with the milk carbon footprint, since it was lower in the farms with a higher level of intensification ($p < 0.05$), while for the meat carbon footprint there was no effect of productive intensification ($p > 0.05$).

In conclusion, the dairy cattle farms with higher productivity indicators and productive intensification are associated with a high stocking rate, higher use of concentrate and nitrogen fertilization in pastures. This group of farms represented by the specialized dairy system had the lowest milk carbon footprints and higher emissions from the use of external inputs and nitrogen fertilizers than farms with a low level of intensification (dual-purpose system). Enteric fermentation was the main source of GHG emissions on farms with a contribution close to 50%. The herd structure adjustments, for example, higher percentage of milking cows and replacement rate of 20% seemed to have an impact on reducing GHG emissions per farm in terms of 3% and 14% for dairy systems specialized and dual purpose respectively.

Regarding the estimation of enteric methane in dairy cows with different genetic profiles, 16 cows were selected, which were distributed in the following three genetic groups: seven F1 (50% Jersey x 50% Gyr), five Triple cross (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) and four Jersey. Enteric methane was measured in this group of cows in the last week of each month, using the SF₆ technique for 15 months. For enteric methane emissions, to the conversion factor of gross energy to methane (FCM), to the consumption of dry matter and the intensity of emissions (per unit of milk and dry matter), an analysis of variance was carried out using linear, general and mixed models. The significance levels were established for $p < 0.05$. The enteric methane emission did not show a statistically significant difference ($p > 0.05$) between racial groups, although it varied depending on the lactation phase, attributable to milk production and dry matter consumption (hereinafter MS). Thus, the average daily emission was 274.49, 322.69 and 297.77 g/cow for the F1, Triple-cross and Jersey groups respectively. While the annual emission was 91.22, 111.82 and 111.42 kg / cow for each of the respective racial groups.

In fact, the total consumption DM, pasture, and intensity of methane emissions / unit of DM varied significantly depending on whether the cows were in the drying or lactation period. DM intake was higher in lactation while enteric methane emission / DM unit consumed was higher when cows were in the dry period. Regarding the efficiency in the use of energy, the breed had a significant influence on the drying period, but not during lactation. When the cows are dry, they are less efficient in the use of energy since they presented a higher FCM, while it varied according to the lactation phase, being lower in the period <76 days, increasing between 76-150 days and tending to the reduction at the end of this phase (>150 days). Considering the annual average of the entire study, the cows with the highest proportion of *Bos taurus* genetics presented a higher FCM of 5.90, 7.22 and 7.05% for F1, Triple cross and Jersey, respectively. In short, the racial groups showed no statistically significant difference in the emission of enteric methane and FCM. Although, according to the trends, the F1 cows showed a lower emission of enteric methane and FCM compared to the cows with greater European genetics (*Bos taurus*).

Keywords: Enteric fermentation, herd structure, intensification, lactation age, livestock production systems, methane conversion factor, mitigation.

ABREVIATURAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida	FONTAGRO	Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria
CH ₄	Metano	GEI	Gases de Efecto Invernadero
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical	g	Gramos
CDN	Contribuciones Determinadas a nivel Nacional	Gg	Gigagramos
CNPL	Cámara Nacional de Productores de Leche	ha	Hectárea
CO ₂	Dióxido de carbono	INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
CO _{2eq}	Dióxido de carbono equivalente	IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
COMEX	Ministerio de Comercio Exterior de Costa Rica	kg	Kilogramo
cv.	Cultivar	km	Kilometro
CVO	Certificado Veterinario de Operaciones	MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
EGBC	Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono	MINAE	Ministerio del Ambiente y Energía
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación	MS	Materia seca
FCM	Factor de conversión de energía bruta a metano	mm	Milímetros
FECALAC	Federación Centroamericana del Sector Lácteo	msnm	Metros sobre el nivel del mar

MRV	Monitoreo Reporte y Verificación	SIDE	Servicios Internacionales para el Desarrollo Empresarial
NAMA	Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación	SF ₆	Hexafluoruro de azufre
N ₂ O	Óxido nitroso	t	Tonelada
PV	Peso vivo	UA	Unidad animal, que equivale a 450 kg de peso vivo
PIB	Producto Interno Bruto	USAID	Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
PLCGP	Producción de leche corregida por grasa y proteína		

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Evolución de los sistemas de producción de leche en Costa Rica	3
1.1.1 Tipos de explotaciones y estrategias de alimentación.....	4
1.1.2 Manejo de purines	6
1.2 Los sistemas de producción de leche y su aporte a la producción láctea nacional	7
1.3 Consumo de leche en Costa Rica y comercio internacional.....	9
1.4 Potencial de mitigación de las fincas productoras de leche	10
1.5 Co-beneficios adicionales.....	13
1.6 Políticas para promover ganadería sostenible con bajas emisiones de carbono.....	15
1.7 Definición del problema.....	16
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. METODOLOGÍA	25
3.1 Área de estudio.....	25
3.2 Estimación de emisiones de GEI en fincas productoras de leche	25
3.2.1 Selección de fincas	25
3.2.2 Definición del límite del sistema y estimación de emisiones.....	25
3.2.3 Unidad funcional y asignación de GEI a los productos	26
3.2.4 Análisis estadístico.....	27
3.3 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético	29
3.3.1 Selección de las vacas y alimentación.....	29
3.3.2 Medición del metano entérico y de otras variables	30
3.3.3 Análisis estadístico	32
4. RESULTADOS	36
4.1 Emisiones de GEI en fincas productoras de leche.....	36
4.1.1 Características de los sistemas de producción de leche.....	36
4.1.2 Fuentes de emisión de GEI y huella de carbono en los sistemas de producción de leche	37
4.1.3 Estructura del hato de fincas y emisiones de gases de efecto invernadero	37
4.1.4 Nivel de intensificación y emisiones de gases de efecto invernadero.....	39
4.2 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético	41
4.2.1 Emisión de metano entérico en vacas lecheras según grupo racial	41

4.2.2 Consumo de alimentos, producción de leche e intensidad de emisiones de metano entérico	41
4.2.3 Eficiencia en el uso de la energía por vacas lecheras	43
5. DISCUSIÓN.....	47
5.1 Emisiones de GEI en fincas productoras de leche.....	47
5.1.1 Caracterización de las fincas	47
5.1.2 Emisiones de GEI según sistemas de producción e intensificación productiva.....	48
5.1.3 Estructura del hato y relación con emisiones de GEI.....	49
5.2 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético	50
5.2.1 Emisión de metano entérico en vacas lecheras	50
5.2.2 Intensidad de emisiones de metano entérico	51
5.2.3 Eficiencia en el uso de la energía por vacas lecheras	52
6. CONCLUSIONES	57
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de fincas, áreas de pasto y sistemas de producción bovina en Costa Rica.....	3
Tabla 2. Especies de pastos de mayor uso en las distintas regiones ganaderas de Costa Rica ..	6
Tabla 3. Características de las condiciones agroecológicas y de manejo de los sistemas de producción de leche en Costa Rica.....	7
Tabla 4. Producción de leche en los sistemas de producción según nivel de tecnología y ecosistema en Costa Rica	8
Tabla 5. Consumo, exportaciones e importaciones de productos lácteos por Costa Rica.....	10
Tabla 6. Principales fuentes de emisión de los gases de efecto invernadero (%) en las fincas productoras de leche en Costa Rica.....	10
Tabla 7. Dinámica de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel país, sector agropecuario y ganadería bovina en Costa Rica (Gg CO ₂ eq).....	11
Tabla 8. Emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción bovina según el inventario nacional de Costa Rica para el año 2015.	12
Tabla 9. Balance de carbono (tCO ₂ eq) en fincas productoras de leche de diferentes zonas agroecológicas.....	13
Tabla 10. Factores de emisión para la estimación de emisiones de GEI en fincas productoras de leche.....	28
Tabla 11. Estimación de las emisiones de GEI para la producción y transporte de agro insumos importados por las fincas productoras de leche	29
Tabla 12. Composición química y energética de los suplementos utilizados en las vacas (en base seca).....	30
Tabla 13. Consumo diario de alimentos (kg MS/vaca) por las vacas en producción y secas.	30
Tabla 14. Principales variables biofísicas, productivas y socioeconómicas en los sistemas de producción de leche en Costa Rica.....	36
Tabla 15. Fuentes de emisión de GEI y huella de carbono en los sistemas de producción de lechería especializada y doble propósito de Costa Rica.....	37
Tabla 16. Contribución porcentual de las categorías de ganado en las emisiones de GEI de los sistemas de producción de leche de Costa Rica	38
Tabla 17. Variables que influyen en la conformación de los grupos de fincas según el nivel de intensificación.	39
Tabla 18. Indicadores de emisión según el nivel de intensificación productiva de las fincas productoras de leche de Costa Rica.....	39
Tabla 19. Emisiones diarias de metano entérico en vacas de diferente grupo racial durante el periodo de secado y en las distintas fases de lactancia.....	41
Tabla 20. Emisión anual de metano entérico (kg) en vacas según el grupo racial.....	41
Tabla 21. Consumo de alimento, producción de leche y emisiones de metano en vacas de distinto grupo racial durante los periodos de lactancia y secado.....	42
Tabla 22. Factor de conversión de metano entérico (%) en vacas de diferente grupo racial durante el periodo de secado y en las distintas fases de lactancia.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de explotación en las fincas según el sistema de producción bovina de Costa Rica.....	4
Figura 2. Estrategia de alimentación según el sistema de producción bovina de Costa Rica	5
Figura 3. Regiones socioeconómicas de Costa Rica	5
Figura 4. Sistemas de tratamientos del estiércol según el sistema de producción bovina de Costa Rica	7
Figura 5. Relación entre el stock de carbono y el índice de biodiversidad en pasturas, sistemas silvopastoriles y otros usos para la conservación. Esparza, Costa Rica.....	15
Figura 6. Descripción general del límite y los flujos en los sistemas de producción de leche.	26
Figura 7. Contribución porcentual de las categorías de ganado en las emisiones de GEI en el escenario actual y el sugerido como deseable en fincas productoras de leche. Costa Rica	38
Figura 8. Análisis de componentes principales (bi-plot) para conocer las relaciones entre variables de emisiones de GEI y su afinidad con las fincas según nivel de intensificación. ...	40

1. INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Evolución de los sistemas de producción de leche en Costa Rica

El sector ganadero en Costa Rica, según la encuesta del año 2014 ocupa un área total de 1.044.910 ha. El área ocupada por cada sistema de producción corresponde al 58, 31 y 10 % para los de carne, doble propósito y leche respectivamente. Por lo tanto, de dicha área, las fincas dedicadas a la producción de leche cubren un área de 434.452 hectáreas (42% del total; Instituto Nacional de Estadística y Censo, en adelante INEC, 2015). Los sistemas de producción de carne agrupan a las fincas dedicadas a la cría, cría y engorde, y solamente engorde. El doble propósito aquellos establecimientos dedicados a la producción de leche y carne, la mayoría venden el ternero o ternera al destete. Las fincas de carne y leche han tenido una tendencia a reducción, mientras que aquellas de doble propósito han tendido a aumentar (Tabla 1). Este patrón posiblemente se deba al precio inestable del ganado de carne, mientras que el doble propósito ofrece una mayor resiliencia de las fincas ante cambios de precios del mercado de la leche o de la carne (terneros o terneras). Además, permitirá un mejor flujo de caja que el sistema de carne, debido a la venta diaria de leche o productos derivados de la misma en caso se realice en la finca el procesamiento.

En los últimos 30 años el número de fincas ganaderas y el área de pasturas se han reducido 28% y 37% respectivamente (INEC, 2015; INEC, 2019). Dicho cambio no ha afectado la productividad de leche y carne, al contrario, dichos productos se han incrementado como resultado de la intensificación sostenible de los sistemas de producción (Tabla 1). Eso ha favorecido la conservación e incremento del área de bosques, los cuales a nivel nacional han alcanzado un 51% (Sánchez Azofeifa, 2015). El INEC (2015) de acuerdo con el Censo Agropecuario de Costa Rica del año 2014, indica que casi la mitad del bosque del país se encuentran en fincas ganaderas. Los cambios positivos y permanencia de ellos están relacionados con el enfoque de producción y conservación, y con políticas, por ejemplo, el pago por servicios ambientales. Además, de la educación y conciencia de los usuarios de la tierra.

Tabla 1. Número de fincas, áreas de pasto y sistemas de producción bovina en Costa Rica.

Variable	1984	2000	2014	2017
Número de fincas ganaderas	51.745	38.365	37.171	NR
Área de pasturas (ha)	1.651.560	1.349.628	1.044.910	NR
Productividad de leche (t/año)**	356.873	721.855	1.076.951	1.144.352
Productividad de carne (t/año)**	76.790	82.268	88.196	77.904
Sistemas de producción (%)				
Carne	60,40	65	42	52,30
Doble propósito	17,59	22	32	31,30
Leche	18,73	17	26	16,20

NR: no se reportan dato. Fuente: INEC (2015); INEC (2019); Food and Agriculture Organization, en adelante FAO (2019)

1.1.1 Tipos de explotaciones y estrategias de alimentación

En Costa Rica existen tres tipos de explotación de las fincas como son el pastoreo, el semi-estabulado y estabulado. El pastoreo cuando el ganado pasa casi todo el tiempo en los potreros buscando satisfacer sus requerimientos nutricionales. En el semi-estabulado el ganado combina pastoreo con la suplementación alimenticia en confinamiento para completar la demanda nutricional, el periodo de confinamiento es menor a 24 horas. Mientras, en la estabulación el ganado se mantiene confinado 24 horas y allí mismo recibe la dieta para llenar los requerimientos nutricionales.

En Costa Rica, la mayoría de las fincas se manejan bajo pastoreo, el 95,9% de las fincas de carne, 95,6% de doble propósito y 82% de leche. Este tipo de explotación tiene a las pasturas como la estrategia para producir leche o carne y con ello buscar un menor costo. En semi-estabulación sobresalen las fincas de leche con 16% y con menor presencia las de doble propósito y carne con 4 y 3,8% respectivamente. En estabulación muy pocas fincas, el 2% de aquellas dedicadas a leche, 0,3% de carne y ninguna de doble propósito (Figura 1; INEC, 2019). Los tipos de explotación semi-estabulado y estabulado constituyen opciones para aquellas fincas que cuentan con poca área de terreno. Estas fincas implementan varias opciones para satisfacer la demanda de alimento tales como: suplementación con alimentos comprados fuera de la finca, producción de forraje de corte en la misma finca o fuera de esta (tierras alquiladas), o implementan las opciones anteriores.

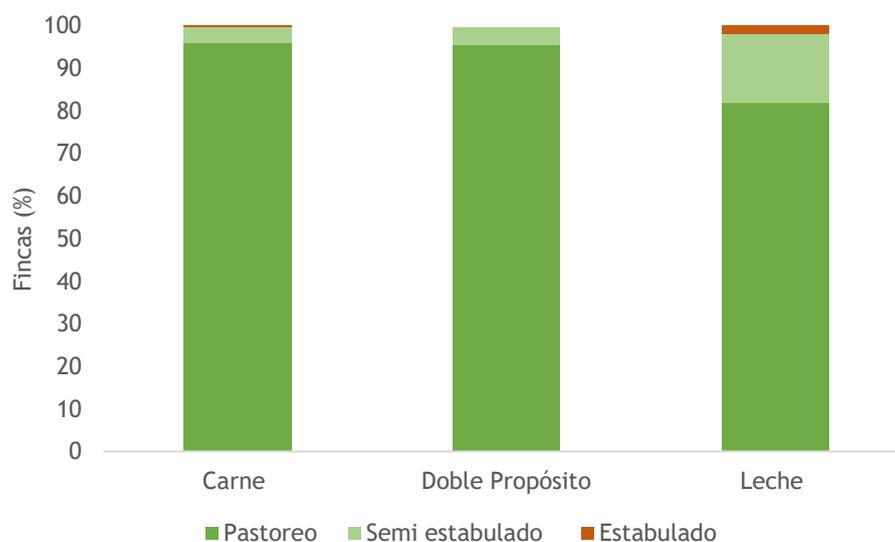


Figura 1. Tipos de explotación en las fincas según el sistema de producción bovina de Costa Rica.

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (INEC 2019).

Casi todas las fincas ganaderas tienen como principal fuente de alimentación los pastos, en doble propósito 99% de las fincas, en carne 98% y leche 92%. Las fincas utilizan pastos naturalizados y mejorados (o introducidos por sus ventajas en productividad de leche y carne), en una proporción similar de ambos, excepto en el sistema doble propósito donde el 54% de las fincas usan pastos naturalizados y el 45% mejorados (Figura 2). Las especies de pastos naturalizados y mejorados de mayor uso en las distintas regiones de Costa Rica se presentan en la Tabla 2 y la distribución de las regiones en el país se muestran en la Figura 3. Es notoria la adopción que han tenido en las regiones las especies mejorada como *Urochloa* spp y

Megathyrus maximus. Similar patrón ocurre con los forrajes de corte y acarreo como el *Pennisetum* sp y *Saccharum officinarum* con el fin de aumentar la cantidad y calidad de alimento a lo largo del año.

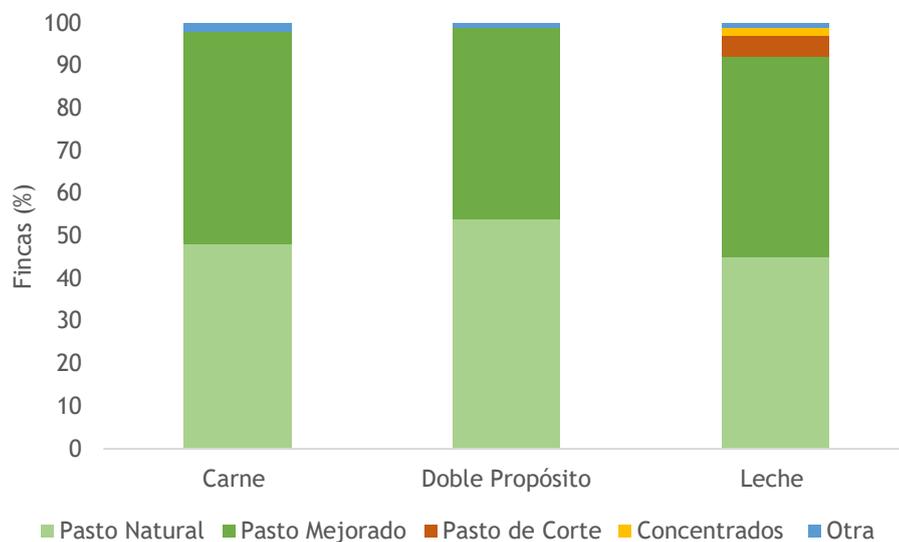


Figura 2. Estrategia de alimentación según el sistema de producción bovina de Costa Rica.

