

# ESTIMACIÓN DE METANO EN VACAS PASTOREANDO SISTEMAS SILVOPASTORILES CON *Tithonia diversifolia* Y SUPLEMENTADAS CON GRASAS POLINSATURADAS

Methane estimation in cows grazing silvopastoral systems with *Tithonia diversifolia* and supplemented with polyunsaturated fats

Juan Leonardo Cardona-Iglesias<sup>1</sup>, Liliana Mahecha-Ledesma<sup>2</sup> y Joaquín Angulo-Arizala<sup>2</sup>

Este trabajo formó parte de la tesis de grado de la maestría en Ciencias Animales del primer autor, en la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia.

Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación en Ciencias Agrarias-GRICA, AA 1126, Medellín, Colombia. [jeleonardo.cardona@udea.edu.co](mailto:jeleonardo.cardona@udea.edu.co), [liliana.mahecha@udea.edu.co](mailto:liliana.mahecha@udea.edu.co), [joaquin.angulo@udea.edu.co](mailto:joaquin.angulo@udea.edu.co). Autor para correspondencia: [liliana.mahecha@udea.edu.co](mailto:liliana.mahecha@udea.edu.co)

Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación en Ciencias Agrarias-GRICA. AA 1126, Medellín, Colombia. [jeleonardo.cardona@udea.edu.co](mailto:jeleonardo.cardona@udea.edu.co), [liliana.mahecha@udea.edu.co](mailto:liliana.mahecha@udea.edu.co), [joaquin.angulo@udea.edu.co](mailto:joaquin.angulo@udea.edu.co)

## RESUMEN

Se evaluaron cinco modelos empíricos con el fin de estimar la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) a partir de datos obtenidos en campo, de vacas lecheras Holstein pastoreando un sistema silvopastoril (SSP) con botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y kikuyo *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone o un monocultivo (MONO) de kikuyo en trópico alto, ambos con suplementación de diferentes fuentes de ácidos grasos polinsaturados (AGPI). Los modelos incluyeron variables obtenidas en campo, tales como: consumo de materia seca (CMS), proporción de forraje consumido, peso vivo (PV), producción de leche (PL) y factores de emisión teóricos. Se analizaron las variables gramos (g)  $\text{CH}_4$ /animal/(d) y g  $\text{CH}_4$ /L leche producida. Los datos de las variables estudiadas fueron tomados durante dos pastoreos (rotaciones), se analizaron mediante un diseño de bloques completos al azar (BCA). Para la escogencia del modelo que mejor se ajustara a cada variable, se tuvieron en cuenta los menores valores para los criterios de información Akaike (AIC) y bayesiano (BIC) y el menor valor del cuadrado medio del error del modelo (CME). Según el mejor modelo seleccionado para las variables analizadas, se encontró que las vacas del sistema monocultivo presentaron menores valores de producción de  $\text{CH}_4$  expresada en g- $\text{CH}_4$ /animal/d (MONO: 314 vs SSP: 322 P<0,05), pero cuando se expresaron los valores en  $\text{CH}_4$  producido por unidad de producto obtenido (g- $\text{CH}_4$ /L leche producida), se encontró menor producción de  $\text{CH}_4$  para las vacas que pastoreaban en el SSP: 11,4 vs 12,5 MONO, P<0,05. Se concluye que los modelos que incluyeron variables como el CMS y PL, fueron los que mejor se ajustaron a las variables estudiadas. Los animales del SSP y suplementados con AGPI mostraron menor producción de  $\text{CH}_4$  por unidad de producto obtenido, concediéndole a esta clase de estrategias nutricionales bondades desde el punto de vista ambiental y productivo.

**Palabras clave:** Modelos predicción metano; sistema silvopastoril; *Tithonia diversifolia*

## ABSTRACT

Five empirical models were evaluated in order to estimate the production of methane ( $\text{CH}_4$ ) from data obtained in the field, from Holstein dairy cows grazing a silvopastoral system (SSP) with buttercup (*Tithonia diversifolia*) and kikuyo *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone or monoculture (MONO) of kikuyo in high tropics, both with supplementation of different sources of polyunsaturated fatty acids (PUFA). The models included variables obtained in the field, such as: dry matter consumption (CMS), proportion of forage consumed, live weight (PV), milk production (MP) and theoretical emission factors. The variables gram (g)  $\text{CH}_4$  / animal / day (d) and g  $\text{CH}_4$  / L milk produced were analyzed. The data of the variables studied, were taken during two pastures (rotations), were analyzed by a randomized complete block design (BCA). For the choice of the model that best fits each variable, the lowest values were taken into account for the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria and the lowest value of the mean square of the model error (CME). According to the best model selected for the variables analyzed, it was found that cows in the monoculture system had lower  $\text{CH}_4$  production values expressed in g- $\text{CH}_4$  / animal / d (MONO: 314 vs. SSP: 322 P <0.05), but when the values were expressed in  $\text{CH}_4$  produced per unit of product obtained (g- $\text{CH}_4$  / L milk produced), lower methane production was found for the cows grazing in the SSP: 11.4 vs 12.5 MONO, P <0.05. It is concluded that the models that included variables such as the CMS and MP, were those that best adjusted to the variables studied. The animals of the SSP and supplemented with PUFA, showed lower production of  $\text{CH}_4$  per unit of product obtained, granting this kind of nutritional strategies benefits from the environmental and productive point of view.

**Key words:** Methane prediction models; silvopastoral system; *Tithonia diversifolia*

## INTRODUCCIÓN

El metano ( $\text{CH}_4$ ) es un potente gas de efecto invernadero (GEI) que aporta alrededor de un 20 % del total de las emisiones antropogénicas [29]. Este GEI requiere especial consideración ya que tiene un elevado potencial de calentamiento veintinueve veces más que el  $\text{CO}_2$  [14, 22], por lo cual se reporta como uno de los GEI responsable de la destrucción de la capa de ozono y aumento de la temperatura global [3, 61, 62].

En Colombia, el 43 % de los GEI, provienen de la agricultura-silvicultura y otros usos de la tierra; en este sector el 30,1 % de los GEI producidos corresponde a  $\text{CH}_4$  y de éstos, un 26,4 % corresponden a fermentación entérica causada por la ganadería bovina (*Bos taurus*) [50]. El  $\text{CH}_4$  producido por los bovinos (*Bos taurus* y *Bos indicus*) representa un gasto energético para el animal, el cual puede variar del 2 al 12 % de la energía bruta consumida, este rango depende del consumo de alimento, composición y digestibilidad de la dieta o uso de aditivos [25].

Una porción de la producción de  $\text{CH}_4$  entérico en los rumiantes puede ser manipulada y esta disminución usualmente está asociada a una mayor productividad (litros (L) leche, kilogramos (kg) carne, lana) [30]. La principal estrategia para tratar de mitigar las emisiones de  $\text{CH}_4$  entérico, es la diversificación de la dieta, enfocada a disminuir la metanogénesis [5]. La manipulación nutricional incluye, sistemas de pastoreo que propicien la diversidad de forrajes de buena calidad, uso de aditivos (compuestos químicos, ácidos orgánicos, ionóforos, probióticos), dietas ricas en ácidos grasos polinsaturados (AGPI) y/o plantas con contenido de metabolitos secundarios (taninos, saponinas) [4, 5, 57].