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (INEC, 2019).



Figura 3. Regiones socioeconómicas de Costa Rica.

Tabla 2. Especies de pastos de mayor uso en las distintas regiones ganaderas de Costa Rica.

Zona de vida y especies de pastos	Región Brunca	Región Central	Región Huetar Atlántica	Región Huetar Norte	Región Pacífico Central	Región Chorotega
Pastos naturales						
<i>Ischaemum indicum</i>	x	x	x	x		x
<i>Hyparrhenia rufa</i>	x	x		x	x	x
<i>Paspalum spp</i>				x		x
Pastos mejorados						
<i>Urochloa decumbens</i>	x	x		x		x
<i>Urochloa brizantha</i>	x	x	x	x	x	x
<i>Urochloa sp cv. Mulato</i>			x	x		x
<i>Cynodon nlemfuensis</i>	x	x		x	x	x
<i>Megathyrsus maximus (Guinea)</i>		x		x	x	x
<i>Megathyrsus maximus (cv. Mombasa)</i>	x		x	x	x	x
<i>Megathyrsus maximus (cv. Massai y Tanzania)</i>				x		x
<i>Pennisetum clandestinum</i>		x		x		
<i>Lolium spp</i>		x				
Pastos de corte						
<i>Pennisetum sp</i>	x	x	x	x	x	x
<i>Saccharum officinarum</i>	x	x	x	x	x	x
<i>Axonopus scoparius</i>		x			x	
<i>Zea mays</i>		x			x	x
<i>Sorghum vulgare</i>		x				x

Fuente: SIDE (2016).

1.1.2 Manejo de purines

En los sistemas de producción de ganadería bovina, la mayoría de las fincas no realizan tratamiento del estiércol reflejado en el 87%, 82% y 57% de las fincas de los sistemas de producción de carne, doble propósito y leche respectivamente. En las fincas de los sistemas de carne y doble propósito, algunas realizan tratamiento del estiércol por medio de compostaje y corresponde al 13% y 16% respectivamente. En el caso de las fincas de leche tienen varios sistemas de tratamiento del estiércol como compostaje, biodigestión y lagunas de oxidación en valores del 38%, 4% y 1% de las fincas respectivamente (Figura 4; INEC, 2019). Las fincas productoras de leche producen la mayor cantidad de estiércol en corral debido al confinamiento parcial durante el ordeño, lecherías especializadas alrededor de 6 horas y las de doble propósito menos de 6 horas. Una vaca productora de leche confinada produce un promedio 1,5 kg de estiércol por hora (Casasola y Villanueva, 2015). Sin embargo, llaman la atención las fincas productoras de leche que no aplican tratamiento al estiércol (en su mayoría fincas de doble propósito), ello debido a que en Costa Rica es obligatorio el manejo del estiércol para obtener cada año el Certificado Veterinario de Operaciones (en adelante CVO)¹. Las fincas que

¹ Son una serie de requisitos que deben cumplir los establecimientos, su actividad, procesos y los productos finales que en ellos se realicen para garantizar el respeto y protección a la salud humana, la salud animal y el medio ambiente (Ministerio de Agricultura y Ganadería, en adelante MAG, 2006).

comercializan la leche con la industria implementan prácticas para el manejo del estiércol. Esto con el fin de aprovechar las ventajas socioeconómicas de este subproducto y con ellos reducir los impactos negativos para el suelo, el agua, el aire y salud pública. De igual manera constituye una imagen positiva como parte de la responsabilidad social, empresarial y ambiental de la industria.

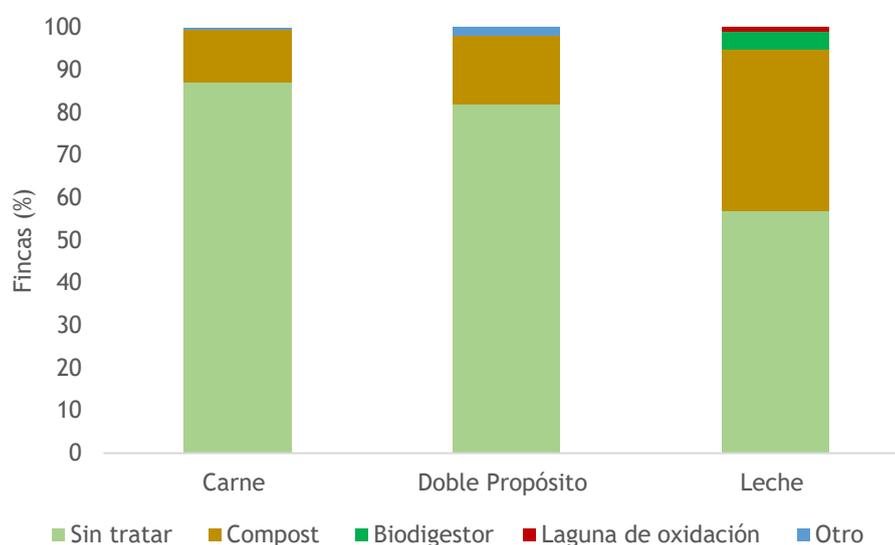


Figura 4. Sistemas de tratamientos del estiércol según el sistema de producción bovina de Costa Rica.

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (INEC, 2019).

1.2 Los sistemas de producción de leche y su aporte a la producción láctea nacional

La producción anual de leche en Costa Rica alcanza 1.144.000 toneladas (FAO, 2019), de la cual un 60% corresponde a producción industrial y el 40% restante es leche producida de manera informal (Federación Centroamericana del Sector Lácteo, en adelante FECALAC, 2017). Esta última generalmente proviene de ganado doble propósito, de ordeño manual, la leche se comercializa en plantas locales de procesamiento o es procesada por las familias productores para producir queso que se vende en los mercados locales.

Las fincas con sistemas de producción de lechería especializada se localizan en altura y bajura. Las primeras se ubican en zonas superiores a los 1.500 msnm y las segundas a menos de 500 msnm. En el caso de los sistemas de doble propósito se encuentran en zonas secas y húmedas y en ambos casos a menos de 500 msnm. El uso de razas lecheras, la carga animal y el uso de concentrado tiende a ser mayor en las fincas de lechería de altura que presentan un manejo con mayor intensificación (Vargas Leitón *et al.*, 2013; Tabla 3).

Tabla 3. Características de las condiciones agroecológicas y de manejo de los sistemas de producción de leche en Costa Rica.

Variable climática	Lechería especializada de altura	Lechería especializada de bajura	Doble propósito de zona húmeda	Doble propósito de zona seca
Altura (msnm)	>1.500	<500	<500	<500
Temperatura (°C)	16-18	24-26	24-26	24-26

Precipitación pluvial	2.500-3.000	3.500-4.000	3.000-3.500	<1.500
Meses con lluvia	8-10	12	12	6-7
Meses sin lluvia	2-4	0	0	5-6
Uso de concentrado (kg/ha/año)	4.800-14.400	4.320	1.200	1.200
Carga animal (UA*/ha)	3,00 - 6,50	3,00 - 5,50	2,50	2,50
Razas especializadas de leche (%)	80-100	80-100	20-40	20-40

Fuente: Adaptado de Vargas Leitón *et al.* (2013). *UA=unidad animal que equivale a 450 kg de peso vivo.

El INEC (2019) indica que la productividad nacional promedio de leche alcanza 1.965 kg/ha/año; mientras que a nivel de sistemas de producción de lechería especializada y doble propósito corresponde a 4.450 y 1.060 kg/ha/año respectivamente. En ambos sistemas existe una brecha entre la producción actual y el potencial de la región agroecológica, pero especialmente en los sistemas de doble propósito, los cuales siguen funcionando de manera tradicional. En estos sistemas se podrían implementar tecnologías en términos de mejoramiento en el manejo de las pasturas (pastoreo racional, asocio con leguminosas herbáceas, programas de fertilización según análisis de suelos, ajuste de carga animal según disponibilidad y calidad, y disponibilidad – acceso permanente al agua); salud y manejo reproductivo para aumentar la relación de vaca ordeño con vaca total; manejo de los reemplazos efectivo que necesita el sistema; mejoramiento genético con raza o cruces con mejor adaptación a condiciones de trópico de bajura. También, la mejora en la gestión de purines para reducir el impacto negativo al suelo, agua y aire.

En los sistemas de producción de lechería especializada el rendimiento de leche es mayor que los sistemas de producción doble propósito. La producción de leche tiende a ser mayor conforme se mejora la calidad de la dieta a expensas de alto uso de concentrados (Tabla 4) y el uso de razas lecheras *Bos taurus*, ya sean puras o cruzadas, que son los principales factores en la innovación de los sistemas de producción especializados, también explicados en la Tabla 3.

Tabla 4. Producción de leche en los sistemas de producción según nivel de tecnología y ecosistema en Costa Rica.

Sistema de producción	Tecnología	Producción diaria por vaca (kg)	Productividad (kg/ha/año)	Referencia
Zona de vida bosque húmedo montano bajo y pre-montano				
Lechería especializada de altura	Forraje: 73% Concentrado: 22,9%	12,70	12.970	Iñamagua <i>et al.</i> (2016)
	Forraje: 69,4% Concentrado: 26,2%	14,10	11.972	
	Forraje: 54,3% Concentrado: 37,7	16,60	18.177	
	Forraje: 57% Concentrado: 43%	31,10	NR	Montenegro <i>et al.</i> (2020)
Zona de vida bosque tropical subhúmedo				
Doble propósito	Baja	4,66	797	Vega (2016)
	Media	5,95	2.675	
	Alta	9,40	3.335	

NR: no se reporta dato.

Los sistemas doble propósito han presentado una variabilidad en el ingreso por la venta de leche, eso tiene relación con la dinámica de la demanda y precios de leche y carne en los

mercados y es parte de la flexibilidad de dichos sistemas de ajustarse según las tendencias del mercado. Letelier (2018) identificó en Costa Rica tres modalidades de sistemas de producción bovina doble propósito según el aporte en el ingreso total por la venta de leche: en el primero entre 1 y 39%; en el segundo entre 40 y 59%; y en el tercero entre 60 y 89%.

Por lo tanto, la innovación en los sistemas de producción de doble propósito constituye una opción para mantener o incrementar la producción de leche a nivel nacional (según la dinámica del mercado) a un precio competitivo, esto debido a que esta producción se realizaría con bajos insumos externos que son los que incrementan los costos de producción, ya que en su mayoría son importados. En este sentido, Fukumoto *et al.* (2010) y Baptista *et al.* (2019) realizaron estudios, en Río de Janeiro y Sao Paulo respectivamente, en sistemas de producción de leche basados en pasturas mejoradas bajo pastoreo intensivo, uso de suplementación estratégica con concentrado (3 kg de leche por 1 de concentrado) y el uso de vacas cruzadas (Holstein x Cebú). Bajo estas condiciones dichos autores han encontrado una productividad de leche que supera los 5.000 kg/ha/año.

La competitividad del sector es importante de cara al 2025 cuando la leche importada de Estados Unidos tenga un arancel de cero. Este tratado de libre comercio fue firmado en el 2006 entre Estados Unidos y Centroamérica y República Dominicana. En dicho tratado se indicó que 10 años posteriores a la firma (2016 y con arancel del 52%) iniciaría la desgravación arancelaria para los productos lácteos hasta el 2025 (Ministerio de Comercio Exterior de Costa Rica, en adelante COMEX, 2003). Este escenario está obligando al sector lácteo a buscar opciones para reducir costos de producción y al desarrollo de sistemas de producción más autónomos con recursos forrajeros de la finca. También, es una oportunidad para mostrar la marca país por medio de una buena gestión ambiental.

Por otro lado, la perspectiva del sector presenta una tasa anual de crecimiento de la producción del 2,8% y de consumo del 0,3%, esta situación es muy particular dado a que el país registra la mayor producción y consumo per cápita en la región centroamericana. El panorama a futuro del país es como colocar los incrementos en la producción en el mercado regional y competir con otras empresas extra regionales que están ingresando en el mercado centroamericano. El país podría estar en ventajas según el fortalecimiento del estado sanitario con relación al control y erradicación de enfermedades como brucelosis y tuberculosis. También, por los avances en la gestión ambiental del sector ganadero del país (Acosta y Valdés, 2014) y el plan país para la descarbonización de la economía al 2050 (Ministerio del Ambiente y Energía, en adelante MINAE, 2019).

1.3 Consumo de leche en Costa Rica y comercio internacional

El consumo de leche per cápita ha mostrado un crecimiento del 11,29% en el periodo 2012 - 2016. En el 2016 el consumo alcanzó 217 kg/persona/año, este valor es superior a los otros países de la región de Centro América y a la recomendación de FAO de 150 kg de leche. Las exportaciones e importaciones han tenido un crecimiento en el valor económico de 29,48 y 28,12% respectivamente; similar tendencia para el volumen de equivalente leche fluida de 6,73 y 22,72% respectivamente (Cámara Nacional de Productores de Leche, en adelante CNPL, 2019; Tabla 5). En el caso de las exportaciones el aumento obedece al incremento de la producción nacional de leche como respuesta a nuevos destinos de los productos y mayor demanda de los socios comerciales. En el caso de las importaciones, los cambios tienen relación con el incremento de la demanda nacional de productos lácteos con mayor valor agregado.

El destino de los productos es Guatemala (40%), Panamá (16%), Republica Dominicana (16%), El Salvador (11%), Nicaragua (8%), Honduras (7%) y Cuba (2%). La balanza comercial para el año 2017 presenta un saldo positivo de 78,54 millones de US\$ debido a que las exportaciones (155,17 millones de US\$) son mayores que las importaciones (76,64 millones de US\$; (CNPL 2019).

Tabla 5. Consumo, exportaciones e importaciones de productos lácteos por Costa Rica.

Indicadores	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Consumo per Cápita (kg)	195,80	205,22	200,56	216,08	217,11	ND*
Exportaciones						
Valor en millones (FOB** US\$)	119,84	126,11	153,85	131,87	152,79	155,17
Volumen ELF*** (millones de Kg)	216,48	214,75	241,67	218,66	250,57	231,37
Importaciones						
Valor en millones (CIF**** US\$)	59,82	66,06	73,14	74,60	75,35	76,64
Volumen ELF (millones de Kg)	113,10	114,34	118,91	143,82	160,60	138,80

Fuente: CNPL (2019). *No existe dato. **Free on Board. ***Equivalente Leche Fluida. ****Cost Insurance and Freight.

1.4 Potencial de mitigación de las fincas productoras de leche

En las fincas ganaderas, la fermentación entérica es la principal fuente de gases de efecto invernadero (por medio del gas metano), la cual supera el 65% del total de emisiones de gases de efecto invernadero. En el caso de las fincas de lechería especializada, además de la fermentación entérica, existen otras fuentes de emisión como el manejo del estiércol y el uso de fertilizantes nitrogenados en las pasturas (Tabla 6).

Tabla 6. Principales fuentes de emisión de los gases de efecto invernadero (%) en las fincas productoras de leche en Costa Rica.

Sistema de producción	Fermentación entérica*	Fertilizante nitrogenado**	Manejo del estiércol***	Energía****	Combustibles fósiles****	Referencia
Doble propósito	81,34	11,54	1,99	0,98	5,47	Vega (2016)
Lechería especializada	69,25	10,00	20,75	ND	ND	Wattiaux <i>et al.</i> (2016)
Lechería especializada	81,60	10,50	3,40	0,80	3,70	Sánchez Ledezma (2018)

*metano entérico; **óxido nitroso; ***metano y óxido nitroso; ****dióxido de carbono.

Costa Rica presenta un inventario nacional de GEI con un crecimiento anual del 3,4% en los últimos 10 años. El sector ganadero es el responsable del 22,47% del inventario nacional GEI y del 64,11% de las emisiones del sector agropecuario, las cuales corresponden a emisiones por la gestión de pastizales, la fermentación entérica y el manejo del estiércol (Tabla 7; MINAE,

2019). El sector ganadero tendrá que realizar esfuerzos en la implementación de buenas prácticas para reducir las emisiones de metano entérico y óxido nitroso y paralelamente mejorar la competitividad del sector. Sánchez Ledezma (2018), indica que las fincas dedicadas a la producción de leche podrían reducir la emisión de metano entérico si manejan eficientemente la tasa de reemplazo que necesitan las fincas. Asimismo, Wattix *et al.* (2016) señalan que estas fincas podrían mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno según el nivel requerido para producir una pastura de bajo costo y de alta calidad y considerando el nitrógeno depositado por las vacas en el periodo de pastoreo y el manejo en los establos. En consonancia con lo anterior, Mazzetto *et al.* (2020) destacan la importancia de incluir fertilizantes nitrogenados diferentes a la urea e inhibidores de la nitrificación y la ureasa para reducir las emisiones de óxido nitroso, aunque para extender el uso de dichas opciones se requieren políticas para un precio menor que la urea en el mercado, subsidios u otros incentivos.

Pryce y Bell (2017) demostraron que el mejoramiento genético mejora la producción de leche individual, lo cual contribuye con una mayor producción con un menor número de vacas. Este cambio favoreció la disminución de las emisiones de GEI del sector lácteo en 1% por año en un periodo de 10 años. Manzanilla-Pech *et al.* (2021) indican que existe la oportunidad de selección de animales con baja emisión de metano sin comprometer otros rasgos económicos importantes. Ellos encontraron índices de heredabilidad de 0,21 para la producción diaria de metano, 0,30 para las emisiones por kg de materia consumida y 0,38 para las emisiones por kg de leche corregida por energía. Las correlaciones entre la producción diaria de metano y rasgos económicos importantes fueron de 0,29 con la producción de leche y 0,65 con el peso vivo.

Tabla 7. Dinámica de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel país, sector agropecuario y ganadería bovina en Costa Rica (Gg CO₂eq).

Indicador	2005	2010	2012	2015
Emisiones total país	8.115,09	11.440,87	11.807,24	10.881,68
Emisiones sector agropecuario	2.844,75	4.010,60	4.139,04	3.814,58
Emisiones sector ganadería bovina*	1.823,63	2.571,00	2.653,33	2.445,34

Fuente: Adaptado de MINAE (2019). *Emisiones a partir de la gestión de pastizales, la fermentación entérica y la gestión del estiércol.

Con respecto a las emisiones del sector ganadero del año 2015, el 42% corresponde a los sistemas de producción de leche y el 58% a los sistemas de producción de carne (Tabla 8). Dicha tendencia tiene relación con la población bovina que es mayor en el sistema de producción de carne. Sin embargo, los sistemas de producción de leche tienen un potencial de mitigación importante ya que cuentan con un área de 464.600 ha, en las cuales se puede aumentar el secuestro de carbono en suelo y en la cobertura arbórea (bosques y sistemas silvopastoriles). En este sentido, las tecnologías a implementar en estos sistemas para mejorar la productividad e ingresos por leche de las fincas tienen que afectar positivamente la parte de mitigación.

El potencial de mitigación en las fincas productoras de leche tiene relación con una mayor probabilidad de la implementación de tecnologías para mejorar la eficiencia productiva. Esto se ha demostrado en el tiempo (Tabla 1), ya que como producto de la intensificación productiva la producción de leche en los últimos 30 años ha tenido un crecimiento superior al 200% con menos área de pasturas y ganado, contrario a la producción de carne que ha mostrado una tendencia casi estable en dicho periodo. Acosta y Valdés (2014) argumentan que en los últimos años la tasa de crecimiento de la producción y el consumo de leche es positiva en la región centroamericana, que es el principal mercado para Costa Rica, indicando una potencial expansión del sector lácteo. En Costa Rica esta oportunidad de mercado podría desencadenar un aumento en el número de fincas dedicadas a la producción de leche a costa de los sistemas de producción de carne, que de hecho ha venido ocurriendo. También, se podría presentar el escenario potencial del mejoramiento en tecnología y gestión ambiental de los sistemas doble propósito para incrementar la productividad de leche y aporte en los objetivos de mitigación.

Tabla 8. Emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción bovina según el inventario nacional de Costa Rica para el año 2015.

Sistema de producción	Área (ha)	Emisiones (Gg CO ₂ eq)	%
Carne	652.821,33	1.428,62	58,40
Doble propósito	351.302,61	768,78	31,40
Lechería especializada	113.298,06	247,94	10,20
Total	1.117.422,00	2.445,34	100,00

Fuente: Elaborado a partir de datos del INEC (2019) y de MINAE (2019).

El último Informe Bianual de Actualización de Costa Rica, indica que el país ha establecido una meta de emisiones absolutas de 9.374 Gg de CO₂eq al 2030 (MINAE 2019). Asumiendo la tendencia que ha tenido el sector ganadero, el aporte en dichas emisiones totales sería de 2.106 Gg CO₂eq (22,47%). De acuerdo con la Estrategia Nacional de Ganadería Baja en Carbono² (en adelante EGBC), el sector ganadero puede lograr mejoras por la implementación de buenas prácticas en el 40% de área dedicada a la ganadera al año 2030. Dichas intervenciones aparte de mejorar la productividad de leche (46%) tendrán una emisión neta de 2,55 tCO₂eq/ha/año. Por lo tanto, las fincas dedicadas a la ganadería tendrán un potencial de emisiones netas de 473 Gg CO₂eq/año. Esto indica que el sector estaría compensando sus emisiones y generando un adicional de carbono, y ello está en línea con los objetivos de país de cumplir con las metas de la Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (en adelante CDN) y de carbono neutro.

El país para cumplir con la meta de la CDN ha venido promoviendo una serie de buenas prácticas como el establecimiento de pasturas mejoradas, sistemas de pastoreo racional, sistemas silvopastoriles (cercas vivas y árboles dispersos en potreros a partir de la regeneración natural), uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados en las pasturas, y la conservación e incremento de bosques. Dichas prácticas fueron priorizadas con técnicos y productores en las distintas regiones del país, en donde se consideraron criterios sobre costos de establecimiento y manejo, productividad y mitigación (MAG, 2015).

Las pasturas con árboles y los bosques en fincas ganaderas tienen potencial para secuestrar carbono sobre y debajo del suelo, aparte de mejorar la productividad animal. Este puede mejorar según la zona agroecológica, el sistema de pastoreo y la densidad de árboles. Arguedas *et al.*

² Es una política que ofrece la hoja de ruta para la transformación del sector ganadero, la cual fue lanzada en el 2015 por el Ministerio de Ambiente y Energía y el Ministerio de Agricultura y Ganadería.

(2019) en la zona de vida bosque tropical húmedo encontraron que el pasto cayman (*Urochloa híbrido* cv. CIAT BRO2/1752) usado bajo un sistema de pastoreo rotacional captura carbono orgánico en suelo en una tasa de 1,12 t/ha/año.

Amézquita *et al.* (2008) en una zona de bosque subhúmedo tropical de Costa Rica, encontraron tasas de secuestro de carbono sobre el suelo de 3,5, 4,1, 3,7 y 2,0 t/ha/año para sistemas con *Urochloa brizantha*, *U. brizantha* + *Arachis pintoi*, *Hyparrhenia rufa* y bosque secundario joven respectivamente. En fincas de altura (>1.500 msnm) Sánchez Ledezma (2018) reportó tasas de secuestro de carbono sobre el suelo para pasturas con baja densidad de árboles (6-8 árboles/ha con diámetro a la altura del pecho mayor a 10 cm) y bosques de 1,36 y 1,91 t/ha/año respectivamente. Rivera (2015) en la zona de boques tropical seco encontró que las cercas vivas enriquecidas con la especie maderable teca (*Tectona grandis*) presentan una captura de carbono de 6,02 tC/km/año. Las cercas vivas con inclusión de especies para producción de madera son una opción para mejorar los ingresos y el secuestro de carbono en fincas ganaderas. Por otro lado, Feliciano *et al.* (2018), en un estudio en varios sitios de América Latina, señalaron que los sistemas silvopastoriles pueden lograr en promedio tasas de secuestro de carbono de 2,30 y 6,50 t/ha/año en la cobertura arbórea y en el suelo respectivamente.

Una buena gestión de las pasturas y del componente arbóreo (en usos ganaderos y bosques) constituye una opción importante de captura de carbono para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero y convertir a las fincas ganaderas con un balance de carbono positivo (captura de carbono mayor que las emisiones; Tabla 9). Las fincas que presentan un balance de carbono positivo son aquellas que cuentan con pasturas mejoradas o naturales con árboles, cercas vivas y al menos el 25% del área de la finca es bosque. Las fincas con balance de carbono negativo tienen la oportunidad de mejorar dicho indicador a través de la implementación de prácticas como el aumento de la cobertura de árboles por medio sistemas silvopastoriles y bosques, asimismo, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero por medio de la intensificación productiva que motive a los productores a la reducción del tamaño del hato. Esto implica una mejor gestión de la calidad de los alimentos y selección de animales con mayor producción.

Tabla 9. Balance de carbono (tCO₂eq) en fincas productoras de leche de diferentes zonas agroecológicas.

Área de la finca (ha)	Captura de carbono	Emisiones	Balance	Referencia
Zona de vida bosque húmedo a muy húmedo montano y altitud 1.800 - 2.700 msnm				
Sistema de producción: lechería especializada				
17,0	30,80	284,70	-253,90	Sánchez Ledezma (2018)
44,8	250,60	391,00	-140,40	
37,0	260,50	502,30	-241,80	
Zona de vida bosque húmedo a muy húmedo montano y altitud <1.000 msnm				
Sistema de producción: doble propósito				
35,0	210,88	90,00	120,86	MAG y CATIE (2010)
42,4	314,81	93,80	221,00	
23,69	138,76	101,00	37,76	

1.5 Co-beneficios adicionales

La cobertura arbórea de las fincas ganaderas aparte de contribuir en el secuestro de carbono cumple funciones importantes en la conservación de la biodiversidad, la cual se constituye como la base para la resiliencia a la variabilidad climática y la generación de servicios ecosistémicos en finca y territorio (Solís *et al.*, 2019).

En ese sentido, Villanueva *et al.* (2016) encontraron que la sombra de los árboles en potreros reduce el estrés calórico de las vacas en producción con efecto positivo en la producción de leche. Esquivel (2007) encontró que varias especies leñosas en potreros producen frutos en la época seca y que son consumidos por el ganado. La diversidad de especies favorece que la disponibilidad de frutos a lo largo de toda la época seca, esto debido a que la fenología del fruto es diferente en cada especie. Asimismo, la calidad de los frutos supera casi por el doble a los pastos que existen en ese momento. En estas regiones con periodos largos de sequía, algunas especies leñosas se podrían podar estratégicamente, por ejemplo, al final de las lluvias, para producir forraje en los meses de escasez. Piñeiro Vázquez *et al.* (2018) y Valencia Salazar *et al.* (2018) han encontrado que tanto frutos como el follaje de algunas especies arbóreas de las fincas pueden tener compuestos secundarios (por ejemplo, taninos y saponinas) que pueden ayudar a reducir la población de organismos metanogénicos en el rumen y con eso reducir la emisión de metano entérico, lo cual significaría una mayor eficiencia en el uso de la energía por los rumiantes. Pelster *et al.* (2016) también han encontrado que los taninos de leñosas forrajeras como *Calliandra calothyrsus* contribuyen a reducir la emisión de óxido nitroso del estiércol y ello significa una mayor disponibilidad en el suelo para los pastos o forrajes.

De igual manera, De Souza *et al.* (2015) señalan el potencial de producción de madera de los sistemas silvopastoriles, no obstante, reconocen que falta mejorar el manejo silvicultural para que la producción de madera tenga un mayor impacto en los ingresos de la finca. Ríos *et al.* (2007) destacan la importancia de los sistemas silvopastoriles y otros usos arbolados como bosques en las zonas de recarga hídrica como estrategia para favorecer la infiltración de agua de lluvias y con ello la alimentación de los mantos freáticos. También, con la protección del suelo, ya que estos usos con mayor cobertura reducen los procesos de erosión hídrica.

Es importante mencionar que los usos del suelo con mayor potencial de secuestro de carbono también presentan un mayor índice de biodiversidad. Lo cual significa que los usos de la tierra o fincas con mayor diversidad de la vegetación tienen un mayor potencial en compensar las emisiones de gases de efecto invernadero de la actividad ganadera y generar otros servicios ecosistémicos adicionales de beneficio para la finca o fuera de la finca (Ibrahim *et al.*, 2010; Figura 5).

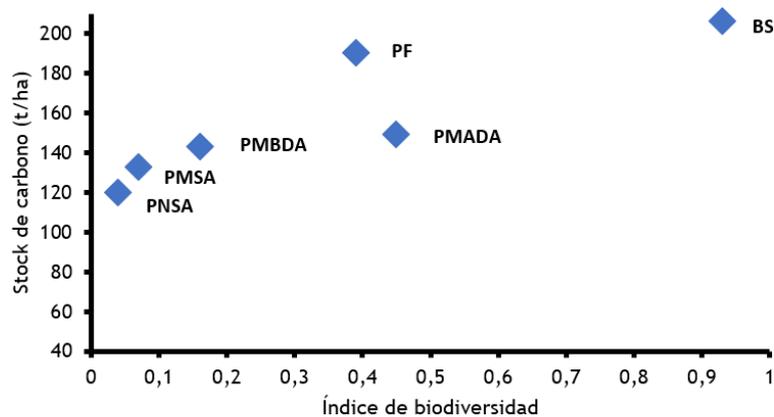


Figura 5. Relación entre el stock de carbono y el índice de biodiversidad en pasturas, sistemas silvopastoriles y otros usos para la conservación. Esparza, Costa Rica.

PMSA: pastura mejorada sin árboles; PNSA: pastura natural sin árboles; PMBDA: pastura mejorada con baja densidad de árboles (<30 individuos/ha con DAP³ de 10 cm); PMADA: pastura mejorada con alta densidad de árboles (≥30 individuos/ha con DAP de 10 cm); PF: plantaciones forestales; BS: bosque secundario. Fuente: Ibrahim et al. (2010).

1.6 Políticas para promover ganadería sostenible con bajas emisiones de carbono

El potencial de mitigación de las fincas productoras de leche es un insumo importante para el Plan de Descarbonización del país al año 2050, el cual fue anunciado en el 2019 y es pionero en el mundo. Dentro de este plan de descarbonización, la ganadería forma parte del sector Agricultura y tiene como meta la transformación del sector usando tecnologías más avanzadas de acuerdo con los estándares de sostenibilidad, competitividad, bajas en emisiones y resiliencia a los efectos del cambio climático (MINAE, 2019). Costa Rica cuenta con una EGBC, que incluye su plan de acción (2015 - 2034). La EGBC expone la orientación que se le dará al sector en los próximos años, para responder a las exigencias de mayor productividad y rentabilidad, menores emisiones de GEI, más secuestro de dióxido de carbono, y mayor adaptación al cambio y variabilidad climática. De esta forma el sector ganadero podrá contribuir a los objetivos nacionales de desarrollo y de las metas de mitigación país o ante los compromisos internacionales. La implementación de la Estrategia se hará por medio de un Plan de Acción que incluye diversas medidas de responsabilidad de las entidades del estado, de las organizaciones del sector ganadero y de los productores (MAG, 2015). Dicha Estrategia tiene que ser armonizada con las metas definidas en la CDN y las del Plan de Descarbonización del país.

Para la implementación del Plan de Acción de la Estrategia, el país ha diseñado como una opción la NAMA (del inglés *National Appropriate Mitigation Action*) Ganadería Bovina (MAG, 2019). La NAMA es un programa que complementará los esfuerzos existentes para el desarrollo de un sector ganadero más eco-competitivo, por medio de la implementación de tecnologías que favorecen la productividad e ingresos que mejoran la calidad de vida de las familias involucradas en la cadena de producción. Asimismo, dichas medidas reducen emisiones y/o incrementan los sumideros de carbono en las fincas ganaderas según las ambiciones nacionales. El NAMA Ganadería Bovina incluye en su alcance a los sectores carne, doble propósito y leche, en la totalidad del territorio nacional dedicado a esta actividad económica.

³ DAP: diámetro a la altura del pecho.

Las tecnologías promovidas son aquellas definidas de manera participativa (productores y técnicos) en el marco de la EGBC y que prometen un mayor impacto en la productividad, en la adaptación y mitigación al cambio climático. Las tecnologías priorizadas son las siguientes: i) introducción de pastos mejorados, ii) manejo racional de pasturas, iii) uso eficiente de fertilizantes, iv) sistemas silvopastoriles, v) plantaciones forestales, vi) conservación de forrajes, vii) salud del hato, viii) manejo reproductivo, ix) mejoramiento genético, x) infraestructura y equipo (principalmente instalaciones de manejo, sala y equipo de ordeño), xi) y sistema de registros.

Para facilitar la implementación de las tecnologías en fincas se han propuesto algunos instrumentos financieros tales como: i) Avales crediticios orientado a estratos de productores con acceso limitado al crédito por falta de garantías; ii) Sistema de Banca de Desarrollo, con tasas preferenciales de interés para los estratos de productores que tienen acceso al crédito; iii) Banco Nacional de Costa Rica, ofrece un crédito verde para la pequeña y medianas empresa orientado a la prevención, control, mitigación y compensación de los efectos ambientales negativos provocados por su funcionamiento. También se tiene una propuesta de un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (en adelante MRV) para la transparencia en el uso de los recursos financieros y el seguimiento a las metas de la ambición país establecidas en la EGBC. El MRV es un sistema que integra cuatro pilares estratégicos para el monitoreo y evaluación de las intervenciones de la NAMA Ganadería, los cuales son: i) reducción de emisiones y secuestro de carbono, ii) productividad de la ganadería, iii) implementación en finca de las buenas prácticas NAMA, iv) y la inversión financiera público – privada para favorecer la implementación de la NAMA (MAG, 2019).

1.7 Definición del problema

La actividad ganadera en América Central representa más del 30% de la cobertura de la tierra, con una población ganadera de aproximadamente 13 millones de cabezas de ganado y representa el principal medio de vida para más de medio millón de familias vinculados a lo largo de la cadena de producción. El rubro ganadero juega un rol importante en la economía de región ya que aporta entre el 8 y 38% del PIB agropecuario (Acosta y Valdez, 2014). Sin embargo, en los últimos años la actividad ha sido asociado con una serie de impactos negativos como la deforestación, degradación de suelos, contaminación de fuentes de agua y reducción de la biodiversidad. Los efectos anteriores tienen relación con la ineficiencia de manejo de los factores de producción de las fincas ganaderas y que están relacionados con una menor resiliencia al cambio climático y mayores emisiones de gases de efecto invernadero.

Las emisiones de GEI en los sistemas ganaderos se deben principalmente a las fuentes siguientes: i) Emisiones de metano (CH_4) procedentes de la fermentación entérica; ii) Emisiones de metano y óxido nitroso (N_2O) procedentes del manejo del estiércol; iii) Emisiones directas provenientes de fertilizantes nitrogenados sintéticos; iv) Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) procedentes de la utilización de combustibles fósiles debido al uso de maquinaria y equipo agrícola en la finca; y v) Emisiones de dióxido de carbono procedentes de los cambios en los usos de la tierra (Gerber *et al.*, 2013).

El metano entérico constituye el principal gas de efecto invernadero en fincas ganaderas productoras de leche, este varía entre 69 y 82% (Wattiaux *et al.*, 2016; Vega, 2016; Sánchez Ledezma, 2018). La emisión de este gas representa una ineficiencia en el uso de la energía (pérdida de energía bruta) que varía entre 2-12%. En sistemas de vacas lecheras la energía que

se pierde por medio del metano entérico equivale a una pérdida anual de días pastoreo que varía entre 25-40 (Ekcard *et al.*, 2010). Este enfoque podría ayudar a que los productores realicen los cambios que generen sinergias entre mayores ingresos y bajas emisiones. En ese sentido, se han evaluado varias opciones para reducir las emisiones de metano entérico, desde de la manipulación de la microflora ruminal, estrategias de alimentación, uso de aditivos no nutricionales, compuestos secundarios de especies forrajeras, entre otros. La decisión del método a implementar en los sistemas de producción implica la consideración de un criterio clave como la interacción entre el potencial de mitigación y la productividad (Gerber *et al.*, 2013; Jiao *et al.*, 2014; Van Wyngaard *et al.*, 2018). Incluso existen investigaciones sobre la selección genética de animales con bajas emisiones de metano entérico que simultáneamente mejora la eficiencia en el uso de la energía ingerida (Manzanilla-Pech *et al.*, 2021; Richardson *et al.*, 2021).

Costa Rica presenta un inventario nacional de gases de efecto invernadero con un crecimiento anual del 3,4% en los últimos 10 años. El sector ganadero es el responsable del 22,47% del inventario nacional de GEI y del 64,11% de las emisiones del sector agropecuario, las cuales corresponden a emisiones por la gestión de pastizales, la fermentación entérica y el manejo del estiércol (MINAE, 2019). El sector ganadero tendrá que realizar esfuerzos en la implementación de buenas prácticas para reducir las emisiones de metano entérico y óxido nitroso y además estar relacionadas con la competitividad del sector. Sánchez Ledezma (2018), indican que las fincas dedicadas a la producción de leche podrían reducir la emisión de metano entérico si manejaran eficientemente la tasa de reemplazo que necesitan las fincas. Asimismo, Wattix *et al.* (2016) señalan que las fincas podrían mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno según el nivel requerido para producir una pastura de bajo costo y de alta calidad y considerando el nitrógeno depositado por las vacas en el periodo de pastoreo y el manejo en los establos. En consonancia con lo anterior, Mazzetto *et al.* (2020) destacan la importancia de incluir fertilizantes nitrogenados diferentes a la urea e inhibidores de la nitrificación y la ureasa para reducir las emisiones de óxido nitroso, aunque para extender el uso de dichas opciones se requieren políticas para un precio menor que la urea en el mercado, subsidios u otros incentivos.