En el trópico alto de Colombia, el establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP) con *Tithonia diversifolia* (Botón de oro) se ha venido posicionando, debido a su buen aporte de nutrientes [36] y a la presencia de metabolitos secundarios de la forrajera, estas características pueden mejorar el balance ruminal de energía y proteína y de paso disminuir el impacto ambiental por concepto de emisión de GEI [15, 31]. Además, la suplementación nutricional en bovinos con AGPI, ha demostrado tener cierto potencial para disminuir la producción de  $\text{CH}_4$  entérico, debido a que los AGPI son utilizados como una alternativa metabólica para la captación de  $\text{H}_2$  a nivel ruminal y a un efecto tóxico sobre las poblaciones metanogénicas [12, 48, 49].

Generalmente la estimación de la producción de  $\text{CH}_4$  en bovinos requiere de equipos y metodologías complejas, casi siempre costosas. Las ecuaciones de predicción son una alternativa ampliamente utilizada para estimar dichas emisiones. Los modelos empíricos para predecir  $\text{CH}_4$  entérico se utilizan desde los años treinta [3]. Algunas de las covariables en la predicción incluyen consumo de materia seca (CMS), peso vivo (PV), producción de (PL), proporción de forraje o la composición química de la dieta [13, 16, 39]. Las variables que más explican la producción de  $\text{CH}_4$  son aquellas relacionadas con la ingesta

de alimento (CMS, materia orgánica, energía digestible o energía bruta), más del 75 % de las ecuaciones usan en alguna medida esta variable. Lo anterior debido a que entre el 60-80 % de la variación en la predicción de  $\text{CH}_4$  podría atribuirse a una medida de la ingesta [13, 39].

Tratar de estimar la producción de GEI como el  $\text{CH}_4$  es esencial para hacer frente al cambio climático [10]. En Colombia no se cuenta con información detallada sobre las emisiones de  $\text{CH}_4$  por parte del ganado bovino, mucho menos en sistemas alternativos. Así como tampoco con una metodología concertada para su cálculo [35]. En ese orden de ideas, el presente trabajo tuvo como objetivo, estimar mediante modelos empíricos la producción de metano de vacas Holstein, suplementadas con ácidos grasos polinsaturados y pastoreando un sistema silvopastoril o un monocultivo en trópico alto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización ensayo de campo

El experimento de campo se desarrolló durante el primer semestre del 2016 en la hacienda La Montaña, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia, ubicada en el municipio de San Pedro de los Milagros, Antioquia-Colombia, zona de vida: bosque húmedo montano bajo bhMB, 2350 - 2500 metros sobre nivel del mar (m.s.n.m), temperatura promedio 15°C. Las variables ambientales se midieron a lo largo del experimento mediante una estación meteorológica profesional de marca: WatchDog 2000-España. Durante la investigación, la temperatura promedio fue de 16,85°C, humedad relativa (% HR) de 75,26 % y una precipitación de 0,0 milímetros (mm) (época seca).

### Animales experimentales

Se seleccionaron 12 vacas de raza Holstein pura, con más de 2 partos, entre 60 y 150 días (d) en leche (DEL). Antes del inicio del ensayo se pesaron los animales en báscula marca TRU-TEST-Ec 2000, Colombia, se evaluó la condición corporal y se verificó que estuvieran en un estado sanitario óptimo. Las 12 vacas del ensayo fueron repartidas en los dos sistemas de pastoreo. Seis vacas estuvieron pastoreando en un sistema silvopastoril (SSP) con Botón de oro (*Tithonia diversifolia* Hemsl. A Gray) y las otras seis, en un monocultivo de pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone) (TABLA I) y en la composición química de forrajes.

El número de animales en cada sistema fue definido con base en la capacidad de carga estimada.

### Sistemas de pastoreo

La investigación se llevó a cabo en dos sistemas de pastoreo diferentes, cada uno con un área total de 1,4 hectáreas (ha). Los sistemas fueron: un SSP de baja densidad con arbustos de botón

**TABLA I**  
**CARACTERÍSTICAS DE LOS ANIMALES UTILIZADOS EN AMBOS SISTEMAS**

Parámetros	Sistema (SSP)	Sistema (MONO)
Peso vivo (kg)	500 ± 65	538 ± 18,5
Condición corporal (cc)	3,25 ± 0,2	3,25 ± 0,5
Días en leche (DEL)	113,5 ± 38	105 ± 39
Producción leche (L/d)	24 ± 4	24 ± 4,7
Grasa en leche %	2,96 ± 0,26	2,97 ± 0,15
Proteína en leche %	2,85 ± 0,17	2,82 ± 0,19

SSP= Sistema Silvopastoril; MONO= Monocultivo; promedio; ± D.E.

**TABLA II**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA CORREGIDA EN BASE A MS DE LOS FORRAJES DE AMBOS SISTEMAS, SUMINISTRADOS A LAS VACAS EXPERIMENTALES**

Fracción química % de la MS	Kikuyo (SSP)	Kikuyo (MONO)	Botón oro (SSP)
MST	14,7	14,1	18
PC	20,3	23,9	18,3
FDN	56,3	58,5	44,3
FDA	24,8	25,6	33,3
EE	3,1	2,8	3
EB	4373	4360	4183
CEN	12,1	11,9	15
Ca	0,7	0,6	0,9
P	0,4	0,3	0,4
CNF	8,2	3	19,4

SSP:=Sistema silvopastoril; MONO:=Monocultivo; MST=Materia seca total; PC= Proteína cruda; FDN= Fibra detergente neutro; FDA=Fibra detergente ácido; EE= Extracto etéreo; EB= Energía Bruta (Kilocalorías (Kcal/kg)); CEN= Cenizas; Ca: Calcio; P: Fósforo; CNF=Carbohidratos No Fibrosos.

de oro como forrajera de ramoneo y un MONO de solo pasto kikuyo. El SSP estuvo conformado por pasto kikuyo y surcos de botón de oro sembrados a 8 metros (m) entre surcos y 1 m entre plantas y 30 árboles de Aliso (*Alnus acuminata*) para sombra, distribuidos en toda el área. En ambos sistemas se utilizó un pastoreo rotacional por franjas (36 franjas) con un promedio de 390 m<sup>2</sup> cada una.

La ocupación de cada franja fue de 1 d con capacidad para 6 vacas y un periodo de descanso para el pasto kikuyo de 35 d; para el botón de oro el periodo de descanso fue de 70 d. El SSP no recibió fertilización química alguna, mientras que los potreros del MONO se fertilizaban 10 d después de cada rotación con fertilizante comercial con alto contenido de nitrógeno (N) (42-0-5) a razón de 52,73 kg N/ha y con bovinaza como fertilizante orgánico 10,000 litros L/ha.

#### Alimento concentrado y suplementación lipídica

Para suplementar las vacas se formuló un concentrado isoproteico e isoenergético el cual se elaboró en la misma finca (TABLA III). En la formulación se utilizaron fuentes lipídicas con un nivel máximo de inclusión correspondiente al 3 % del consumo de materia seca CMS. Para la formulación se incluyeron tres combinaciones de fuentes lipídicas ricas en ácidos grasos poliinsaturados AGPI pero dichas fuentes cambiaron en proporción, también se utilizó una fuente de grasa saturada sobrepasante (GSP).