Costa Rica cuenta con una EGBC, la cual establece la hoja de ruta del país para la transformación de la ganadería en una actividad competitiva, resiliente al cambio climático y con bajas emisiones de carbono (MAG, 2015). Dicha Estrategia está articulada con el Plan Nacional de Descarbonización, diseñado por el país como ruta para la compensación de las emisiones de carbono al 2050 e identifica las tecnologías para la transformación del sector (MINAE, 2019). Ante este escenario es importante conocer las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de leche que funcionan en distintas condiciones agroclimáticas, de manejo y de intensificación productiva. Asimismo, es fundamental la generación de factores de emisión de metano entérico en las categorías de ganado con mayor aporte en los inventarios nacionales y también en la comparación de los distintos grupos raciales que son comunes en las fincas productoras de leche. La presente investigación contribuirá con información sobre la emisión de GEI (principalmente metano entérico) de los diferentes diseños de fincas productoras de leche. Además, en la generación local de factores de emisión de metano entérico para vacas lecheras con distinto perfil racial.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de leche de Costa Rica y las condiciones que influyen en la variación.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas de producción de leche de Costa Rica.
2. Identificar los factores asociados en las emisiones de gases de efecto invernadero en las fincas productoras de leche.
3. Estimar la emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético.
4. Valorar la emisión de metano entérico en el período de secado y en las fases del período de lactancia en vacas lecheras con diferente perfil genético.

3. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en Costa Rica. Este país se encuentra localizado en América Central, en las coordenadas 8° y 11 ° de latitud norte y 82 a 86 de longitud oeste, su extensión incluyendo su área insular es de 51.000 km². El estudio está enfocado en las fincas productoras de leche del sector ganadería. Este subsector representa el 41% de las fincas ganaderas, ocupa el 42% del área de pasturas (INEC 2015), genera la mayoría de los empleos en el sector ganadero con el 75% y representa el 70% del aporte de la ganadería bovina al PIB agropecuario (INEC, 2019).

La investigación fue organizada en dos secciones: la primera sobre la estimación de GEI en fincas productoras de leche y la segunda orientada en la emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético.

3.2 Estimación de emisiones de GEI en fincas productoras de leche

3.2.1 Selección de fincas

Fue utilizada una base de dato de 87 fincas productoras de leche de varios proyectos implementados por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, en adelante CATIE, en el periodo 2016-2019. De ellas 69 corresponden a lechería especializada y 18 a fincas con sistemas doble propósito. Todas ellas están distribuidas en las regiones agroecológicas citadas en la Tabla 3. En este grupo de fincas fue levantada la información siguiente: datos generales de la finca y de la familia propietaria, usos del suelo, estructura del hato, producción de leche, venta de ganado, manejo de los pastos y forrajes, suplementos alimenticios usados, consumo de electricidad y combustibles, agro insumos y productos veterinarios. La proteína y grasa de la leche cambia entre fincas por la raza y el sistema de alimentación. En ese sentido, la Federación Internacional de Lácteos (IDF, 2015) recomienda la estandarización de la leche por el 4% de grasa y el 3,3% de proteína verdadera por medio de la ecuación siguiente:

$$\text{PLCGP (kg/día)} = \text{Producción (kg/día)} \times [0,1226 \times \text{Grasa\%} + 0,0776 \times \text{Proteína verdadera\%} + 0,2534]$$

Donde: PLCGP es la producción de leche corregida por grasa y proteína.

3.2.2 Definición del límite del sistema y estimación de emisiones

En las fincas fue estimada la emisión de GEI con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (en adelante ACV) enfocada a la huella de carbono (kg CO₂eq/producto) como indicador del impacto ambiental de la actividad ganadera (Thomassen *et al.*, 2008). Para la estimación de la huella de carbono, los GEI serán estandarizados a dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) según su respectivo factor de potencial de calentamiento global para un horizonte de 100 año.

Para el metano corresponde 28, para el óxido nitroso 265 y para el dióxido de carbono 1 (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en adelante IPCC, 2014). Las emisiones fueron estimadas tomando como límite de la cuna a la puerta de finca (Figura 6). En este ámbito serán consideradas como emisiones primarias todas aquellas ocurridas dentro de la finca y secundarias aquellas fuera de la finca. Las emisiones primarias son el metano procedente de la fermentación entérica y del estiércol depositado en pasturas; el óxido nitroso directo (fertilizante sintético y estiércol) e indirecto (amonio); y el dióxido de carbono de la electricidad, diésel y otros combustibles. La estimación se realizó usando las ecuaciones del capítulo 10 del IPCC (2006; Tabla 10). En el caso de las emisiones secundarias fueron consideradas las que corresponde a la producción y transporte de los agroinsumos importados a la finca como alimentos, fertilizantes, enmiendas para el suelo, etc. Las emisiones fueron estimadas con los factores específicos a partir de Agri-Footprint (Durlinger *et al.*, 2014) y Ecoinvent (Weidema *et al.*, 2013; Tabla 11).

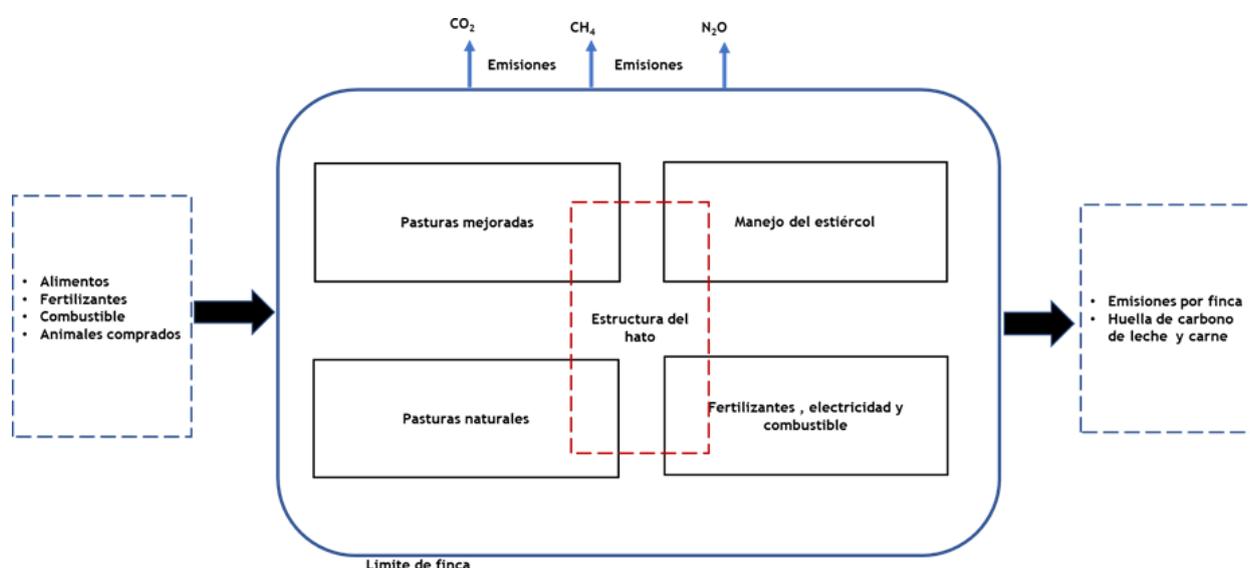


Figura 6. Descripción general del límite y los flujos en los sistemas de producción de leche.

La concentración de la energía bruta fue calculada de la energía consumida diariamente por cada categoría animal. En dicha estimación fue considerada la digestibilidad de la dieta y el requerimiento neto de energía para mantenimiento, crecimiento, lactancia y preñez. El consumo de MS fue estimado dividiendo el consumo de energía bruta de la categoría animal por el valor de la densidad de energía del alimento (18,45 MJ por kg de MS; IPCC, 2019).

3.2.3 Unidad funcional y asignación de GEI a los productos

En las fincas se produce leche y carne de manera simultánea; por lo tanto, la unidad funcional usada fue 1 kg de leche corregida por grasa y proteína y 1 kg de peso vivo vendido en la puerta de la finca. Cuando en la finca se produce más de un producto, la carga ambiental (en este caso emisiones de GEI) se asigna entre los productos (IDF, 2015). La asignación se realizó en base al contenido total de la energía aportada por la leche y por la carne producida. El factor de asignación depende de la cantidad de leche y carne producida por la finca para el año del estudio

(Rice *et al.*, 2017). En el caso de la carne procede del peso vivo de los animales que fueron enviados al matadero.

3.2.4 Análisis estadístico

Las variables sobre las características generales de las fincas como área total, área de pasturas, carga animal, uso de concentrado, dosis de fertilizantes, producción, indicadores de emisiones de GEI y las emisiones de las diferentes categorías de ganado fueron comparadas entre los sistemas de producción lechería especializada y de doble propósito, utilizando una prueba de T independiente y un nivel de significancia del 5%. También, fueron analizadas de manera general por medio de estadística descriptiva para presentar valores medios y error estándar.

Las fincas productoras de leche tienen diferente estructura del hato y esta tiene influencia en las emisiones de GEI de las fincas. En ese sentido, fue realizado un análisis por medio de la prueba de T independiente para conocer la diferencia entre los sistemas de producción (lechería especializada y doble propósito) a nivel de las emisiones de GEI de las categorías de ganado encontradas en las fincas como vaca ordeño, vaca seca, novillas > 2 años, novillas 1-2 años, terneras (< 1 año), terneros (< 1 año), novillos y toros. Para las distintas categorías de ganado fueron consideradas las principales fuentes de emisiones tales como la fermentación entérica (metano) y de la gestión del estiércol (metano y óxido nitroso). También, para cada sistema de producción fue comparada la estructura del hato actual y aquella sugerida como deseable. En la estructura deseable se utilizaron los parámetros reproductivos calificados como óptimos según la investigación de Castro Calderón *et al.* (2020). Por ejemplo, una relación de vaca ordeño y vaca total entre 75 y 80% y una tasa de reemplazo del 20%. En el marco de la presente investigación la relación vaca ordeño – vaca total fue de 75% para el sistema doble propósito y 80% para el sistema lechería especializada.

Las fincas dedicadas a la producción de leche fueron clasificadas según el nivel de intensificación productiva por medio de un análisis clúster. Las variables utilizadas fueron altitud, carga animal, productividad de leche, productividad de carne, consumo de concentrado y dosis de fertilizante nitrogenado. Las variables huellas de carbono (de leche y carne) y fuentes de emisiones de GEI en la finca (compra de ganado, insumos externos, fermentación entérica, manejo del estiércol y fertilizantes) no presentaron una distribución normal, por lo tanto, fueron transformadas a rangos para corregir la condición anterior. Se aplicó un análisis de varianza no paramétrica con la prueba Kruskal-Wallis para conocer el comportamiento de las variables entre los niveles de intensificación (alto, medio y bajo), y se utilizó un nivel de significancia de 5%.

También, fue realizado un análisis de componentes principales usando las variables de emisiones de GEI para explorar por medio de gráficos bi-plot las relacionadas con los grupos de fincas según el nivel de intensificación y las correlaciones entre dichas variables. Todos los análisis estadísticos de esta sección fueron realizados por medio del programa InfoStat versión 2019 (Di Rienzo *et al.*, 2019).

Tabla 10. Factores de emisión para la estimación de emisiones de GEI en fincas productoras de leche.

Fuente de emisión	Ecuación	Referencia
Metano - CH ₄		
Entérico	$CH_4 = [GE \times (Y_m/100) \times 365]/55,65]$	Ecuación 10.21 de IPCC (2006)
	$GE = [(NE_m + NE_a + NE_l + NE_p/REM) + (NE_g/REG)] / (DE\%/100)$	Ecuación 10.16 de IPCC (2006)
	NE _m : energía neta requerida por el animal para su mantenimiento (MJ/día)	Ecuación 10.3 de IPCC (2006)
	NE _a : energía neta para la actividad animal (MJ/día)	Ecuación 10.4 de IPCC (2006)
	NE _g : energía neta para el crecimiento (MJ/día)	Ecuación 10.6 de IPCC (2006)
	NE _l : energía neta para lactancia (MJ/día)	Ecuación 10.8 de IPCC (2006)
	NE _p : energía neta para la preñez (MJ/día)	Ecuación 10.13 de IPCC (2006)
	REM: relación entre la energía neta disponible en una dieta para mantenimiento y la energía digerible consumida	Ecuación 10.14 de IPCC (2006)
	REG: relación entre la energía neta disponible en la dieta para crecimiento y la energía digerible consumida	Ecuación 10.15 de IPCC (2006)
	DE%: energía digerible expresada como porcentaje de la energía bruta	IPCC (2006)
	Y _m : porcentaje de la energía bruta del alimento convertida en metano Y _m : 0,07	IPCC (2006)
Estiércol de la pastura y en el establo	$CH_4 = VS \times B_o \times 0,67 \times MCF/100 \times MS$	Ecuación 10.23 de IPCC (2006)
	$VS = [GE \times (1 - DE/100) + (UE \times GE)] \times [(1 - Ash)/ 18,45]$	Ecuación 10.24 de IPCC (2006)
	DE: digestibilidad del alimento MCF: factor de conversión de metano por sistema de gestión del estiércol	IPCC (2006)
	Bo: capacidad máxima de producción de metano del estiércol producido por el ganado	IPCC (2006)
Oxido nitroso - N ₂ O directo		
Pastura (estiércol y fertilizantes)	$N_2O-N = (F_{SN} \times EF_1) + (N_{ex} \times EF_{3PRP, CPP})$	Ecuación 11.1 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)
	EF ₁ : 0,01 EF _{3PRP, CPP} : 0,004	Tabla 11.1 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)
	$N_{ex} = N_{consumo} - N_{retención}$	Ecuación 10.31 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)
	$N_{consumo} = CMS \times (PC\%/100/6,25)$	Ecuación 10.32 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)



Tabla 10 (continuación)

Fuente de emisión	Ecuación	Referencia
	$N_{retención} = [(Leche \times (Leche PR \%/100)/6,38) + \{WG \times [268 - (7,03 \times Neg/WG)] / (1000 \times 6,25)\}]$ Leche PR%: $[1,9 + 0,4 \times \% Grasa]$	Ecuación 10.33 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)
Oxido nitroso - N ₂ O indirecto		
Pastura (NH ₃)	$N_2O-N = [(F_{SN} \times Fra_{GASF}) + (F_{PRP} \times Fra_{GASM})] \times EF_4$	Ecuación 11.9 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)

	Frac _{GASF} A base de amonio: 0,08 (0,02 - 0,3)	Ecuación 11.3 de IPCC (Gavrilova <i>et al.</i> , 2019)
	Frac _{GASM} : 0,21 (0,00 - 0,31)	
	EF ₄ : 0,01 (0,002 - 0,05)	
Dióxido de carbono - CO ₂ directo		
Diesel	CO ₂ -C = Consumo de combustible	IMN (2020)
	x EF _{Diesel} EF _{Diesel} : 2,61 kg CO _{2eq} /L	

Tabla 11. Estimación de las emisiones de GEI para la producción y transporte de agro insumos importados por las fincas productoras de leche.

Insumo	Huella de carbono (kg CO _{2eq} /kg de insumo)	Referencia
Fertilizante nitrogenado sintético		
N	6,6	Weidema <i>et al.</i> (2013)
P	3,6	
K	0,7	
Sal mineral	0,155	Weidema <i>et al.</i> (2013)
Melaza	0,871	Durlinger <i>et al.</i> (2014)
Transporte	254*	Weidema <i>et al.</i> (2013)

* kgCO_{2eq}/t/km

3.3 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético

Este estudio se llevó a cabo en la finca de CATIE, la cual se localiza en una zona de vida clasificada como bosque muy húmedo premontano y a una altura de 600 msnm (Holdridge, 1989). En los últimos cinco años el promedio de temperatura fue de 22,9°C, de la precipitación anual de 2.600 mm y de la humedad relativa de 87,7%. El estudio se realizó entre los años 2016 y 2017 por un período de 15 meses.

3.3.1 Selección de las vacas y alimentación

Fueron seleccionadas 16 vacas con una edad de lactancia menor a los 100 días, las cuales pertenecieron a los tres grupos raciales siguientes: 7 F1 (50% Jersey x 50% Gyr), 5 Triple cruce (50% Jersey x 31% Holstein x 19% Sahiwal) y 4 Jersey. El estudio fue parte de los proyectos Desarrollando sistemas de producción ganaderos competitivos con bajas emisiones de GEI en América Central, financiado por FONTAGRO⁴ y el Gobierno de Nueva Zelanda. Asimismo, del proyecto Ganadería con bajas emisiones en Costa Rica, el cual fue financiado por USAID⁵.

El grupo de vacas fue manejado por separado del resto del hato para evitar daños o caídas de los equipos. La alimentación fue realizada a base del pasto *Megathyrus maximus* cultivar (en adelante cv.) Mombasa con un periodo de ocupación de un día y 30 días de descanso. También, recibieron una suplementación con alimento balanceado comercial, harina de soya, citropulpa

⁴ Es un mecanismo único de cofinanciamiento sostenible para el desarrollo de tecnología agropecuaria en América Latina, el Caribe y España e instituye un foro para la discusión de temas prioritarios de innovación tecnológica. <https://www.fontagro.org/es/#>

⁵ Lidera los esfuerzos humanitarios y de desarrollo internacional para salvar vidas, reducir la pobreza, fortalecer la gobernabilidad democrática y ayudar a las personas a progresar más allá de la asistencia. <https://www.usaid.gov/>

(derivado de la industria de la naranja), melaza y pasto de corte *Pennisetum purpureum* cv. Taiwan (Tabla 12).

Tabla 12. Composición química y energética de los suplementos utilizados en las vacas (en base seca).

Alimento	Materia seca (%)	Proteína cruda (%)	Fibra Neutro Detergente (%)	Energía Digestible (Mcal/kg MS)
Alimento balanceado*	87,00	18,98		3,50
Harina de soya	88,00	47,75		3,30
Citropulpa**	87,00	4,00		2,85
Melaza	72,60	3,80		
<i>M. maximus</i> cv. Mombasa	16,10	11,10	57,60	1,90
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Taiwan	20,60	7,00	69,00	

*Concentrado **Subproducto de la industria de la naranja.