Para la investigación se elaboró un solo concentrado base, pero hubo variación en la fuente de lípidos incluida, lo que dio como resultado a tres concentrados (dietas): concentrado testigo (D1): 3 % grasa saturada comercial, concentrado 2 (D2): 1 % de Aceite Soya (*Glycine max*), 0,5 % Aceite de pescado y 1,5 % de GSP rica en ácidos grasos n3, concentrado 3 (D3): 2,5 % Aceite

TABLA III

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ALIMENTO CONCENTRADO CORREGIDO EN BASE A MS UTILIZADO EN EL EXPERIMENTO**

Fracción química % de la MS	D1	D2	D3
MST	86,9	86,9	86,9
PC	15,6	15,6	15,6
FDN	11,7	11,7	11,7
FDA	4,5	4,5	4,5
EE	6	6	6
EB	4547,2	4589	4521,4
CEN	7,5	7,5	7,5
Ca	1,5	1,5	1,5
P	0,4	0,4	0,4
CNF	59,2	59,2	59,2

MST: Materia seca total; PC= Proteína cruda; FDN= Fibra detergente neutro; FDA= Fibra detergente ácido; EE= Extracto etéreo; EB= Energía Bruta (Kilocalorías (Kcal/kg); CEN= Cenizas; Ca: Calcio; P: Fósforo; CNF=Carbohidratos No Fibrosos, D1= 3 % grasa saturada comercial, concentrado 2, D2= 1 % de Aceite Soya, 0,5 % Aceite de pescado y 1,5 % de GSP rica en ácidos grasos n3. concentrado 3, D3= 2,5 % Aceite Soya, 0,5 % Aceite de pescado.

Soya, 0,5 % Aceite de pescado. El concentrado se suministró a los animales dos veces al d, en los ordeños am y pm, la ración que se suministró por animal correspondió a una relación leche (litros L/d:concentrado (kg/d de 3.5:1, con un consumo máximo de 10 kg concentrado/animal/d. Los animales siempre tuvieron acceso *ad libitum* al agua en el potrero y en la sala de espera del

Las muestras de forrajes y de concentrado se secaron en estufa de ventilación forzada marca Memmert-Alemania a 65°C durante 72 horas (h), posteriormente fueron molidas en un molino estacionario Thomas-Wiley modelo 4 (EUA), con una malla de 1,0 mm. Para la determinación de la composición química de los alimentos se utilizaron las técnicas analíticas convencionales de la Association Of Official Analytical Chemist (AOAC) [1]. Calcio (Complexométrica con EDTA), Fósforo (Espectrometría UV-VIS, NTC 4981), Cenizas totales (Incineración directa AOAC 942,05), Fibra detergente ácida (Van Soest norma AOAC 973,18), Fibra detergente neutra (AOAC 962,09 y 978,10), Humedad (Termogravimétrico IR), Extracto etéreo (AOAC ID 973,18), proteína bruta (Kjeldahl basado en NTC 4657) [1].

#### Consumo de materia seca

Para la estimación del CMS del forraje se utilizó el método de los indicadores, utilizando el contenido de materia seca indigerible (MSi) como indicador interno para estimar la digestibilidad de la materia seca (DMS) [23, 46, 58] y óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) como indicador externo para estimar la producción de heces [9, 32]. Para estimar el consumo diario de concentrado/vaca, se midió la cantidad ofrecida y la rechazada, la diferencia se supuso fue lo consumido por el animal.

#### Cantidad de forraje consumido por los animales

Para la realización del aforo del kikuyo se utilizó la metodología del doble muestreo [18]. El aforo del botón de oro se realizó mediante una adaptación que se le hizo a la metodología descrita por Mahecha y col. [33]. La realización del aforo por el método agronómico también sirvió para estimar la relación kikuyo: botón de oro consumida por los animales en el SSP.

#### Producción de leche

Se registró la producción de leche (litros L/vaca/d) durante los periodos de medición, tanto en los ordeños de la mañana como de la tarde, por medio de un medidor de leche (Tru test milk meters - Nueva Zelanda).

#### Procesamiento y análisis estadístico de los datos

La estimación de la cantidad de metano CH<sub>4</sub> emitido por las vacas lecheras se realizó utilizando varios modelos empíricos, los cuales han sido referenciados ampliamente. Dichos modelos tienen en cuenta variables como: el CMS, valor energético de los alimentos, proporción de forraje y suplemento consumido, PV, PL y factores de emisión. La elección de modelos empíricos se hizo debido a la practicidad de éstos y a que utilizan como variables, valores que se pueden obtener fácilmente en campo, sin la necesidad de grandes esfuerzos económicos o científicos. Lo anterior hace que sean metodologías de sencilla utilización y replicación. Los modelos utilizados fueron:

$$1. \quad \text{Tier 2 (IPCC 2006) [21]: } CH_4 \text{ (g/d)} = [EB \times YM \times 365] / 0,05565 \text{ MJ/g } CH_4$$

Donde: EB= energía bruta ingerida/animal (MJ/animal (MJ: Megajoules)

YM: fracción de energía bruta presente en los alimentos que se convierte en CH<sub>4</sub> (YM: 0,065 asignado para vacas lecheras en pastoreo, de países en desarrollo).

0,05565 MJ, corresponde a la cantidad de energía de cada g de metano emitido.

365: son los días (d) del año (a), por si se requiere extrapolar los datos.

$$2. \text{ Kirchgessner y col. [28]: } CH_4 \text{ (g/d)} = 55 + 4,5 \times \text{Leche} + 1,2 \times PV^{0,75}$$

Donde: Leche: producción media L leche/d/animal

PV: peso vivo/kg/animal.

$$3. \text{ Kirchgessner y col. [27]: } CH_4 \text{ (g/d)} = 10 + 4,9 \times \text{producción de leche (L/d)} + 1,5 \times PV^{0,75}$$

Donde: Producción Leche: producción media L leche/d/animal

PV: peso vivo/kg/animal.

$$4. \text{ Mills y col. [39]: } CH_4 \text{ (g/d)} = [5,93 + 0,92 \times \text{CMS}]/0,05565$$

Donde: CMS: consumo materia seca (MS)/animal/d(kg).

0,05565 MJ, corresponde a la cantidad de energía de cada g de metano emitido.

$$5. \text{ Ellis y col. [13]: } CH_4 \text{ (g/d)} = [8,56 + 0,14 \times \text{forraje (\%)}]/0,05565$$

Donde: Porcentaje forraje: % forraje consumido en la ración total.

0,05565 MJ, corresponde a la cantidad de energía de cada g de metano emitido.

En cada modelo se estimaron las variables g metano/animal/d y g metano/L de leche producido. Los modelos se ranquearon, y de primero se posicionó aquel que presentara menores valores para los criterios de información Akaike (AIC), criterios de información Bayesiano (BIC) y menor valor del cuadrado medio del error (CME). En aquellos casos donde algunos modelos fueran muy similares, para efectos del ranqueo la selección del modelo se realizó teniendo en cuenta el menor valor de BIC [38, 48].

## Análisis estadístico

Los datos de las variables de interés, fueron analizados en un diseño de bloques completos al azar (BCA), en un arreglo factorial 2 x 3 (2 sistemas x 3 dietas).