El consumo de los alimentos anteriores se presenta en el Tabla 13. El consumo de MS de pasto *M. maximus* cv. Mombasa fue estimado por medio de la técnica de óxido crómico (Mejía, 2002; Rodríguez *et al.*, 2007). El alimento balanceado comercial se ofreció según el nivel de producción de leche de las vacas, para lo cual se utilizó una relación de 1:3 o sea 1 kg de alimento balanceado por 3 kg de leche. Con respecto a los otros alimentos fue pesado lo ofrecido y rechazado para tener el consumo, la oferta fue similar para todas las vacas, tal como lo establece el plan de alimentación de la finca.

Tabla 13. Consumo diario de alimentos (kg MS/vaca) por las vacas en producción y secas.

Alimento	Vaca en producción	Vaca seca
Alimento balanceado	5,55	0,46
Harina de soya	0,36	-
Citropulpa*	1,95	0,31
Melaza	0,52	0,08
<i>M. maximus</i> cv. Mombasa	6,87	7,9
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Taiwan	0,81	0,55
Total	16,06	9,30

3.3.2 Medición del metano entérico y de otras variables

La medición del CH₄ entérico se llevó usando la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆) generada por Johnson (1995) y con ajustes para uso en regiones tropicales por Berndt *et al.* (2014). Antes de iniciar el ensayo, como parte de la técnica implicó realizar las actividades siguientes:

- Calibración de la tasa de emisión del gas trazador (SF₆) en los tubos de permeación (capsulas), esto se logró colocando los tubos en una incubadora a 39°C por 12 semanas y realizando dos pesajes semanales. Todos los tubos presentaron una curva de emisión del gas trazador con un R² de 0,999, aquellos con un valor menor se deben de rechazar. El dato de la tasa de emisión también sirve para estimar la vida útil del tubo y para el cálculo de la emisión diaria por vaca de metano entérico.
- Los tubos fueron colocados en las vacas, de la misma manera en que se coloca cualquier bolo en el rumen usando una cánula para asegurar la colocación. Esto se realizó dos semanas antes de iniciar con las mediciones.
- Las vacas fueron adaptadas con jácquima y el collar al cuello, dos semanas antes de iniciar el ensayo.
- Fue ajustada la línea de muestreo para identificar los puntos críticos donde estos se rompían o desacoplaban con el movimiento de las vacas. Estas piezas fueron ajustadas y se logró disminuir los daños. Incluso una práctica que redujo el daño fue el manejo separado de las vacas en la sala de alimentación y ordeño.
- La línea de muestreo tiene un tubo capilar colocado antes del filtro de humedad, el cual es el responsable de regular el flujo de gas que ingresa al collar (hecho de tubo PVC) procedente del eructo de la vaca. Los capilares fueron evaluados y calibrados para proveer un flujo que varió entre 0,35 -0,40 ml/min.

La medición de metano entérico en las vacas se realizó una vez por mes durante 15 meses. El equipo de medición fue colocado en las vacas por un periodo de 24 horas. Las muestras fueron enviadas al laboratorio del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) de Costa Rica, el análisis se realizó por medio de cromatografía de gases modelo Agilent 7890A que utiliza los detectores ionización de llama (FID) y de captura de electrones (ECD). El cálculo de metano entérico por vaca (g/vaca/día) se realizó usando la formula siguiente:

$$\text{CH}_4 \text{ (g/día)} = \text{SF}_6 \text{ TP} * \frac{\text{CH}_4 \text{ collar} - \text{CH}_4 \text{ ambiente}}{\text{SF}_6 \text{ collar} - \text{SF}_6 \text{ ambiente}}$$

Donde:

SF₆ TP= tasa de permeación SF₆ desde el tubo (mg/día)

La emisión diaria de metano por vaca fue calculada en el periodo seco y en las etapas del periodo de lactancia (<76 días, 76-150 días y >150 días). Estas etapas fueron definidas según el comportamiento de la curva de lactancia de las vacas en la finca de CATIE procesados en el sistema de registro VAMPP Bovino 3,0⁶. También, fue estimada la emisión anual de metano por vaca, considerando la emisión ponderada para el periodo de lactancia (280 días) y para el periodo seco (85 días) de la vaca. El largo del período de secado (equivalente a período seco o vaca seca en otras secciones del documento) es un promedio establecido según estadísticas de país para las fincas con lechería intensiva de bajura (CNPL 2019).

También fueron medidas otras variables como peso vivo de las vacas; producción diaria de leche; consumo de MS de pasto de piso, de corte y acarreo y de los suplementos que recibieron las vacas. Las variables anteriores fueron usadas para determinar la intensidad de emisiones por producción de leche y por consumo de MS. También, fue calculado el factor de conversión de energía bruta a metano entérico (FCM), a partir de la relación de la energía equivalente al metano entérico emitido y la energía bruta total ingerida por la vaca.

⁶ VAMPP Bovino 3.0 es un programa diseñado para el manejo de hatos bovinos lecheros, doble propósito, cría y engorde (<http://www.vampp-cr.com/>).

Todos los procedimientos fueron realizados acorde a la normativa que rige *El Manual de Buenas Prácticas en la Producción Primaria de Leche* publicado en julio del año 2012 por el Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA) de Costa Rica y que es de obligado cumplimiento (ver [http:// www.senasa.go.cr](http://www.senasa.go.cr)).

3.3.3 Análisis estadístico

Para las variables emisión diaria de metano entérico, producción de leche, intensidad de emisiones por kilogramo de leche y por kilogramo de MS, fueron analizados por medio de un análisis de varianza. Se probaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Como los errores presentaron una distribución no normal, se usó un modelo lineal generalizado mixto con distribución Gamma y función de enlace logarítmica. Se consideraron como efectos fijos a los grupos raciales y las covariables días de lactancia y peso vivo del animal al momento del muestreo, y como aleatorio al efecto del animal. Se realizó la prueba de comparación de medias LSD de Fisher (Di Rienzo *et al.*, 2019; $p < 0,05$).

Se realizó un análisis de varianza usando modelos lineales generales y mixtos para evaluar el efecto de la raza y el periodo de lactancia sobre la variable FCM. La estructura de tratamientos estuvo dada por la combinación de los factores raza (con tres niveles: F1, Triple cruce y Jersey) y periodo de lactancia (con cuatro niveles: seca, <76 días, 76-150 y >150 días). El modelo incluyó los efectos fijos de los factores raza, periodo de lactancia y su interacción, y de la covariable consumo de MS, y el efecto aleatorio de cada animal. Debido a la presencia de heterogeneidad de varianzas entre periodos de la lactancia se modeló la estructura de la matriz de varianzas y covarianzas considerando una varianza diferente para cada nivel del periodo. Para la selección del mejor modelo se usaron los criterios de información Bayesiano (BIC) y Akaike (AIC). Las medias de tratamientos fueron evaluadas usando la prueba de comparación de medias DGC (Di Rienzo *et al.*, 2019; $p < 0,05$).

4. RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1 Emisiones de GEI en fincas productoras de leche

4.1.1 Características de los sistemas de producción de leche

En general las fincas productoras de leche se encuentran en un amplio rango de altitud, la alimentación está basada en pastos y concentrado (alimento balanceado) y las pasturas son fertilizadas con fórmula nitrogenada. Asimismo, presentan una carga animal y una producción de leche promedio media – alta (Tabla 14).

Existen diferencias marcadas ($p < 0,05$) entre los sistemas de producción de lechería especializada y doble propósito en términos de carga animal y producción de leche. Estas variables son mayores en el sistema de lechería especializada y es la respuesta a un mayor uso de insumos como concentrado y fertilizante nitrogenado. Asimismo, es importante mencionar que las fincas especializadas en leche se encuentran distribuidas en un amplio rango de altitud en comparación a las de doble propósito, las cuales la mayoría se encuentran por debajo de los 1.300 msnm. En lechería especializada predomina el uso de razas puras de leche (*Bos taurus*) y en las de doble propósito cruces de *Bos indicus* x *Bos taurus* (Tabla 14).

Tabla 14. Principales variables biofísicas, productivas y socioeconómicas en los sistemas de producción de leche en Costa Rica.

Variable	Lechería especializada (n=69)	Doble propósito (n=18)	Todas las fincas
Rango de altitud (msnm)	20 - 2.600	50 - 1.300	20 - 2.600
Área total (ha)	56,88 (6,37) a	57,17 (20,15) a	56,94 (6,49)
Área de pasturas (%)	52,68 (6,26) a	49,33 (20,31) a	51,99 (6,44)
Carga animal (UA/ha)	5,41 (0,55) a	2,55 (0,31) b	4,82 (0,45)
Uso de concentrado (tMS/ha/año)	7,56 (0,95) a	1,41 (0,42) b	6,29 (0,80)
Aplicación de fertilizante nitrogenado (kg N/ha/año)	113,67 (14,77) a	22,75 (8,84) b	94,86 (12,48)
Producción de leche (kg LCGP/vaca/día)	17,54 (0,55) a	7,67 (1,40) b	15,49 (0,68)
Producción de leche (kg LCGP/ha/año) *	17.096,97 (1.540,67) a	3.688,06 (1.814,11) b	14.322,71 (1.402,21)
Producción de carne (kg/ha/año) **	418,03 (54,99) a	203,94 (78,14) a	373,74 (47,26)
Genética predominante del ganado	Razas lecheras (<i>B. taurus</i>)	Cruces <i>B. indicus</i> x <i>B. taurus</i>	

LCGP: leche corregida por grasa y proteína. ** Peso vivo del ganado vendido en la finca. Medias con letras diferentes dentro de la fila presentan diferencia significativa según prueba de T ($p < 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

4.1.2 Fuentes de emisión de GEI y huella de carbono en los sistemas de producción de leche

A nivel de todas las fincas, las principales fuentes de emisión de GEI corresponden a la fermentación entérica y a los insumos externos a la finca con valores de 49,47 y 29,71% respectivamente. En la comparación entre sistemas de producción, se encontró diferencia significativa ($p < 0,05$) para las fuentes de emisión insumos externos, ganado comprado y fertilización nitrogenada, mientras las otras variables mostraron un comportamiento similar ($p > 0,05$). La emisión total anual por finca fue de 1.420,48 y 582,23 tCO_{2eq} para los sistemas lechería especializada y doble propósito respectivamente.

Con respecto a la huella de carbono para leche y carne, el valor promedio de todas fincas fue de 2,94 y 13,68 CO_{2eq}/ kg de producto respectivamente. A nivel de sistemas de producción hubo diferencia significativa para dichas variables ($p < 0,05$; Tabla 15).

Tabla 15. Fuentes de emisión de GEI y huella de carbono en los sistemas de producción de lechería especializada y doble propósito de Costa Rica.

Variable	Lechería especializada (n=69)	Doble propósito (n=18)	Todas las fincas
<i>Fuente de emisión GEI</i>			
Fermentación entérica (%)	49,82 (1,83) a	48,11 (3,29) a	49,47 (1,60)
Insumos externos* (%)	33,88 (2,30) a	13,74 (3,27) b	29,71 (2,13)
Manejo del estiércol (%)	13,35 (0,51) a	11,32 (0,83) a	12,93 (0,44)
Ganado comprado** (%)	1,33 (0,48) b	26,34 (4,67) a	6,51 (1,49)
Fertilización nitrogenada (%)	1,62 (0,19) a	0,49 (0,14) b	1,39 (0,16)
<i>Huella de carbono</i>			
Huella de carbono (kg CO _{2eq} / kg LCGP)****	2,28 (0,24) b	5,45 (0,59) a	2,94 (0,27)
Huella de carbono (kg CO _{2eq} / kg PV**** carne vendida)	11,06 (1,23) b	23,72 (3,79) a	13,68 (1,36)

*Incluye combustible, electricidad y la huella de carbono para la producción de los insumos importados en la finca. **Emisiones por el ganado comprado por la finca. ****LCGP: leche corregida por grasa y proteína. ****Peso vivo. Medias con letras diferentes dentro de la fila presentan diferencia significativa según prueba de T ($p < 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

4.1.3 Estructura del hato de fincas y emisiones de gases de efecto invernadero

En el análisis de todas las fincas, el grupo de vacas en ordeño aporta la mayor emisión GEI (emisiones procedentes de la fermentación entérica y del estiércol), seguido de las vacas secas, las novillas 1-2 años y las terneras. Las otras categorías registran el menor aporte de GEI, y generalmente son las menos frecuentes en las fincas ganaderas. Con respecto a los sistemas de producción, la tendencia de las emisiones por categoría de ganado es similar a la encontrada a nivel de todas las fincas. Las emisiones por categoría de ganado fueron significativamente diferentes entre los sistemas de producción ($p < 0,05$), excepto las categorías novillas 1-2 años y novillos. El sistema doble propósito tuvo el mayor valor, excepto para vacas en ordeño, en el caso de novillas 1-2 años y novillos fueron similares (Tabla 16).

Tabla 16. Contribución porcentual de las categorías de ganado en las emisiones de GEI de los sistemas de producción de leche de Costa Rica.

Categoría de ganado	Lechería especializada (n=69)	Doble propósito (n=18)	Todas las fincas
Vacas en ordeño	65,40 (1,29) a	38,95 (3,03) b	59,92 (1,66)
Vacas secas	11,63 (0,62) b	19,92 (1,60) a	13,35 (0,69)
Novillas > 2 años	1,93 (0,52) b	6,71 (1,14) a	2,92 (0,52)
Novillas 1-2 años	11,71 (0,67) a	10,18 (1,39) a	11,39 (0,60)
Terneras	7,45 (0,44) b	11,12 (0,87) a	8,21 (0,42)
Terneros	0,67 (0,20) b	8,07 (1,04) a	2,20 (0,42)
Novillos	0,62 (0,26) a	2,56 (1,41) a	1,02 (0,36)
Toros	0,60 (0,09) b	2,49 (0,26) a	0,96 (0,12)

Medias con letras diferentes dentro de la fila presentan diferencia significativa según prueba de T ($p < 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

Fue realizada una comparación de las emisiones de GEI para las distintas categorías de animales entre la estructura del hato actual y la sugerida como deseable para los sistemas de producción lechería especializada y doble propósito. En ambos escenarios las emisiones de GEI son mayores en vacas en ordeño y en vacas secas. En las otras categorías tiende a disminuir de manera lineal y ello tiene relación con la cantidad de ganado en cada una de ellas. En el escenario deseable las vacas en producción incrementaron la contribución de GEI, esto se debe a que se incrementó el porcentaje de vacas en ordeño en relación con el total de vacas de la finca (80% en lechería especializada y 75% en doble propósito). Las otras categorías presentaron una reducida emisión y se asocia al ajuste de la tasa de reemplazo no mayor del 20%. Aunque en el caso de novillas >2 años las emisiones fueron más altas en el escenario deseable en comparación al actual (Figura 7). Las emisiones anuales de GEI para el sistema de lechería especializada fue de 727,11 y 707,10 tCO_{2eq} /finca para el hato actual y el deseable respectivamente. Mientras, para el sistema de doble propósito fue de 291,64 y 254,89 tCO_{2eq} /finca para el hato actual y el deseable respectivamente. El ajuste de la estructura del hato significó una reducción de las emisiones de GEI por finca de 3% y 14% para el sistema lechería especializada y doble propósito respectivamente.

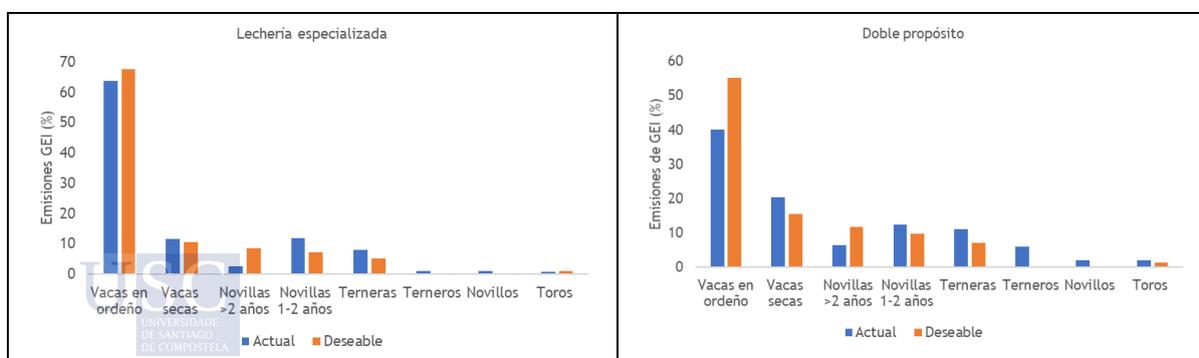


Figura 7. Contribución porcentual de las categorías de ganado en las emisiones de GEI en el escenario actual y el sugerido como deseable en fincas productoras de leche. Costa Rica.

4.1.4 Nivel de intensificación y emisiones de gases de efecto invernadero

El análisis clúster identificó tres grupos de fincas según el nivel de intensificación productiva, siendo este alto (11 fincas), medio (31 fincas) y bajo (45 fincas). Las variables altitud, carga animal, productividad de leche, uso de concentrado y fertilización nitrogenada influyeron de manera significativa ($p < 0,05$) en la conformación de los grupos o clúster de fincas (Tabla 17). La emisión total anual por finca fue de 1.216,61; 1.502,78; y 1.078,26 tCO_{2eq} para los grupos alto, medio y bajo nivel de intensificación.

Tabla 17. Variables que influyen en la conformación de los grupos de fincas según el nivel de intensificación.

Variable	Nivel de intensificación		
	Alto (n=11)	Medio (n=31)	Bajo (n=45)
Altitud (msnm)	1.437,36 (200,55) a	1.024,61 (119,46) ab	733,80 (99,15) b
Carga animal (UA/ha)	12,40 (0,86) a	5,32 (0,51) b	2,63 (0,43) c
Productividad de leche (kg/ha/año)	39.324,00 (2.148,97) a	17.714,55 (1.280,11) b	5.874,69 (1.062,48) c
Consumo de concentrado (tMS/ha/año)	17,47 (1,69) a	8,00 (1,01) b	2,37 (0,84) c
Fertilización nitrogenada (kg N/ha/año)	211,86 (29,05) a	141,66 (17,31) b	34,02 (14,36) c

Medias con letras diferentes dentro de la fila presentan diferencia significativa según prueba de LSD de Fisher ($p < 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

Con respecto a las fuentes de emisión de GEI en las fincas, los insumos externos y la fertilización nitrogenada fue mayor en las fincas con un nivel alto y medio de intensificación. Mientras, la emisión por ganado comprado fue mayor en las fincas con bajo nivel de intensificación ($p < 0,05$). La fermentación entérica y el manejo del estiércol fueron similares en los tres grupos de fincas ($p > 0,05$). En el caso de la huella de carbono de leche fue mayor en las fincas con bajo nivel de intensificación ($p < 0,05$) y la huella de carbono de carne no tuvo efecto del nivel de intensificación de las fincas ($p > 0,05$; Tabla 18).