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + L_k + S^*L_{jk} + E_{ijkl}$$

Donde Y= variable de respuesta,  $\mu$  = Media general,  $B_i$  = Efecto del bloque ó rotación ( $i= 1,2$ ),  $S_j$  = Efecto del sistema ( $j= 1,2$ ; SSP y MONO),  $L_k$  = Efecto de la dieta ( $k= 1,2,3$ ) (concentrados),  $S^*L$  = interacción sistema x dieta,  $E_{ijkl}$  = Error experimental

Para ello se utilizó el PROC LSMEANS del programa estadístico SAS [55]. Se utilizó la sentencia PDIF para separación de medias y un error alfa de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación, las vacas pastoreando el SSP con *Tithonia diversifolia* tuvieron un mayor consumo de ingesta total (2 kg más) respecto a las del MONO ( $P<0,05$ ) (TABLA IV), valores que coinciden con lo reportado por autores como Rivera y col. [53] y Montoya y col. [42], quienes también encontraron aumento del CMST en bovinos tipo leche pastoreando SSP con la misma forrajera. Dichos aumentos en los consumos lo atribuyen a factores como; aumento de la selectividad, mayor oferta de nutrientes, bienestar animal, mejor palatabilidad y calidad nutricional que ofrece la *Tithonia diversifolia*, al ser incorporada como forrajera de ramoneo en este tipo de sistemas [60].

Las vacas del SSP produjeron en promedio 3,5 L de leche/d más comparadas con las del MONO, la eficiencia de producción de leche (L leche/kg MST consumida) fue mayor para el SSP 1,5 frente a 1,4 de las vacas del MONO, los datos hallados de producción de leche están relacionados con los de CMST, los cuales también fueron superiores para las vacas del SSP (TABLA IV). El aumento del CMS aporta energía directa al animal, por lo tanto el valor energético de la dieta es fundamental para sostener y aumentar la PL [37]. Mejorar la productividad animal, en este caso L leche/animal/d, es una de las estrategias más importantes encaminadas a disminuir la producción de CH<sub>4</sub> por unidad de producto obtenido [30].

La producción de CH<sub>4</sub> entérico fue expresada como g CH<sub>4</sub>/animal/d. En la TABLA V se presentan los modelos con sus respectivos valores de CME, AIC y BIC, en orden descendente,

TABLA IV

### EFFECTO DEL SISTEMA SOBRE EL CONSUMO DE MATERIA SECA TOTAL (KG/DÍA) Y LA PRODUCCIÓN DE LECHE (L/VACA/DÍA) EN VACAS PASTOREANDO UN SISTEMA SILVOPASTORIL CON BOTÓN DE ORO Y UN MONOCULTIVO DE KIKUYO

Variable	SSP	EE	MONO	EE	P
CMST	19,26 <sup>a</sup>	0,38	17,26	0,62	0,0002*
PL litros (L)/vaca/día (d)	28,24 <sup>a</sup>	0,97	24,89	0,81	0,0001*

SSP= sistema silvopastoril, MONO= monocultivo, CMST= consumo materia seca total, PL= producción de leche, EE= error estándar; a, b valores con superíndice no comunes en la horizontal difieren  $P<0,05$  (Tukey).

**TABLA V**  
**VALORES DE AJUSTE PARA LOS DISTINTOS MODELOS EVALUADOS, EN LA VARIABLE G CH<sub>4</sub>/ANIMAL/DÍA**

Modelo	CME	AIC	BIC
Ellis y col. (2007)	5,58 E-11	-363,6	-364,9
Mills y col. (2003)	284	154,3	151
Kirchgessner y col. (1991)	415	154,3	151
Tier 2 (IPCC 2006)	582	159	156
Kirchgessner y col. (1995)	626	171	169

CME= cuadrado medio del error, AIC=Criterio de información Akaike.  
 BIC= Criterio de información Bayesiana.

para la variable evaluada. Se consideran mejores modelos, aquellos que presenten menores valores de CME, AIC y BIC.

Para esta variable, el modelo que mejor se ajustó fue el de Ellis y col.[13], seguido por el de Mills [37], estos dos modelos tienen en cuenta el consumo de forraje y el consumo de CMST. El efecto directo del CMS sobre la producción de CH<sub>4</sub> entérico en vacas lecheras ha sido bien documentado y se considera que éste es el factor principal que influye sobre la producción de CH<sub>4</sub> [25]. Hristov y col. [19] en un metanálisis donde incluyeron 377 estudios, reportaron con un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0,86, que en la mayoría de estudios en mención, el CMS fue la variable que mejor explicó la producción de CH<sub>4</sub> en los animales. Lo anterior coincide con lo reportado por Ellis y col. [13] y Nielsen y col. [44], los cuales sugieren en lo posible, incluir dentro de los modelos predictores de CH<sub>4</sub> entérico, el CMS y/o consumo de forraje de las vacas.

Al igual que en esta investigación, Ellis y col. [13] y Restrepo y col. [52] encontraron que, los modelos que incluían la variable CMS, fueron los mejores predictores de CH<sub>4</sub>, por presentar menores valores de BIC. Aunque se utiliza con frecuencia el CMS como predictor de CH<sub>4</sub>, en lo posible se deben realizar mejoras en los modelos, incluyendo otras variables inherentes al animal (PL, PV) y a la dieta [13]. Es importante anotar que en muchas ocasiones no se logran mejoras sustanciales al incluir otros factores dentro del modelo, lo que indica la marcada influencia del CMS en la predicción de CH<sub>4</sub> entérico [39].

Es sabido que la producción de CH<sub>4</sub> está relacionada con la ingesta de alimento, pero se debe tener en cuenta que en este factor están inmersas características de la dieta tales como: el nivel de consumo, la digestibilidad de la ración y/o la composición de la dieta, entonces es de esperarse cambios en la producción de CH<sub>4</sub> al modificar alguna de las mencionadas [51].

En la TABLA VI se muestran las diferentes medias de producción de CH<sub>4</sub> entérico, para la vacas en cada uno de los sistemas evaluados. En los modelos Tier 2 [21], Kirchgessner y col. [28] y Kirchgessner y col. [27], no se evidenció diferencia estadística entre las medias de ambos sistemas para esta variable (P>0,05). Mientras que en los modelos propuestos por Ellis y col. [13] y Mills y col. [39] el P-valor fue <0,05.

En la presente investigación fueron muy similares los rangos en que oscilaron los valores de estimación de CH<sub>4</sub> entérico (g CH<sub>4</sub>/animal/d) en ambos sistemas, entre 294 y 415 g para las vacas del SSP y para las vacas del MONO de 298 a 412 g CH<sub>4</sub>/animal/d. En los modelos que mejor predijeron la producción de metano, Ellis y col. [13] y Mills y col. [37], respectivamente, los valores de CH<sub>4</sub> fueron mayores para las vacas pastoreando SSP, este resultado podría explicarse desde el concepto de que a mayor CMST y de forraje podría aumentarse la producción de CH<sub>4</sub> en rumen.

Cuando se aumenta el CMST y de FDN proveniente del forraje, aumenta en rumen la cantidad de materia orgánica fermentable (MOF), aumentado así los sustratos (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>), subproductos de la fermentación de los carbohidratos en rumen, para la síntesis de CH<sub>4</sub> [43, 45]. En la presente investigación, las vacas del SSP tuvieron un mayor nivel de consumo total y mayor proporción de forraje ingerido, la proporción de consumo de forraje en MS fue de 67 % para las vacas en el SSP y de 64 % para las vacas del MONO, aumentando así la proporción de FDN fermentable en rumen, proveniente del forraje. Al igual que en este trabajo, Hales y col. [17] encontraron en vacas lecheras, un aumento lineal en la producción de CH<sub>4</sub> a medida que incremento el CMS y del FDN de la ingesta. A mayor fermentación de carbohidratos estructurales, se produce una alta relación de acetato:propionato y por consiguiente una mayor síntesis de metano, mientras que aquellas dietas altas en almidón aumentan la producción de propionato, disminuyendo de esta forma la producción de metano [10]. En este sentido, Aguerre y col. [2] reportan un aumento de las emisiones de metano entérico en vacas lecheras de 0,54 a 0,65 kg/vaca/d cuando se aumentó de 47 a un 68% la proporción de forraje en la dieta.

En el modelo de Ellis y col. [13], el cual ajustó mejor los datos para la variable g CH<sub>4</sub>/animal/d, el valor de medias, tanto para las vacas del SSP (322 g) como para las del MONO 314 g CH<sub>4</sub>/animal/d, están dentro de los rangos de producción de CH<sub>4</sub> para vacas lecheras descritas por otros autores. Dachraoui [10] estimando producción de CH<sub>4</sub> mediante modelos empíricos, reporta producciones promedio de 385 g de CH<sub>4</sub> /d en vacas lecheras de alta producción. Kirchgessner y col. [28] validando la ecuación que propusieron, encontraron valores de 300 g CH<sub>4</sub>/animal/d, valores estimados en cámaras calorimétricas Así mismo

**TABLA VI**  
**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO (GCH<sub>4</sub>/ANIMAL/DÍA), SEGÚN LOS DIFERENTES**  
**MODELOS, EN VACAS PASTOREANDO UN SISTEMA SILVOPASTORIL CON BOTÓN**  
**DE ORO Y UN MONOCULTIVO DE KIKUYO**

Modelo	Media. SSP	EE	Media. MONO	EE	P
Ellis y col. (2007)	322,37 <sup>a</sup>	2,5	314,9 <sup>b</sup>	2,5	0,0001*
Mills y col.(2003)	415 <sup>a</sup>	5,13	394 <sup>b</sup>	4,86	0,0067*
Kirchgessner y col.(1991)	97	13	302,7	14	0,5931
Tier 2 (IPCC 2006)	397	8,58	412	8,58	0,1662
Kirchgessner y col. (1995)	294	15,56	298	15,36	0,6992

EE= error estándar; a, b valores con superíndice no comunes en la horizontal difieren P<0,05 (Tukey).

**TABLA VII**  
**VALORES DE AJUSTE PARA LOS DISTINTOS MODELOS EVALUADOS, EN LA VARIABLE G CH<sub>4</sub>/LITRO LECHE/DÍA**

Modelo	CME	AIC	BIC
Kirchgessner y col.(1995)	0,93	60,9	58,3
Kirchgessner y col.(1991)	2,14	74,5	71,1
Ellis y col.(2007)	7,21	74,1	71,4
Mills y col.(2003)	9,76	78,7	76,1
Tier 2 (IPCC 2006)	8,9	88,7	86,1

CME= cuadrado medio del error, AIC=Criterio de información Akaike BIC= Criterio de información Bayesiana.

los valores encontrados en este trabajo están por debajo a los reportados por Westberg y col. [65] 404 a 445 g CH<sub>4</sub>/animal/d, estimados por la técnica del gas trazador SF<sub>6</sub> y el descrito por Chase [8] de 566 g CH<sub>4</sub>/animal/d estimados a partir del sistema de valoración proteica y energética desarrollado por la Universidad de Cornell, conocido como “Cornell net carbohydrate and protein system (CNCPs)”.

Los valores de CH<sub>4</sub> estimados por todos los modelos propuestos en esta investigación, están por debajo de lo reportado por Marín [35] para vacas lecheras, en el trópico alto del departamento de Antioquia. Dichos valores fueron obtenidos a partir de pruebas de fermentación ruminal *in vitro*, datos de CMS e inventario ganadero de la zona, en promedio reporta producciones de 478 g CH<sub>4</sub>/animal/d. De manera general los datos obtenidos en este trabajo, están dentro de los rangos que reporta la literatura para producción de metano en bovinos adultos, el cual puede variar de 214 a 430 g CH<sub>4</sub>/animal/d [26].

Si se analizan los datos encontrados en este trabajo, desde el concepto de producción de CH<sub>4</sub> por kg de MS consumida, el CH<sub>4</sub> disminuye con el aumento de la ingesta [51], así por ejemplo con el modelo de Ellis y col. [13] (el que mejor se ajustó), las vacas de SSP tendrían una producción de 16,73 g CH<sub>4</sub>/kg/MS consumida frente a 18,25 g CH<sub>4</sub>/kg/MS consumida de las vacas del MONO, lo que equivale a 8,33 % menos CH<sub>4</sub> por kg MS consumida para las vacas del SSP. Los anteriores valores, están por debajo de lo reportado de manera general para vacas adultas, las cuales se estima que producen en promedio 23 g CH<sub>4</sub>/kg materia seca consumida [40].

En cuanto a la producción de CH<sub>4</sub> por L de leche producida, en la TABLA VII se muestran los valores de CME, AIC y BIC, para los distintos modelos propuestos, el modelo que mejor se ajustó a esta variable fue el de Kirchgessner y col.[27], seguido del modelo propuesto por Kirchgessner y col.[28]. Ambos modelos incluyen como covariable la PL. Aunque el CMS es de gran importancia para la estimación de la producción de CH<sub>4</sub> en algunas ocasiones este parámetro no es calculado en los predios lecheros. Por lo tanto, estos modelos que incluyen variables como la PL y el peso de los bovinos, podrían ser más prácticos para estimar CH<sub>4</sub> por unidad de producto obtenido [20, 51].

La producción de CH<sub>4</sub> en g por L de leche producida (TABLA VIII), fue significativamente inferior (P<0,05) para las vacas del SSP en cuatro de los cinco modelos analizados. En el modelo que mejor ajustó los datos; Kirchgessner y col. [27], la producción de CH<sub>4</sub> (g) por L de leche producida, fue menor (P<0,05) para las vacas pastoreando SSP con ramoneo de *Tithonia diversifolia* 11,4 vs 12,5 g CH<sub>4</sub>/L leche producido de las vacas en el MONO.

En otros modelos ampliamente utilizados para predecir la producción de metano en ganado tipo leche, como por ejemplo el Tier 2 [21], se esperaría una reducción (P<0,05) del 17,3 % para la producción de CH<sub>4</sub> en g, por cada L de leche producido en las vacas del SSP respecto a las del MONO. Los valores de CH<sub>4</sub> (g) por cada L de leche producida para las vacas del SSP coinciden con lo reportado por Salcedo [54], para vacas lechera de alta producción, 11,4 g CH<sub>4</sub> /L/leche producido. Dachraoui [10], encontró producciones de metano de 15,15 y 13,25 gCH<sub>4</sub>/L leche producida, para vacas lecheras suplementadas con dietas

TABLA VIII

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO (GCH<sub>4</sub>/LITRO LECHE), SEGÚN LOS DIFERENTES MODELOS, EN VACAS PASTOREANDO UN SISTEMA SILVOPASTORIL CON BOTÓN DE ORO Y UN MONOCULTIVO DE KIKUYO

Modelo	Media. SSP	EE	Media. MONO	EE	P
Kirchgessner y col (1995)	11,4	0,53	12,5	0,54	0,0490*
Kirchgessner y col. (1991)	11,2	0,64	12,64	0,66	0,0372*
Ellis y col.(2007)	11,15	1,06	14	1,03	0,0439*
Mills y col.(2003)	14,42	1,7	17,06	1,62	0,1006
Tier 2 (IPCC 2006)	14,9	1,85	18,01	1,87	0,0350*

EE= error estándar; a, b valores con superíndice no comunes en la horizontal difieren P<0,05 (Tukey).

convencionales (reygrass italiano (*Lolium multiflorum*), ensilado de maíz (*Zea maíz*), paja de cereal y concentrado) y una dieta denominada alternativa (ensilado de haba (*Vicia faba*) y colza y de maíz, paja y concentrado)

El uso de forrajeras con contenido de taninos como la *Tithonia diversifolia*, han demostrado reducción de metano debido a la acción que estos compuestos ejercen en rumen sobre los microorganismos metanogénicos [15, 63]. Al respecto Dini y col. [11] reportaron que en vacas lecheras pastoreando gramíneas más leguminosas taníferas se encontró reducción en los g CH<sub>4</sub>/L leche (18 g) respecto a 20 g CH<sub>4</sub>/L producido de vacas pastoreando solo gramíneas.