Tabla 18. Indicadores de emisión según el nivel de intensificación productiva de las fincas productoras de leche de Costa Rica.

Variable	Nivel de intensificación		
	Alto (n=11)	Medio (n=31)	Bajo (n=45)
<i>Fuente de emisión GEI</i>			
Fermentación entérica (%)	47,20 (4,52) a	48,30 (2,69) a	50,83 (2,24) a
Insumos externos* (%)	34,92 (5,74) a	36,66 (3,42) a	23,65 (2,84) b
Manejo del estiércol (%)	13,01 (1,26) a	12,71 (0,75) a	13,06 (0,62) a
Ganado comprado** (%)	3,22 (3,93) ab	0,36 (2,34) b	11,54 (1,94) a
Fertilización nitrogenada (%)	1,65 (0,44) ab	1,97 (0,26) a	0,92 (0,22) b
<i>Huella de carbono</i>			

Leche (kg CO _{2eq} /kg LCPG)	1,93 (0,73) a	2,31 (0,43) a	3,61 (0,36) b
Carne (kg CO _{2eq} /kg PV carne vendida)	9,53 (3,76) a	11,20 (2,24) a	16,40 (1,86) a

Medias con letras diferentes dentro de la fila presentan diferencia significativa según prueba de Kruskal Wallis (p<0,05). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

Las variables de emisiones de GEI no mostraron una afinidad específica por el nivel de intensificación de las fincas. Por el contrario, las fincas de los tres niveles de intensificación se asociaron con las variables porcentaje de emisiones del metano entérico (ME%), porcentaje de emisiones del estiércol (Man%), porcentaje de las emisiones del fertilizante nitrogenado (Fert%), el porcentaje de emisiones de GEI de las vacas en ordeño (ETot%_VO) y emisiones de metano entérico de la finca (ME_Fca_tCO_{2e}). Los dos primeros componentes principales explicaron el 59.6 % de la variación de las observaciones (Figura 8).

Por otro lado, existe una fuerte correlación negativa entre las emisiones de GEI de las vacas en ordeño con las emisiones de las otras categorías de ganado en la finca (vacas secas: ETot%_VS; Novillas >2años: ETot%_Heifer>2; Terneras: ETot%_Fema; Terneros: ETot%_Male). Esto significa que conforme se mejora el porcentaje de vacas en ordeño en las fincas, las otras categorías disminuyen, y además, se reducen las emisiones de GEI. Este escenario es deseable para disminuir las emisiones de GEI a nivel de finca y a nivel de huella de carbono. También, se encontró una alta correlación positiva entre las variables porcentaje de emisiones de GEI del metano entérico y del estiércol, y entre la huella de carbono de leche (HC_milk) y de carne (HC_meat; Figura 8).

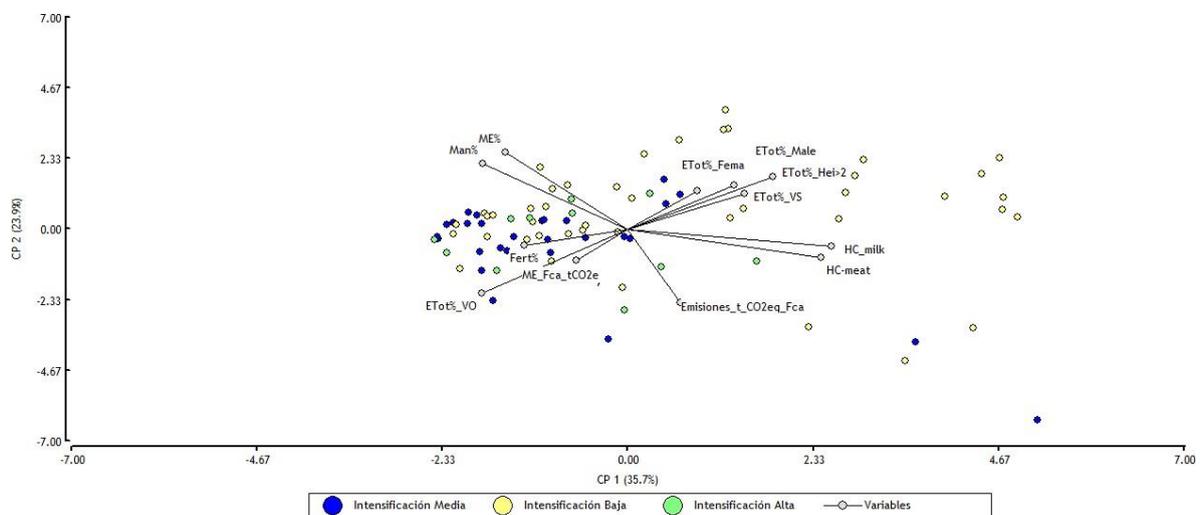


Figura 8. Análisis de componentes principales (bi-plot) para conocer las relaciones entre variables de emisiones de GEI y su afinidad con las fincas según nivel de intensificación.

ME%: porcentaje de emisiones del metano entérico; Man%: porcentaje de emisiones del estiércol; ETot%_VO: porcentaje de emisiones de GEI de las vacas en ordeño; Fert%: porcentaje de las emisiones del fertilizante nitrogenado; ME_Fca_tCO_{2e}: emisiones de metano entérico de la finca; ETot%_Heifer>2: porcentaje de emisiones de GEI de las novillas >2 años; ETot%_Fema: porcentaje de emisiones de GEI de las terneras; ETot%_Male: porcentaje de emisiones de GEI de los terneros.

4.2 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético

4.2.1 Emisión de metano entérico en vacas lecheras según grupo racial

Los grupos raciales de vacas, en estado secas y en las distintas fases de lactancia presentaron una emisión diaria de metano entérico que no tuvo diferencia estadística significativa ($p>0,05$). Las vacas cuando estuvieron secas (no lactantes) tuvieron la menor emisión de metano entérico. La emisión en los tres grupos raciales tendió a crecer en el primero y segundo periodo de lactancia (<76 días y 76-150 días). Las vacas con más proporción de genética *B. taurus* tuvieron una mayor emisión de metano entérico (Tabla 19).

Tabla 19. Emisiones diarias de metano entérico en vacas de diferente grupo racial durante el periodo de secado y en las distintas fases de lactancia.

Período	F1	Triple cruce	Jersey
Secado	202,96 (55,77) a	250,19 (43,99) a	267,44 (55,34) a
Lactancia			
< 76 días	232,74 (93,24) a	350,11 (80,24) a	410,30 (140,46) a
76-150 días	363,86 (56,02) a	385,24 (75,03) a	386,48 (100,43) a
> 150 días	224,77 (51,83) a	272,35 (51,37) a	222,53 (53,25) a
Promedio	274,49 (24,15) a	322,69 (29,49) a	297,77 (32,42) a

Medias con una letra común dentro de la fila no son significativamente diferentes según prueba de LSD de Fisher ($p>0,05$). Valor entre paréntesis representa el error estándar.

Con respecto a la emisión de metano entérico en los distintos períodos y anual no hubo diferencia significativa ($p>0,05$) entre grupos raciales. En el período de lactancia ocurrieron entre el 80 y 81% de las emisiones anuales de las vacas. La emisión anual varió entre 91 y 111 kg/vaca, siendo las vacas F1 las que presentaron el menor valor de emisión (Tabla 20).

Tabla 20. Emisión anual de metano entérico (kg) en vacas según el grupo racial.

Período	F1	Triple cruce	Jersey
Lactancia	73,97 (14,78) a	90,56 (21,29) a	88,69 (22,76) a
Secado	17,25 (2,00) a	21,27 (1,88) a	22,73 (2,85) a
Emisión anual	91,22 (12,78) a	111,82 (19,41) a	111,42 (19,90) a

Medias con una letra común dentro de la fila no son significativamente diferentes según prueba de LSD de Fisher ($p>0,05$). Valor entre paréntesis representa el error estándar.

4.2.2 Consumo de alimentos, producción de leche e intensidad de emisiones de metano entérico

Los grupos raciales no tuvieron efecto significativo ($p>0,05$) sobre el consumo de MS, producción de leche e intensidad de las emisiones por unidad de leche producida y unidad de MS consumida.

El consumo de MS total, solo pasto y la intensidad de emisiones de metano por unidad de MS consumida mostraron diferencia estadística significativa entre los estados fisiológico de secado y de lactancia de las vacas ($p<0,05$). El consumo de MS fue mayor en la etapa de lactancia, mientras la emisión de metano entérico por unidad de MS consumida fue mayor cuando las vacas estuvieron en el período de secado (Tabla 21).

Tabla 21. Consumo de alimento, producción de leche y emisiones de metano en vacas de distinto grupo racial durante los períodos de lactancia y secado.

Variables	Período de lactancia				Período de secado			
	F1	Triple cruce	Jersey	Promedio	F1	Triple cruce	Jersey	Promedio
Consumo total (%PV)	3,54 (0,17) a	3,71 (0,19) a	3,91 (0,17) a	3,69 (0,07) a	1,89 (0,11) a	1,86 (0,12) a	2,19 (0,12) a	2,02 (0,09) b
Consumo de pasto (%PV)	1,59 (0,01) a	1,56 (0,01) a	1,56 (0,01) a	1,57 (0,01) b	1,75 (0,03) a	1,75 (0,03) a	1,74 (0,03) a	1,75 (0,01) a
Producción de leche (kg/vaca/día)	18,19 (1,78) a	18,25 (1,93) a	17,77 (1,87) a	18,17 (0,57)				
Emisión de metano (g/kg de leche)	16,09 (4,41) a	17,38 (4,65) a	18,76 (5,71) a	16,95 (1,15)				
Emisión de metano (g/kg MS)	16,71 (4,05) a	19,84 (4,17) a	19,78 (5,54) a	17,82 (1,30) b	26,70 (7,57)	29,86 (6,4) a	27,08 (7,52) a	29,40 (1,87) a

Medias con una letra común dentro de la fila no son significativamente diferentes según prueba de LSD de Fisher ($p > 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

4.2.3 Eficiencia en el uso de la energía por vacas lecheras

Los grupos raciales mostraron diferencia significativa ($p < 0,05$) para el período seco, no así para los periodos de lactancia ($p > 0,05$; Tabla 22). Cuando las vacas están secas son menos eficientes en el uso de la energía ya que presentaron un mayor FCM. El FCM varió según el periodo de lactancia en las vacas, fue menor en el periodo < 76 días, se incrementó en el periodo 76-150 días y tendió a bajar de nuevo en el periodo final de la lactancia (> 150 días). En el promedio anual las vacas con mayor proporción de la genética *Bos taurus* presentaron un mayor FCM.

Tabla 22. Factor de conversión de metano entérico (%) en vacas de diferente grupo racial durante el periodo de secado y en las distintas fases de lactancia.

Período	F1	Triple cruce	Jersey
Secado	6,9 (1,22) b	9,87 (1,37) a	10,28 (1,3) a
Lactancia			
< 76 días	4,44 (0,91) a	6,25 (0,98) a	7,25 (1,27) a
76-150 días	7,11 (1,04) a	7,20 (1,51) a	6,91 (1,63) a
> 150 días	5,14 (0,72) a	5,55 (0,84) a	3,79 (0,79) a
Promedio	5,90 (0,58) a	7,22 (0,69) a	7,05 (0,73) a

Medias con una letra dentro de la fila no son significativamente diferentes según prueba de LSD de Fisher ($p > 0,05$). Valor entre paréntesis representa al error estándar.

5. DISCUSIÓN

5. DISCUSIÓN

5.1 Emisiones de GEI en fincas productoras de leche

5.1.1 Caracterización de las fincas

En Costa Rica las fincas dedicadas a la producción de leche pertenecen a dos sistemas de producción, las especializadas en leche y las de doble propósito. El primer sistema tiene como objetivo principal la producción de leche usando razas especializadas, se concentran en un mayor rango de altitud (20 – 2.600 msnm), dependen de cantidades importantes de insumos externos para su funcionamiento como concentrados (alimento balanceado) y fertilizantes nitrogenados. Esto les permite manejar una carga animal de 5,41 UA/ha y obtener una productividad de leche de 17.096 kg LCGP/ha/año. En cambio, las fincas de doble propósito tienen como productos principales la leche y la carne de los terneros y terneras (descarte) al destete que ocurre alrededor de los 8-9 meses. En algunos casos, y generalmente en fincas grandes pueden ser engordados y vendidos a media ceba (350 kg PV) o ceba completa (450-500 kg PV). Estas fincas se localizan en altitudes menores a los 1.300 msnm, tienen un bajo uso de insumos externos como concentrados y fertilizantes químicos. Bajo dichas condiciones utilizan una carga animal de 2,55 UA/ha y alcanzan una productividad de leche de 3.688 kg LCGP/ha/año; ambos indicadores mucho menores que las especializadas en leche debido al bajo nivel de innovación tecnológica. Este sistema de producción tiene potencial para mejorar la productividad animal y con ello los ingresos, este enfoque de intensificación podría significar la reducción del área ganadera e incluso el tamaño del hato.

Vargas Leitón *et al.* (2013) reportaron un patrón de distribución de las fincas con lechería especializada y con doble propósito en los distintos rangos altitudinales similar a lo encontrado en el presente estudio. En el mismo sentido, los autores anteriores encontraron que las razas lecheras, la carga animal y el uso de concentrado tiende a ser superior en las fincas de lechería que presentan un manejo con mayor intensificación. Vargas y Ulloa (2008) en un estudio sobre la relación de las curvas de lactancia en grupos raciales lecheros de distintas zonas agroecológicas de Costa Rica, encontraron que la mayor producción de leche estuvo asociada a una mayor altitud (zonas templadas) y con razas de leche *Bos taurus*. Los sistemas doble propósito han presentado una variabilidad en el ingreso por la venta de leche, eso tiene relación con la dinámica de la demanda y precios de leche y carne en los mercados y es parte de la flexibilidad de dichos sistemas de ajustarse según las tendencias del mercado. En ese sentido, Letelier (2018) identificó en Costa Rica tres modalidades de sistemas de producción bovina doble propósito según el aporte en el ingreso total por la venta de leche: en el primero entre 1 y 39%; en el segundo entre 40 y 59%; y en el tercero entre 60 y 89%.

En Nueva Zelanda se reportó una productividad de leche promedio de 13.363 kg LCGP, la cual es similar a la encontrada en las fincas productoras de leche de Costa Rica. Sin embargo, el estudio de Nueva Zelanda registró menores consumos de alimentos balanceados y

fertilizantes nitrogenados, lo cual significa que la operación productiva tiene una base mayor en las pasturas y así incidir en una mayor competitividad de la actividad (Ledgard *et al.*, 2020).

5.1.2 Emisiones de GEI según sistemas de producción e intensificación productiva

La huella de carbono de leche y carne varió entre 2,28 y 5,45 kg CO_{2eq}/kg LCGP y 11,06 y 23,72 kg CO_{2eq}/kg PV de carne vendida respectivamente. Lo valores menores tienen relación con una mayor productividad animal en la finca. También, en la calidad de la dieta que es mayor en sistemas de producción de lechería especializada, la cual está basada en pasturas y mayor consumo de concentrado. Las pasturas son fertilizadas y manejadas bajo un sistema de pastoreo rotacional que incluyen un período corto de ocupación entre 1 y 2 días. En las fincas productoras de leche, en muchos de los casos realizan la asignación de todas las emisiones de GEI a la producción de leche (Gaitán *et al.*, 2016; de Léis *et al.*, 2015). En fincas de lechería especializada y en las de doble propósito, tal como lo indica IDF (2015) y Rice *et al.* (2017) se debe de distribuir la carga de emisiones de GEI según la proporción que corresponda a cada producto de acuerdo con el método utilizado sea energía, masa o criterio económico. En la metodología de ACV la partición de la carga ambiental (por ejemplo, las emisiones de GEI) en los productos leche y carne debe ser incluida para identificar los puntos críticos de las emisiones y las potenciales buenas prácticas de mitigación. Además, esto permitiría una mejor comparación entre los diferentes estudios.

En un estudio similar en la ganadería de doble propósito de Colombia, se encontró una huella de carbono para leche y carne de 3,3 kg CO_{2eq}/kg LCGP y 10,5 kg CO_{2eq}/kg de PV de carne vendida respectivamente, dicha huella de carbono es menor que la encontrada en el presente trabajo para el sistema doble propósito. En Colombia este sistema de producción presenta una carga animal, producción de leche e insumos externos (por ejemplo, consumo de concentrado y fertilizante nitrogenado) mucho menor que las fincas de Costa Rica y eso podría estar incidiendo en la diferencia de la huella de carbono (González *et al.*, 2020).

En varios estudios en el sistema de lechería especializada, con un enfoque similar de ACV, fue encontrada una huella de carbono menor que la registrada en el presente estudio, esta varió entre 0,78 a 1,26 kg CO_{2eq}/kg LCGP (Ledgard *et al.*, 2020; Naranjo *et al.*, 2020; Bava *et al.*, 2014). Estos resultados son menores, y posiblemente tengan relación con una alta productividad de leche, calidad de la dieta constante durante el año y menos uso de insumos externos. Una mayor intensificación productiva de las fincas de leche pretende lograr una mayor productividad animal y una menor huella de carbono, este efecto significa un mejor manejo de la pastura, planes de fertilización de los pastos según requerimientos, selección de ganado con mayor producción, buen manejo reproductivo para lograr una mejor relación de vaca ordeño -vaca total y un efectivo manejo de los reemplazos en la finca. O'Brien *et al.* (2015) encontraron que conforme aumentó la intensificación productiva de la finca se redujo la huella de carbono y se incrementó el ingreso. Estos autores sugieren que la clave para incrementar el desempeño económico y la reducción de la huella de carbono es el aumento

en el uso de pastoreo y de la producción anual de leche por hectárea y por vaca. Este enfoque permitirá mejorar la sostenibilidad de las fincas lecheras. En el mismo orden Gerber *et al.* (2011) encontraron que conforme aumenta la producción de leche por lactancia por vaca, la huella de carbono tiende a disminuir. Por ejemplo, cuando la producción supera los 4.000 kg por lactancia, la huella de carbono es menor a 2 kg CO_{2eq}/ kg LCGP.