Los sistemas pastoriles en el trópico han sido cuestionados por emitir más cantidad de CH<sub>4</sub> entérico por unidad de producto obtenido, respecto a sistemas de semiestabulación o aquellos basados en el uso de altas cantidades de concentrados [11]. Los sistemas ganaderos bovinos en países tropicales, los cuales basan sus sistemas de alimentación en el pastoreo directo, deben enfrentar el reto de incrementar la productividad animal (carne, leche) para satisfacer la demanda creciente de alimentos [14]. Pero se debe tener en cuenta también, que las estrategias deben ir enfocadas a reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> por unidad de producto animal (g CH<sub>4</sub>/L leche o g CH<sub>4</sub>/kg carne) esto es indicativo de eficiencia productiva y de menor huella de carbono por producto obtenido [34].

Respecto a lo anterior, en países como Australia, el aumento de la PL por vaca y el mejoramiento de la eficiencia productiva de los hatos, ha conllevado a que los animales produzcan en promedio 6000 L/leche/animal/a y se estima que han disminuido su emisión de CH<sub>4</sub> a 24 g CH<sub>4</sub>/Lleche producido [40]. Según Dachraoui [10], adaptado de Vermorel [64], encontró que vacas lecheras con producciones de 6500 kg/leche/a, tuvieron producciones de CH<sub>4</sub> de 442 g de CH<sub>4</sub> d y de 25 g CH<sub>4</sub>/L leche, mientras que en animales que producían 3400 kg/leche/a se encontraron valores de 382 g de metano/d, pero 41,1 g CH<sub>4</sub> L leche producida. Lo anterior demuestra que si la emisión de CH<sub>4</sub> se expresa en función de la PL por unidad de producto obtenido, siempre van a ser más eficientes aquellos animales que más PL tengan. Por lo que maximizar la producción siempre diluye las emisiones de CH<sub>4</sub> en bovinos tipo leche. Chagunda y col [7], según el modelo

de Mills y col [37], encontraron una producción de CH<sub>4</sub>/L leche de 29,3g cuando se suplementaron vacas lecheras con ensilaje de baja calidad nutricional y producciones de 20 g CH<sub>4</sub>/L leche producida cuando se ofrecía a los animales ensilaje catalogado como de alta calidad.

Como se mencionó anteriormente se debe tener en cuenta que el nivel energético de los forrajes, tiene efecto sobre el mejoramiento del balance energía-proteína a nivel ruminal, y por ende sobre la eficiencia para la PL [37]. El nivel energético de la ración es decisivo sobre la cantidad de leche producida/d [7], al respecto en la TABLA II, se puede observar como los forrajes en conjunto del SSP, tienden a ser más energéticos respecto al forraje del MONO. Al analizar los valores de EB (Kcal/kg) y de CNF (%) del kikuyo (4373 y 8,2) y del botón oro (4183 y 19,4) en el SSP vs kikuyo (4360 y 3) del MONO, se entiende que, probablemente las vacas en el SSP consumieron una cantidad total de forraje, más energética respecto al MONO. Por lo anterior, los animales pastoreando en el SSP fueron más eficientes y la producción de CH<sub>4</sub> por unidad de producto (L/leche/d) se vio reducida en dicho sistema (TABLA VIII).

Existen múltiples estrategias para tratar de disminuir la producción de CH<sub>4</sub> en bovinos tipo leche. Una de ellas es el manejo nutricional de la dieta, se ha reportado como la producción de CH<sub>4</sub> entérico depende en gran medida del tipo de alimentación, nivel de consumo y digestibilidad aparente del alimento [56, 59]. Actualmente una de las estrategias nutricionales que han demostrado diversificar la oferta nutricional y ser modificadores de la fermentación ruminal tendiendo a la disminución de la síntesis de metano entérico, es el uso de forrajeras promisorias y la utilización de aditivos que disminuyan la metanogénesis ruminal [15, 31, 47]. Molina y col.[41] encontraron disminución de la producción de CH<sub>4</sub> por unidad de producto (carne y leche) en dos sistemas de producción, uno de engorde de bovinos en trópico y bajo y otro de lechería especializada en trópico alto Colombiano. En ambos sistemas se ofreció a los bovinos *Tithonia diversifolia* como forrajera de ramoneo, según los autores los datos de disminución de CH<sub>4</sub> en parte podría ser explicada por la presencia de metabolitos secundarios que aporta la forrajera. Por otra parte, en varias investigaciones se ha reportado que la suplementación de vacas lecheras con varios tipos de ácidos grasos, ha deprimido la metanogénesis ruminal y por ende la



emisión de CH<sub>4</sub> por animal o por unidad de producto [40, 49]. Lo anterior posiblemente se da por la acción que ejercen sobre todo los AGPI sobre el metabolismo de las bacterias metanogénicas, la reducción del número de protozoos y a través del uso de hidrógeno durante el proceso de biohidrogenación de los ácidos grasos como el oleico, linoleico y linoléico [24].

La combinación de distintos niveles de suplementación lipídica, con la inclusión de especies arbóreas, forrajeras y leguminosas promisorias, en la alimentación de bovinos en pastoreo, es un tema que se viene investigando en la actualidad, debido a las propiedades antimetanogénicas de estos dos componentes [6]. En este experimento, dicha combinación pudo haber favorecido la disminución de CH<sub>4</sub> en las vacas suplementadas con AGPI, tanto en los animales que estuvieron pastoreando en el SSP con *Tithonia diversifolia* como las del monocultivo de kikuyo.

## CONCLUSIONES

Se concluye que los modelos empíricos son una herramienta útil, para tratar de estimar la producción de CH<sub>4</sub> en vacas lecheras. Muchas de las variables que requieren este tipo de modelos, podrían obtenerse con datos tomados en campo.

En esta investigación probablemente hubo un efecto de la combinación; sistema silvopastoril con *Tithonia diversifolia* y la adición de fuentes de AGPI en la disminución de la producción de CH<sub>4</sub> por unidad de producto obtenido. Lo que concede a este tipo de sistema un beneficio ambiental y productivo, relacionándolo sobre todo con el aporte energético de la forrajera, lo que probablemente incide en el mejoramiento del balance energía-proteína en rumen y maximización en la PL. Los datos hallados en este trabajo, son una línea base para el inicio de nuevas investigaciones en sistemas silvopastoriles en el trópico alto de Colombia y para la generación de información sobre estimación de emisiones de metano en sistemas de producción bovina en pastoreo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico brindado por el proyecto CODI 910-2014 Universidad de Antioquia convocatoria programática y por el proyecto "Fortalecimiento de la producción de la cadena láctea del distrito Norte Antioqueño", convenio N° 2012AS180031 firmado entre La Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural del Departamento de Antioquia, Universidad de Antioquia y La Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín) con recursos del Sistema General de Regalías- SGR, para ejecutar este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST - (AOAC). Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Ed. AOAC International, Gaithersburg, MD, USA. 2490 pp. 1999.

- [2] AGUERRE, M; WATTIAUX, M; POWELL, J; BRODERICK, G; ARNDT, C. Effect of forage-to-concentrate ratio in dairy cow diets on emission of methane, carbon dioxide, and ammonia, lactation performance, and manure excretion. **J. Dairy Sci.** 94: 3081-3093. 2011.
- [3] ARCHIBEQUE, S; HAUGEN-KOZYRA, K; JOHNSON, K; KEBREAB, E; POWERS-SCHILLING, W; OLANDER, L; VAN DE BOGERT, A. Near-Term Options for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Livestock Systems in the United States Beef, Dairy, and Swine Production Systems. 2012. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. En línea: <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/near-term-options-for-reducing-greenhouse-gas-emissions-from-livestock-systems-in-the-united-states-paper.pdf>. 10. 11. 16.
- [4] BOADI, D; BENCHAAR, C; CHIQUETTE, J; MASSÉ, D. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. **Can. J. Anim Sci.** 84: 319-335. 2004.
- [5] BONILLA, J; LEMUS, C. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático: Revisión. **Rev. Mex. Cien. Pec.** 3(2): 215-246. 2012.
- [6] CARDONA, L; MAHECHA, L; ANGULO, J. Arbustivas forrajeras y ácidos grasos: estrategias para disminuir la producción de metano entérico en bovinos. **Agron. Mesoam.** 28(1): 273-288. 2016.
- [7] CHAGUNDA, M; FLOKHART, J; ROBERTS, D. The effect of forage quality on predicted enteric methane production from dairy cows. **Int. J. Agr. Sustain.** 8 (4): 250-256. 2010.
- [8] CHASE, L. Methane emissions from dairy cattle. En: **Proceedings of mitigating air emissions from animal feeding operations conference**. Muhlbauer, E; Moody, L; Burns, R. (Eds.). College of Agriculture and Life Sciences, IA. Des Moines, Iowa, 05/19-21. USA, Pp 106-109. 2008.
- [9] CORREA, H; PABÓN, M; CARULLA, J. Valor nutricional del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov.) para la producción de leche en Colombia (Una revisión): I - Composición química y digestibilidad ruminal y posruminal. **Livestock. Res. Rural Dev.** 20 (4): 41. 2008.
- [10] DACHRAOUI, M. Comparación de diferentes modelos de predicción de emisión de gases de efecto invernadero por vacas lecheras alimentadas con dietas basadas en ensilado de raigrás italiano o ensilado de haba y colza forrajera. Universidad Zaragoza, España. Tesis de Grado, 104 pp. 2015.
- [11] DINI, Y; GERE, J; BRIANO, C; MANETTI, M; JULIARENA, P; PICASSO, V; ASTIGARRAGA, L. Methane emission and milk production of dairy cows grazing pastures rich in legumes or rich in grasses in Uruguay. **Anim.** 2(2): 288-300. 2012.

- [12] DOHME, F; MACHMÜLLER, A; WASSERFALLEN, A; KREUZER, M. Comparative efficiency of various fats rich in medium-chain fatty acids to suppress ruminal methanogenesis as measured with RUSITEC. **Can. J. Anim. Sci.** 80: 473-482. 2000.
- [13] ELLIS, J; KEBREAB, E; ODONGO, N; MCBRIDE, B; OKINE, E; FRANCE, J. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. **J. Dairy Sci.** 90: 3456-3467. 2007.
- [14] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). El papel del ganado en el cambio climático y en la contaminación atmosférica. En: **La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones**. Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M. (Eds.). FAO, Roma, Pp 86-139. 2009.
- [15] GALLEGO, L; MAHECHA, L; ANGULO, J. Potencial forrajero de *Tithonia diversifolia* Hemsl. A Gray en la producción de vacas lecheras. **Agron. Mesoam.** 25 (2): 393-403. 2014.
- [16] GIGER, S; MORAND, P; TRAN, G. Literature survey of the influence of dietary fat composition on methane production in dairy cattle. **Livest. Prod. Sci.** 82:73-79. 2003.
- [17] HALES, K; COLE, N; MACDONALD, J. Effects of corn processing method and dietary inclusion of wet distillers grains with solubles on energy metabolism, carbon-nitrogen balance, and methane emissions of cattle. **J. Anim. Sci.** 90: 3174-3185. 2012.
- [18] HAYDOCK, K; SHAW, N. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. **Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.** 15: 663-670. 1975.
- [19] HRISTOV, A; LEE, C; HRISTOVA, R; HUHTANEN, P; FIRKINS, J. A meta-analysis of variability in continuous-culture ruminal fermentation and digestibility data. **J. Dairy Sci.** 95: 5299-5307. 2012.
- [20] HUHTANEN, P; KRIZSAN, S; HETTA, M; CABEZAS, E; Repeatability and between cow variability of enteric CH<sub>4</sub> and total CO<sub>2</sub> emissions. **Adv. Anim. Biosci.** 4: 588. 2013.
- [21] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. En: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. Kanagawa. (Eds.). IGES, Japan. 673 pp. 2006.
- [22] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. En: **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Tignor, M., Averyt, C., Miller, H. (Eds.). Cambridge University Press, New York, Pp. 212-213. 2007.
- [23] JAIMES, L; CERÓN, J; CORREA, H. Efecto de la época del año y la etapa de lactancia sobre el consumo alimenticio de vacas Holstein pastoreando Kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) en Colombia. **Livest. Res. Rural Dev.** 27(244): 1-20. 2015.
- [24] JALC, D; CERTIK, M; KUNDRIKOVA, K; NAMESTROVA, P. Effect of unsaturated C18 fatty acids (oleic, linoleic, and  $\alpha$ -linolenic acid) on ruminal fermentation and production of fatty acid isomers in an artificial rumen. **Vet. Med.** 52(3): 87-94. 2007.
- [25] JOHNSON, K; JOHNSON, D. Methane emissions from cattle. **J. Anim Sci.** 73: 2483-2492. 1995.
- [26] JOUANY, J. Methods of manipulating the microbial metabolism in the rumen. **Ann. Zoot.** 43 (1): 49-62. 1994.
- [27] KIRCHGENER, M; WINDISCH, W; MÜLLER, H. Nutritional factors for the quantification of methane production. In: **Ruminant Physiology: Digestion, Metabolism, Growth and Reproduction: Proceedings of the Eighth International Symposium on Ruminant Physiology**. Von Engelhardt, W; Leonhard-Marek, S; Breves, G; Giesecke, D. (Eds). Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. Pp 333-348. 1995.
- [28] KIRCHGESSNER, M; WINDISCH, W; MÜLLER, H; KREUZER, M. Release of methane and of carbon dioxide by dairy cattle. **Agribiol. Res.** 44: 91-102. 1991.
- [29] LASSEY, K. Livestock methane emission: From the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. **Agr. Forest. Meteorol.** 142: 120-132. 2007.
- [30] LENG, R. Quantitative ruminant nutrition – A green science. **Aust. J. Agr.** 44: 363-380. 1993.
- [31] LEZCANO, Y; SOCA, M; SÁNCHEZ, L; OJEDA, F; OLIVERA, Y; FONTES, D; MONTEJO, I; SANTANA, H. Caracterización cualitativa del contenido de metabolitos secundarios en la fracción comestible de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. **Pastos y Forrajes.** 35(3): 283-291. 2012.
- [32] LIPPKE, H. Estimation of forage intake by ruminants on pasture. **Crop. Sci.** 42: 869-872. 2002.
- [33] MAHECHA, L; DURÁN, C; ROSALES, M. Análisis de la relación planta-animal desde el punto de vista nutricional en un sistema silvopastoril de *Cynodon plectostachyus*, *Leucaena leucocephala* y *Prosopis juliflora* en el Valle del Cauca. **Acta. Agron.** 50: 59-70. 2000.
- [34] MAKKAR, H., VERCOCOE, P. Measuring Methane Production from Ruminants. Joint FAO/IAEA. Springer, Viena. 135 pp. 2007.
- [35] MARÍN, A. Estimación del inventario de emisiones de metano entérico de ganado lechero en el departamento de Antioquia, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Tesis de Grado. 115 pp. 2013.
- [36] MEDINA, M; GARCÍA, E; GONZÁLEZ, L; COVA, L; MORANTINOS, P. Variables morfo-estructurales y de calidad de la biomasa de *Tithonia diversifolia* en la etapa inicial de crecimiento. **Zoot. Trop.** 27:121- 134. 2009.