En las fincas productoras de leche la principal fuente de emisión de GEI es la fermentación entérica, la cual influye en la huella de carbono para leche y carne. Esta tendencia es reportada por varios estudios realizados en diferentes partes del mundo, quienes destacaron que el metano entérico tiene la mayor contribución en la huella de carbono de leche que varía entre 37 y 68% (Bava *et al.*, 2014; O'Brien *et al.*, 2015; Woldegebriel *et al.*, 2017; Ledgard *et al.*, 2020). A partir de un meta-análisis considerando varios estudios en América Latina y el Caribe fueron identificadas varias estrategias que reducen el metano entérico y paralelamente mejoran la producción de leche o la ganancia de peso vivo, tales como la composición genética, pastoreo rotacional y el incremento en la concentración de proteína en la dieta (de Souza Congio *et al.*, 2021).

Diversos estudios demostraron que la separación de las fincas según el nivel de intensificación se debió a las variables como carga animal, cantidad de concentrado y fertilizante usado, y producción de leche. Las fincas con mayor nivel de intensificación presentaron una menor huella de carbono de leche y de carne (Bava *et al.*, 2014; González *et al.*, 2020; Ledgard *et al.*, 2020; González *et al.*, 2021). Asimismo, otras investigaciones encontraron una alta correlación entre la huella de carbono de leche y de carne (González *et al.*, 2020; González *et al.*, 2021), esa tendencia también fue similar a la presente investigación. En otro trabajo Casey y Holden (2005) registraron una correlación positiva entre la carga animal y la intensidad de emisiones de CO_{2eq}/ha, pero no fue los mismo entre la carga animal y la intensidad de emisiones por kilogramo de leche.

5.1.3 Estructura del hato y relación con emisiones de GEI

Las fincas que cuentan con un buen manejo de la estructura del hato tendrán entre 75 y 80% de las vacas totales en producción (Castro Calderón *et al.*, 2021). Esa relación influye para que las vacas en producción presenten la mayor emisión de GEI en fincas ganaderas. En aquellas con lechería especializada fue mayor que el 50% y en las de doble propósito fue menor a dicho porcentaje; esta diferencia podría tener relación con el número de vacas en ordeño (77 vs 63%). Con respecto al tema de emisiones de GEI según las categorías de ganado en las fincas, existen pocos estudios. Por ejemplo, Mazzetto *et al.* (2015) encontraron que en las fincas de carne con distintos niveles de intensificación las vacas en ordeño presentaron más del 50% de las emisiones de las unidades ganaderas.

Las fincas requieren ajustar la estructura del hato para reducir la presencia de animales improductivos y evitar el excedente de animales en algunas categorías. Un hato con una proporción alta de animales jóvenes emite más metano y fosforo a través de las excretas en el

ambiente por unidad de leche en comparación con un hato con una mayor proporción de vacas multíparas. El ajuste de la estructura del hato puede contribuir con una mayor eficiencia económica de la finca y una menor emisión de metano a nivel de finca y por unidad de producto (Hristov *et al.*, 2013).

Una óptima estructura del hato tiene que responder con mejores indicadores socioeconómicos y con el menor impacto ambiental. Esto último en términos de emisiones de GEI, acidificación, eutroficación y uso de energía. El manejo del hato es parte del conjunto de herramientas, dentro del enfoque de la intensificación sostenible de la producción ganadera, con potencial para reducir las emisiones de GEI a nivel global y por unidad de producto. En varios países del mundo existe una brecha importante entre la producción actual y la potencial de los sistemas de producción bovina. Esto significa que existe una oportunidad de innovación de las fincas para cubrir la demanda de los mercados con productos de mejor calidad y sin el crecimiento del hato y del área dedicada a la ganadería. Definitivamente, estos cuestionamientos tendrán que ser respondidos por medio de las investigaciones en curso en el corto plazo.

Por otro lado, los sistemas de producción ganadera aparte de implementar acciones para reducir emisiones de GEI, tienen la ventaja de compensar sus emisiones por medio de la remoción de carbono a través de la gestión del suelo y de la cobertura arbórea (por ejemplo, sistemas silvopastoriles y bosques; Stanley *et al.*, 2018; Cárdenas *et al.*, 2019). El potencial de remoción de carbono dependerá de la zona agroecológica, la diversidad y densidad de árboles en los sistemas silvopastoriles, del área de bosques en la finca y del manejo silvicultural, entre otras.

5.2 Emisión de metano entérico en vacas lecheras con diferente perfil genético

5.2.1 Emisión de metano entérico en vacas lecheras

En las emisiones diarias de metano entérico no hubo un efecto marcado de la genética, no obstante, las vacas con mayor genética *Bos taurus* (Jersey) mostraron el mayor valor numérico de emisiones cuando estuvieron en fase seca y en los distintos periodos de lactancia. Dicha tendencia podría estar explicada por el factor de conversión de metano que fue mayor en dicho perfil genético como se observa en la Tabla 22. Dos Santos Pedreira *et al.* (2009) en un estudio con vacas puras Holstein y vacas Holstein x Gyr (F1), encontró un patrón similar al presente estudio, ya que las vacas de raza pura tuvieron una mayor emisión de metano entérico cuando estuvieron secas como en el periodo de lactancia. Las vacas cuando estuvieron secas emitieron 261 y 238 g de metano entérico por día, mientras que en el período de lactancia fue de 403 y 296 g de metano entérico por día para la raza Holstein y Holstein x Gyr respectivamente. La raza pura duplicó la producción de leche y eso influyó en una mayor diferencia en la emisión de metano entérico.

Diferentes estudios han encontrado que la emisión de metano entérico está relacionada con el consumo de MS, en donde los mayores consumos se logran en el periodo de mayor producción de leche (Grainger *et al.*, 2007; Muñoz *et al.*, 2015; Montenegro *et al.*, 2020). Existen evidencias que el consumo residual es una manera indirecta de reducir el metano entérico, esto debido a la reducción en el consumo y mejoramiento en la conversión alimenticia. Esta condición funcional del ganado puede reducir el metano entérico entre 15-25% y presenta una heredabilidad y repetibilidad moderada en ganado de leche y carne (Basarab *et al.*, 2013). Actualmente existe mucho interés en estudios más profundos para identificar individuos dentro de las razas con la característica funcional de menor emisión de metano entérico. Además, de los rasgos con potencial para la predicción de las emisiones de dicho gas tales como consumo de alimento, eficiencia alimenticia (consumo residual de alimento) y balance de energía (Manzanilla-Pech *et al.*, 2020).

La emisión anual de metano entérico varió entre 91 y 112 kg/vaca, la cual fue 22% superior en vacas con mayor proporción de genética *Bos taurus*. Dicha tendencia podría tener relación con el mayor consumo de MS. Las emisiones encontradas son mayores a la que recomienda el IPCC (2006) en el nivel 1 para vacas en producción para la región de América Latina y el Caribe que es de 63 kg/animal/año⁻¹. La mayor emisión y producción de leche por vaca encontrada en el presente estudio es similar a la que se recomienda para Europa Occidental para vacas con una producción de 6.000 kg/año. Los resultados de emisiones muestran una brecha importante entre lo encontrado con un nivel 2 y el nivel 1 por defecto. Wilkes *et al.* (2017) argumenta que, si los países quieren monitorear la relación de la productividad y emisiones de GEI con las mejoras implementadas en las fincas, se requiere del uso de los niveles 2 o 3. Ello significa la generación de factores de emisión locales o establecer un sistema de gestión de la información en fincas representativas del sector para aplicar el nivel 2 recomendado por IPCC (2006).

5.2.2 Intensidad de emisiones de metano entérico

La intensidad de emisiones por kilogramo de leche producido, a pesar de que no hubo diferencia estadística, tendió a reducirse conforme disminuyó la genética *Bos taurus* con 7% y 14% para las vacas Triple cruce y F1 respectivamente. La poca diferencia se debe a las menores emisiones de metano entérico en las vacas F1 en comparación a aquellas con mayor genética europea. La producción de leche por lactancia de los tres grupos raciales fue similar 5.041, 5.055 y 5.313 kg para Jersey, F1 y Triple cruce respectivamente.

En otros estudios la intensidad de emisiones fue superior con valores que variaron entre 34 y 36 g CH₄/kg de leche (Muñoz *et al.*, 2015). En dicho estudio vacas de raza Holstein Friesian estuvieron produciendo menos de 15 kg/día en el período de lactancia tardía (253±18 días) y eso influyó en una mayor intensidad de emisiones. Similar situación se encontró en el estudio de Van Wyngaard *et al.* (2018), quienes encontraron valores que variaron entre 21,1 y 35,5 g CH₄/kg en vacas Jersey, que presentaron una producción de leche entre 9,1 y 18,2 kg día⁻¹ en una edad de lactancia de 99±18 días.

La intensidad de emisiones es un indicador de eficiencia productiva, que refleja la maximización de la energía que consume el ganado en producción de leche o carne o un menor factor de conversión de energía bruta a metano entérico. Poore y Nemecek (2018) señalan de que ya existen comunidades interesadas en reconocer el esfuerzo de los productores por ofertar productos con huella de carbono neutra o positiva. Dicha tendencia, en el corto y mediano plazo podría ser un criterio para que los productos ganaderos logren una mejor posición en los mercados.

Sin embargo, existen estudios en los cuáles se demuestra que una menor intensidad de emisiones por producto no asegura una reducción al calentamiento global o el aporte a las metas de reducción de emisiones absolutas. Sharma (2020) señala que el sector lechero en el mundo en el período 2005-2015 tuvo una reducción de emisiones por litro del 11%, pero las emisiones absolutas aumentaron un 18% en el mismo período. Esto se debe a que las grandes empresas lácteas en el mundo aumentaron sus operaciones y el número de animales. Esta situación no refleja un impacto positivo en la reducción de GEI por la actividad ganadera. La reducción absoluta de metano y de los otros GEI del sector ganadero implican una serie de retos que inician con el consumo responsable y la intensificación sostenible para lograr una mayor producción por unidad de superficie. Esto último podría motivar a la reducción del tamaño del hato y del área destinada a la ganadería o al menos a mantener el área actual. Cassandro *et al.* (2013) y Garnsworthy (2018) argumentan que las fincas tienen potencial de optimizar la estructura del hato para una mayor rentabilidad y menores emisiones de metano entérico, esto tiene relación con la mejora de los factores como producción de leche por vaca, eficiencia en el uso de la energía, indicadores reproductivos y el manejo de los reemplazos necesarios en la explotación.

En el sub-sector ganadería, Brasil es el pionero mundial en lanzar al mercado carne carbono neutro. Para lograr dicha meta las fincas ganaderas establecen sistemas silvopastoriles o agrosilvopastoriles, en donde las especies predominantes son el pasto *Urochloa brizantha* y la especie maderable eucalipto (*Eucalyptus* spp; Villa Alves *et al.*, 2015). Actualmente otros países como Australia y Nueva Zelanda han lanzado un plan para lograr productos ganaderos carbono neutro en el 2030 y 2050 respectivamente. En ambos casos la estrategia principal es la gestión de la cobertura arbórea para compensar las emisiones de GEI (Case y Ryan 2020; MLA, 2020). En estos países están reconociendo la importancia del carbono como parte de la estrategia de comercialización en el marco de la producción de alimentos cultivados de manera sostenible.

5.2.3 Eficiencia en el uso de la energía por vacas lecheras

En general, en la fase de lactancia las vacas de las distintas razas presentan un mayor FCM en los primeros dos tercios y luego disminuye en el tercio final. Es posible que esta tendencia tenga relación con un mayor consumo de MS que ocurre en los primeros dos tercios de la lactancia. Sin embargo, en los grupos raciales el FCM es mayor en la época seca que en la fase de lactancia, lo cual tiene relación con la calidad de alimento que consumen las vacas en

el periodo de lactancia. Muñoz *et al.* (2015) y Montenegro *et al.* (2020) encontraron valores de FCM que variaron según el orden entre 6,2-8,1 y 6,6-7,5, los menores valores se presentaron cuando las vacas recibieron una mayor suplementación con alimento balanceado. La diferencia podría estar influida por el menor contenido de fibra detergente neutro del alimento balanceado del segundo estudio.

El FCM ajustado por año fue diferente entre los grupos raciales, las vacas F1 presentaron un valor 19% y 22% menor que las vacas Jersey y Triple cruce respectivamente. El FCM más bajo fue presentado por las vacas F1, el cual es menor que lo sugerido por el IPCC (2006) que es de 6,5 para las categorías de ganado lechero o sea una diferencia del 10%. Los otros grupos raciales Jersey y Triple cruce mostraron un FCM 7,05 y 7,22 respectivamente, ambos mayores que la referencia del IPCC. Lo anterior significa que se deben de ajustar los FCM según la fase seca y de lactancia de las vacas, la genética del ganado y la calidad de la dieta que reciben. Asimismo, Montanholi *et al.* (2010) argumentan que en las regiones tropicales el ganado *Bos taurus* estará expuesto a un mayor estrés calórico, lo cual provocará una mayor secreción de la hormona cortisol que afecta la eficiencia metabólica del ganado. Dicha condición de estrés significa un mayor consumo residual de alimento y en consecuencia un incremento en la emisión de metano entérico.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se presentan las conclusiones siguientes:

1. La fermentación entérica fue la principal fuente de emisión de GEI en las fincas con un aporte cercano al 50%, que junto a la emisión del manejo del estiércol fueron similares entre fincas. Las fincas con mayor nivel de intensificación productiva (sistema lechería especializada) presentaron las menores huellas de carbono de leche y tuvieron mayores emisiones por el uso de insumos externos y fertilizantes nitrogenados que las fincas con bajo nivel de intensificación (principalmente sistemas doble propósito).
2. Los ajustes en la estructura del hato, como un mayor porcentaje de vacas en ordeño (75-80%) y tasa de reemplazo del 20% tuvieron un impacto significativo en la reducción de las emisiones de GEI por finca en términos del 3% y 14% para los sistemas de lechería especializada y doble propósito respectivamente.
3. En sistemas de producción de leche de trópico húmedo, las vacas F1 mostraron una menor emisión de metano entérico (diaria y anual) en comparación a las vacas con mayor genética europea (*Bos taurus*). El mismo patrón se encontró con el FCM. Vacas F1 constituyen una opción para la producción de leche con bajas emisiones de carbono en zonas de trópico húmedo; asimismo, estos sistemas de producción podrían tener una mayor resiliencia al cambio climático y oportunidades para mejorar la competitividad de la actividad productiva.
4. Las vacas lecheras presentaron una emisión de metano entérico y del FCM diferente entre el periodo de lactancia y seco. Además, ambos indicadores cambiaron a lo largo del periodo de lactancia. Este comportamiento tuvo relación con el consumo y calidad de la MS de la dieta de las vacas. Este tipo de consideraciones contribuirá en una mejor estimación de metano entérico en vacas lecheras (diaria o anual).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A., Valdés, A. 2014. Situación y perspectiva del sector ganadero en Centroamérica. In Acosta, A; Díaz, T (eds.). *Lineamientos de política para el desarrollo sostenible del sector ganadero*. Roma, Italia, FAO. p. 3-22.
- Amézquita, M.C., Amézquita, E., Casasola, F., Ramirez, B.L., Giraldo, H., Gomez, M.E., Llanderal, T., Velásquez, J., Ibrahim, M. 2008. C stocks and sequestration. 49-68p. In: Mannetje, L; Amézquita, MC; Buurman, P; Ibrahim, M. (Eds). *Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems*. Wageningen Academic Publisher, Países Bajos.
- Arguedas Acuña, F., Hernández Chavez, M., Abarca Monge, S., Soto Blanco, R. 2019. Adicionalidad de carbono orgánico del suelo en pasto cayman bajo pastoreo racional voisin. Disponible en: http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/180/166 (Accesado: 20 dic. 2020).
- Bava, L., Sandrucci, A., Zucali, M., Guercei, M., Tamburini, A. 2014. How can farming intensification affect the environmental impact of milk production? *J. Dairy Sci.* 97 :4579–4593. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7530>.
- Baptista Demski, J., Arcaro Junior, I., de Andrade Gimenes, FM., Macedo de Toledo, L., Santos de Miranda, M., Aparecida Giacomini, A., Aguiar da Silva, G. 2019. Production and ingestive behavior of cows grazing on Marandu and Mulato II pastures under rotational stocking. *R. Bras. Zootec.* 48:e20180231. <https://doi.org/10.1590/rbz4820180231>.
- Basarab, J.A., Beauchemin, K.A., Baron, V.S., Ominski, K.H., Guan, L.L., Miller, S.P., Crowley, J.J. 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal* 7:303-315. doi: [10.1017/S1751731113000888](https://doi.org/10.1017/S1751731113000888).
- Berndt, A., Boland, T.M., Deighton, M.H., Gere, J.I., Grainger, C., Hegarty, R.S., Iwaasa, A.D., Koolgaard, J.P., Lassey, K.R., Luo, D., Martin, R.J., Martin, C., Moate, P.J., Molano, G., Pinares-Patiño, C., Ribaux, B.E., Swainson, N.M., Waghorn, G.C., Williams, S.R.O. 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. Ed. MG Lambert. New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre, New Zealand. 166 p.
- Cárdenas, A., Moliner, A., Hontoria, C.H., Ibrahim, M. 2019. Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforest Syst.* 93:229-239. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0234-6>.

- Casasola, F., Villanueva, C. 2015. Buenas prácticas para la mitigación al cambio climático de los sistemas de producción de leche en Costa Rica (Editores). Turrialba, CR. CATIE. 130 p. (Serie técnica. Manual técnico No. 133).
- Cassandro, M., Mele, M., Stefanon, B. 2013. Genetic aspects of enteric methane emission in livestock ruminants. *Ital. J. Anim Sci.* 12:450-458. DOI: 10.4081/ijas.2013.e73.
- Case, B., Ryan, C. 2020. An analysis of carbon stocks and net carbon position for New Zealand sheep and beef farmland. Department of Applied Ecology, School of Science, Auckland University of Technology. 29 p.
- Casey, J.W., Holden, N.M. 2005. The relationship between greenhouse gas emissions and the intensity of milk production in Ireland. *J. Environ. Qual.* 34:429-436. DOI: 10.2134/jeq2005.0429.
- Castro Calderón, M.V., Elizondo Salazar, J.A. 2021. Establecimiento de tres indicadores de eficiencia en el uso de agua para lavado en instalaciones lecheras en Zarcero, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 45(1):153-163. DOI 10.15517/RAC.V45I1.45745.
- CNPL (Cámara Nacional de Productores de Leche, CR). 2019. Estadísticas Nacionales de Comercio de Leche. Disponible en: <http://proleche.com/comercio-internacional/> (Accesado: 15 dic. 2020).
- COMEX (Ministerio de Comercio Exterior de Costa Rica, CR). 2003. Tratado de Libre Comercio entre Centroamérica y los Estados Unidos: Principales resultados y logros. San José, Costa Rica. 12 p.
- de L'éis, C.M., Cherubini, E., Ruviaro, C.F., Prudencio da Silva, V., do Nascimento Lampert, V., Spies, A., Soares, S.R. 2015. Carbon footprint of milk production in Brazil: a comparative case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20:46-60. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0813-3>.
- De Souza, K.F.D., Detlefsen, G., De Melo Virginio Filho, E., Tobar, D., Casanoves, F. 2015. Timber yield from smallholder agroforestry systems in Nicaragua and Honduras. *Agroforest. Syst.* 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9846-2>.
- de Souza Congio, G.F., Bannink, A., Mayorga Mogollón, O.L. 2021. Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production* 312:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en <http://www.infostat.com.ar> (Accesado: 2 ago. 2020).

- Dos Santos Pedreira, M., Primavesi, O., Lima, M.A., Frighetto, R., de Oliveira, S.M., Berchielli, T.T. 2009. RUMINAL METHANE EMISSION BY DAIRY CATTLE IN SOUTHEAST BRAZIL. *Sci. Agric.* 66(6):742-750.
- Durlinger, B., Tyszler, M., Scholten, J., Broekema, R., Blonk, H. 2014. Agri-footprint; a life cycle inventory database covering food and feed production and processing. Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014), San Francisco, California, USA, 8–10 October, 2014. American Center for Life Cycle Assessment, pp. 310–317.
- Eckard, R.J., Grainger, C., de Klein, C.A. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science* 130:47-56. <http://doi:10.1016/j.livsci.2010.02.010>.
- Esquivel, H. 2007. Tree resources in traditional silvopastoral systems and their impact on productivity and nutritive value of pastures in the dry tropics of Costa Rica. PhD Thesis, CATIE, Turrialba, CR. 161 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, IT). 2019. FAOSTAT. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA> (Accesado: 20 jun. 2020).
- Fukumoto, N.M., Damasceno, J.L., Deresz, F., Martins, C.E., Cóser, A.C., dos Santos, G.T. 2010. Produção e composição do leite, consumo de matéria seca e taxa de lotação em pastagens de gramíneas tropicais manejadas sob lotação rotacionada. *R. Bras. Zoot.* 39(7):1548-1557. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000700022>.
- Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., Nayak, D.R. 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254:117-129. DOI: 10.1016/j.agee.2017.11.032.
- Gaitan, L., Laderach, P., Graefe, S., Rao, I., van der Hoek, R. 2016. Climate-Smart Livestock Systems: An Assessment of Carbon Stocks and GHG Emissions in Nicaragua. *PLoS One* 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167949>.
- Garnsworthy, P.C. 2018. Reducing the environmental impact of animal production. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 26:1-6.
- Gavrilova, O., Leip, A., Dong, H., MacDonald, J.D., Gomez Bravo, C.A., Amon, B., Barahona-Rosales, R., Del Prado, A., Oyhantçabal, W., Van Der Weerden, T.J., Widiawati, Y. 2019. Emissions from livestock and manure management. 2019 Refinement to the 2006 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. vol. 4. IPCC, Geneve (Cap. 10).

- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., Steinfeld, H. 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science* 139:100-108. <http://doi:10.1016/j.livsci.2011.03.012>.
- Gerber, P.J., Hristov, A.N., Henderson, B., Makkar, H., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, T., Yang, W.Z., Tricarico, JM., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J., Oosting, S. 2013. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal* 7:220-234. <http://doi:10.1017/S1751731113000876>.
- González-Quintero, R., Kristensen, T., Sánchez-Pinzón, M.S., Bolívar-Vergara, D.M., Chirinda, N., Arango, J., Pantevez, H., Barahona-Rosales, R., Knudsen, M.T. 2020. Carbon footprint, non-renewable energy and land use of dual-purpose cattle systems in Colombia using a life cycle assessment approach. *Livest. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104330>.
- González-Quintero, R., Bolívar-Vergara, D.M., Chirinda, N., Arango, J., Pantevez, H., Barahona-Rosales, R., Sánchez-Pinzón, M.S. 2021. Environmental impact of primary beef production chain in Colombia: Carbon footprint, non-renewable energy and land use using *Life Cycle Assessment*. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145573>.
- Grainger, C., Clarke, T., McGinn, S.M., Auldist, M.J., Beauchemin, K.A., Hannah, M.C., Waghorn, G.C., Clark, H., Eckard, R.J. 2007. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF6) tracer and chamber techniques. *J. Dairy Sci.* 90:2755–2766. doi: 10.3168/jds.2006-697.
- Holdridge, L. 1989. Ecología basada en zonas de vida, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José, Costa Rica. 96 p.
- Hristov, A.N., Ott, T., Tricarico, J., Rotz, A., Waghorn, G., Adesogan, A., Dijkstra, J., Montes, F., Oh, J., Kebreab, E., Oosting, S.J., Gerber, P.J., Henderson, B., Makkar, H.P.S., Firkins, J.L. 2013. Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91:5095–5113. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6585>.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR). 2020. Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Décima Edición. San José, Costa Rica. 7 p. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/factoresemission/factoresemission2020/offline/FactoresEmision-GEI-2020.pdf> (Accesado: 2 ene. 2021).
- Ibrahim, M., Guerra, L., Casasola, F., Neely, N. 2010. Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits. In: M Abberton; R Conant; C Batello. Eds. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the workshop on the role of grassland carbon sequestration

in the mitigation of climate change. Integrated Crop Management, Vol. 11. FAO, Rome, Italy. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/013/i1880e/i1880e09.pdf> (Accesado: 5 jun. 2020).

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, CR). 2019. Encuesta Nacional Agropecuaria 2017. Resultados generales de las actividades ganaderas vacuna y porcina. San José, CR. 48 p. Consultado 20 set. 2019 Disponible en: <http://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/reena2017.pdf> (Accesado: 10 may. 2020).

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, CR). 2015. Censo Agropecuario 2014. San José, CR. 146 p. Consultado 15 set. 2019 Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/U40-10581.pdf> (Accesado: 12 May. 2020).

IDF (International Dairy Federation, BE). 2015. Bulletin of the International Dairy Federation 479/2015. A common carbon footprint approach for the dairy sector. 63 p. Disponible en: <http://www.fil-idf.org/EventsCalendar.htm> (Accesado: 20 ene. 2021).

Iñamagua Uyaguari, J.P., Jenet, A., Alarcon Guerra, L.G., Vilchez Mendoza, S.J., Casasola Coto, F., Wattiaux, M.A. 2016. Impactos económicos y ambientales de las estrategias de alimentación en lecherías de Costa Rica. *Agron. Mesoam.* 27(1):1-17. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v27i1.21874>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, US). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Vol. 4-1, IGES, Japan. 49 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, US). 2014. Fifth Assessment Report (AR5). Synthesis Report (SYR), Climate Change 2014. In: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, US). 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland. Consultado 10 feb. 2021. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

Jiao, H.P., Dale, A.J., Carson, A.F., Murray, S., Gordon, A.W., Ferris, C.P. 2014. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:7043–7053. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-7979>.

Johnson K.A., Johnson D.E. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science* 73:2483–2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>.

- Ledgard, S.F., Falconer, S.J., Abercrombie, R., Philip, G., Hill, J.P. 2020. Temporal, spatial, and management variability in the carbon footprint of New Zealand milk. *J. Dairy Sci.* 103:1031–1046. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17182>.
- Letelier, P. 2018. Co-products handlings methods to assess the environmental impact for dual purpose cattle system: A case study in Costa Rica. Mag. Sc. Thesis. University of Wisconsin. Madison, USA. 66 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 2006. Reglamento General para el Otorgamiento del Certificado Veterinario de Operación. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/legislacion/2008/de-34859.pdf> (Accesado: 15 jun. 2020).
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR); CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR). 2010. Determinación del balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad. MAG/CATIE, Informe Final. 250 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 2015. Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono en Costa Rica. San José, CR. SIDE, MINAE, DCC, UNEP DTU, FIRM. 120 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 2015. NAMA Ganadería Costa Rica. San José, Costa Rica. 27 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR). 2019. NAMA Ganadería. San José, Costa Rica. 114 p.
- Manzanilla-Pech, C.I.V., Gordo, D., Difford, G.F., Løvendahl, P., Lassen, J. 2020. Multitrait genomic prediction of methane emissions in Danish Holstein cattle. *J. Dairy Sci.* 103:9195-9206. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17857>.
- Manzanilla-Pech, C.I.V., Løvendahl, P., Mansan Gordo, D., Difford, G.F., Pryce, J.E., Schenkel, F., Wegmann, S., Miglior, F., Chud, T.C., Moate, P.J., Williams, S.R.O., Richardson, S.M., Stothard, P., Lassen, J. 2021. Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response. *J. Dairy Sci.* 104:8983–9001. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19889>.
- Mazzetto, A., Feigl, B.J., Schils, R.L.M., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C. 2015. Improved pasture and herd management to reduce greenhouse gas emissions from a Brazilian beef production system. *Livestock Science* 175:101-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2015.02.014>.
- Mazzetto, A., Styles, D., Gibbons, J., Arndt, C., Misselbrook, T., Chadwick, D. 2020. Region – specific emission factors for Brasil increase the estimate of nitrous oxide emissions from

- nitrogen fertilizer application by 21%. *Atmospheric Environment* 230:1-8. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117506.
- Mejía, H.J. 2002. Consumo voluntario de forrajes en pastoreo. In *Acta Universitaria* 12:56-65. Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad de Guanajuato, México.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, CR). 2019. Plan de descarbonización compromiso del gobierno del bicentenario. San Jose, Costa Rica. 9 p.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, CR). 2019. COSTA RICA II INFORME BIENAL DE ACTUALIZACIÓN ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IMN, DCC, GEF, PNUD. 272 p.
- MLA (Meat & Livestock Australia, AU). 2020. The Australian Red Meat Industry's Carbon Neutral by 2030 Roadmap. 44 p.
- Montanholi, Y.R., Swanson, K.C., Palme, R., Schenkel, F.S., McBride, B.W., Lu, D., Miller, S.P. 2010. Assessing feed efficiency in beef steers through feeding behavior infrared thermography and glucocorticoids. *Animal* 4-5:692-701. doi: 10.1017/S1751731109991522.
- Montenegro Ballesteros, J., Barrantes Guevara, E., Ivankovich Cruz, S. 2020. Cuantificación de metano entérico según estado fisiológico en vacas lecheras de alta producción en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 44:79-92. DOI 10.15517/RAC.V44I1.40003.
- Muñoz, C., Hube, S., Morales, J., Yan, T., Ungerfeld, E. 2015. Effects of concentrate supplementation on enteric methane emissions and milk production of grazing dairy cows. *Livestock Science* 175:37-46. doi: 10.1016/j.livsci.2015.02.001.
- Naranjo, A., Johnson, A., Rossow, H., Kebreab, E. 2020. Greenhouse gas, water, and land footprint per unit of production of the California dairy industry over 50 years. *J. Dairy Sci.* 103:3760–3773. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16576>.
- O'Brien, D., Hennessy, T., Moran, B., Shalloo, L. 2015. Relating the carbon footprint of milk from Irish dairy farms to economic performance. *J. Dairy Sci.* 98:7394–7407. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-9222>.
- Pelster, D.E., Gisore, B., Goopy, J., Korir, D., Koske, J.K., Rufino, M.C., Butterbach-Bahl, K. 2016. Methane and nitrous oxide emissions from cattle excreta on an East African grassland. *J. Environ. Qual.* 45(5):1531-1539. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.02.0050>.
- Piñero -Vásquez, A.T., Jimenez - Ferrer, G., Alayon - Gamboa, J.A., Chay -Canul, A.J., Ayala -Burgos, A.J., Aguilar - Pérez, C.F., Ku -Vera, J.C. 2018. Effects of quebracho tannin extract on intake, digestibility, rumen fermentation, and methane production in

- crossbred heifers fed low-quality tropical Grass. *Trop Anim Health Prod.* 50:29-36. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1396-3>.
- Poore, J., Nemecek, T. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360:987-992. DOI: 10.1126/science.aag0216
- Pryce, J.E., Bell, M. 2017. The impact of genetic selection on greenhouse-gas emissions in Australian dairy cattle. *Animal Production Science* 57:1451–1456. <http://dx.doi.org/10.1071/AN16510>.
- Rice, P., O'Brien, D., Shalloo, L., Holden, N.M. 2017. Evaluation of allocation methods for calculation of carbon footprint of grass-based dairy production. *J. Environ. Manage.* 202: 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.071>.
- Richardson, C.M., Nguyen, T.T.T., Abdelsayed, M., Moate, P.J., Williams, S.R.O., Chud, T.C.S., Schenkel, F.S., Goddard, M.E., van den Berg, I., Cocks, B.G., Marett, M.C., Wales, W.J., Pryce, J.E. 2021. Genetic parameters for methane emission traits in Australian dairy cows. *J. Dairy Sci.* 104:539–549. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18565>.
- Ríos, N., Cárdenas, A., Andradre, H., Ibrahim, M., Jiménez, F., Sancho, F., Ramírez, E., Reyes, B., Woo, A. 2007. Estimación de la escorrentía superficial e infiltración en sistemas de ganadería convencional y en sistemas silvopastoriles en el trópico sub-húmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 45:66-71.
- Rivera Céspedes, M. 2015. Análisis de la producción maderable de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) en plantaciones y sistemas agroforestales en Hojanca, Costa Rica, y bases para el desarrollo de un plan de incidencia política para promover su cultivo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 127 p.
- Rodriguez, N.M., Simoes Saliba, E.O., Guimaraes Junior, R. 2007. Uso de indicadores para estimar el consumo y digestibilidad de pasto. LIPE, lignina purificada y enriquecida. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 20:518-525. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/rccp/article/view/324210>
- Sanchez-Azofeifa G.A. 2015. Analysis of forest cover in Costa Rica between 1960 and 2013. *Ambientico* 253:4–11 ISSN: 1409-214X.
- Sánchez Ledezma, W. 2018. Balance de gases de efecto invernadero en lecherías especializadas de Costa Rica. *Alcances Tecnológicos* 12(2):55-70. DOI: <https://doi.org/10.35486/at.v12i2.92>.
- Sharma, S. 2020. Milking the Planet: How Big Dairy is heating up the planet and hollowing rural communities. 28 p. Disponible en: www.iatp.org/emissions-impossible (Accesado: 29 oct. 2019).

- SIDE (Servicios Internacionales para el Desarrollo Empresarial, CR). 2016. Actualización de la Línea de Base sobre emisiones y secuestro de carbono en el sector ganadero de Costa Rica. Proyecto Banco Mundial-MAG-SIDE. San José, Costa Rica. 59 p.
- Solís, J., Villanueva, C., Detlefsen, G., Brenes, C., Vílchez, S. 2019. Tree Cover on Cattle Farms in the Southeast Region of Guatemala. *American Journal of Agriculture and Forestry* 7(2):66-77. DOI:10.11648/j.ajaf.20190702.14.
- Stanley, P.L., Rowntree, J.E., Beede, D.K., DeLonge, M.S., Hamm, M.W. 2018. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems* 162:249-258. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.003>.
- Thomassen, M.A., Dalgaard, R., Heijungs, R., de Boer, I. 2008. Attributional and consequential LCA of milk production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13:339–349. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0007-y>.
- Vargas, B., Ulloa, J. 2008. Relación entre crecimiento y curvas de lactancia en grupos raciales lecheros de distintas zonas agroecológicas de Costa Rica. *Livestock Research for Rural Development* 20(8):1-17.
- Vargas Leitón, B., Solís Guzmán, O., Sáenz Segura, F., León Hidalgo, H. 2013. Caracterización y clasificación de hatos lecheros en Costa Rica mediante análisis multivariado. *Agron. Mesoam.* 24(2):257-275. <http://DOI 10.15517/AM.V24I2.12525>.
- Valencia Salazar, S.S., Piñeiro Vásquez, A.T., Molina Botero, I.C., Lazos Balbuena, F.J., Uuh Narváez, J.J., Segura Campos, M.R., Ramírez Avilés, L., Solorio Sánchez, F.J., Ku Vera, J.C. 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>.
- Van Wyngaard, J.F.V., Meeske, R., Erasmus, L. 2018. Effect of concentrate level on enteric methane emissions, production performance, and rumen fermentation of Jersey cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer. *J. Dairy Sci.* 101:9954–9966. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-143>.
- Vega, A. 2016. Análisis de herramientas para la estimación de gases de efecto invernadero (GEI) y su aplicación en sistemas de producción bovina doble propósito de la Cuenca del Río Jesús María, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 119 p.
- Villa Alves, F., Giolo de Almeida, R., Laura, V.A. 2015. Carne Carbono Neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos. Embrapa, Brasília, DF. Documentos 210. 29 p.

- Villanueva, C., Argeñal, P., Ibrahim, M., Casasola, F. 2016. Contribución de las cercas vivas en el control del estrés calórico en sistemas intensivos de producción de leche en trópico de bajura. *Horizonte Lechero* 3:14-21.
- Wattiux, M.A., Iñamagua – Uyaguari, J.P., Guerra, L., Casasola, F., Jenet, A. 2016. Feeding and fertilization practices and greenhouse gas emissions in specialized dairy farms of Dos Pinos in Costa Rica. *Tropical Grasslands* 4(3):146-158. [http://DOI: 10.17138/TGFT\(4\)146-158](http://DOI:10.17138/TGFT(4)146-158).
- Weidema, B.P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C.O., Wenet, G. 2013. Data Quality Guideline for the Ecoinvent Version 3, Swiss Center for Life Cycle Inventories. The ecoinvent Centre, St. Gallen.
- Wilkes, A., Reisinger, A., Wollenberg, E., van Dijk, S. 2017. Measurement, reporting and verification of livestock GHG emissions by developing countries in the UNFCCC: current practices and opportunities for improvements. Global Research Alliance, CGIAR, CCAFS. CCAFS Report No. 17. 114 p.
- Woldegebriel, D., Udo, H., Viets, T., van der Harst, E., Potting, J. 2017. Environmental impact of milk production across an intensification gradient in Ethiopia. *Livestock Science* 206:28-37. <https://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2017.10.005>.

El objetivo del estudio fue evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los sistemas de producción de leche y estimar la emisión de metano entérico en vacas lecheras con distinto perfil genético. La fermentación entérica fue la principal fuente de emisión de GEI (50%) en las fincas y la menor huella de carbono de leche se encontró en las fincas con mayor nivel de intensificación. Fincas que tienen entre 75% y 80% de vacas en ordeño y una tasa de reemplazo del 20% reducen hasta el 14% las emisiones totales de GEI. Las vacas F1 (50% *Bos taurus* + 50% *Bos indicus*) mostraron una menor emisión y factor de conversión de metano que las vacas con mayor genética europea. Este conocimiento y herramientas aportan al desarrollo de una ganadería competitiva con bajas emisiones de GEI.