- [37] MILES, N; THURTELL, L; RIEKERT, S. Quality of Kikuyu herbage from pastures in the Eastern Cape coastal belt of South Africa. **S. Afr. J. Anim. Sci.** 30 (1): 85–86. 2000.
- [38] MILLIKEN, G; JOHNSON, D. Analysis of Messy Data. In: **Designed Experiments**. 2nd Ed. CRC Press, Kansas. 674 pp. 2009.
- [39] MILLS, J; KEBREAB, E; YATES, C; CROMPTON, L; CAMMELL, S; DHANOA, M; AGNEW, R; FRANZIA, J. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. **J. Anim Sci.** 81: 3141–3150. 2003.
- [40] MOATE, P. Reducing methane emissions from dairy cows. Gippsland. 2010. Economic Development, Jobs, Transport and Resources, Victoria State Government. En línea: <http://www.dpi.vic.gov.au/agriculture/about-agriculture/newsletters-andupdates/newsletters/how-now-gippy-cow/september/reducing-methaneemissions-from-dairy-cows>. 6. 10. 16.
- [41] MOLINA, I; DONNEY'S, G; MONTOYA, S; VILLEGAS, G; RIVERA, J; LOPERA, J; CHARÁ, J; BARAHONA, R. Emisiones in vivo de metano en sistemas de producción con y sin inclusión de *Tithonia diversifolia*. **3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales**. Misiones, 05/7-9. Argentina: Pp 678-682. 2015.
- [42] MONTOYA, S; VILLEGAS, G; MOLINA, I; DONEYS, G; CHARÁ, J; BARAHONA, R. Comparación del consumo de forraje y agua y sus correlaciones en un sistema silvopastoril intensivo y uno convencional en tres regiones de Colombia. **3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales**. Misiones, 05/7-9. Argentina: Pp 117-122. 2015.
- [43] MUÑOZ, C; YAN, T; WILLS, D; MURRAY, S; GORDON, A. Comparison of the sulphur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows. **J. Dairy Sci.** 95: 3139–3148. 2012.
- [44] NIELSEN, N; VOLDEN, H; ÅKERLIND, M; BRASK, M; HELLWING, A; STORLIEN, T; BERTILSSON, J. A prediction equation for enteric methane emission from dairy cows for use in NorFor. **Acta. Agric. Scand. A. Anim. Sci.** 63: 126-130. 2013.
- [45] NOGUERA, R; POSADA, S; CARDONA, L. Efecto de diferentes niveles de nitrato de calcio sobre la degradación de la materia seca y la producción de metano en una fermentación ruminal *in vitro* de pasto Kikuyu (*Cenchrus clandestinus* Hochst. Ex Chiov.). **Livest. Res. Rural Dev.** 28(92):1-15. 2016.
- [46] ORSKOV, E; DEB-HOVELL, F; MOULD, F. The use of nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. **Trop. Anim. Prod.** 5(3): 195-213. 1980.
- [47] ORTIZ, D; POSADA, S; NOGUERA, R. Efecto de metabolitos secundarios de las plantas sobre la emisión entérica de metano en rumiantes. **Livest. Res. Rural Dev.** 26 (11): 1-15. 2014.
- [48] PATRA, A. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. **Livest. Sci.** 155: 244–254. 2013.
- [49] PIRONDINI, M; COLOMBINI, S; MELE, M; MALAGUTTI, L; RAPETTI, L; GALASSI, G; CROVETTO, G. Effect of dietary starch concentration and fish oil supplementation on milk yield and composition, diet digestibility, and methane emissions in lactating dairy cows. **J. Dairy Sci.** 98: 357–372. 2015.
- [50] PULIDO, A; JIMÉNEZ, R; TURRIAGO, J; MENDOZA, J. Tercera comunicación nacional de cambio climático. Inventario nacional de gases efecto invernadero (GEI) Colombia. 2015. IDEAM. Bogotá D.C. En línea: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla\\_INGEI.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf). 14. 11. 16.
- [51] RAMIN, M; HUHTANEN, P. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. **J. Dairy Sci.** 96: 2476-2493. 2013.
- [52] RESTREPO, C; NOGUERA, R; POSADA, S. Ecuaciones para predecir metano en ganado lechero: Un metaanálisis. **Livest. Res. Rural Dev.** 28(129): 1-20. 2016.
- [53] RIVERA, J; ARENAS, F; CUARTAS, C; NARANJO, J; TAFUR, O; HURTADO, E; GACHARNA, N; ZAMBRANO, F; MURGUEITIO, E. Producción y calidad de leche bovina en un sistema de pastoreo en monocultivo y un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) compuesto de *Tithonia diversifolia* bajo ramoneo directo, *Brachiaria* spp, y árboles maderables en el piedemonte amazónico. **Rev. Col. Cien. Pec.** 24 (3): 524. 2011.
- [54] SALCEDO, G. Estimación de las pérdidas de metano entérico en las explotaciones lecheras de Cantabria, España. 2010. Dpto. Tecnología Agraria del I.E.S. "La Granja". Cantabria. En línea: <http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t116.pdf>. 5. 11. 16.
- [55] STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE (SAS). Version 9.1.3. USA. 2004.
- [56] SECHEN, S; BAUMAN, D; TYRRELL, H; REYNOLDS, P. Effect of Somatotropin on Kinetics of Nonesterified Fatty Acids and Partition of Energy, Carbon, and Nitrogen in Lactating Dairy Cows 1, 2. **J. Dairy Sci.** 72(1): 59-67. 1989.
- [57] SHARMA, R. Nutritional strategies for reducing methane production by ruminants. **Indian. J. Res.** 4(1): 1-20. 2005.
- [58] SILVA, L; TORRECILHAS, J; GARCIA, M; EIRAS, C; PRADO, R; PRADO, I. Glycerin and essential oils in the diet of Nellore bulls finished in feedlot: animal performance and apparent digestibility. **Acta Sci. Anim. Sci.** 36(2): 177-184. 2014.

- [59] SOLIVA, C; HESS, H. Measuring methane emission of ruminants by *in vitro* and *in vivo* techniques. En: **Measuring methane production from ruminants**. Makkar, H; Vercoe, P. (Eds). Springer, Viena. Pp 15-31. 2007.
- [60] TARAZONA, A; CEBALLOS, M; NARANJO, J; CUARTAS, C. Factors affecting forage intake and selectivity in ruminants. **Rev. Col. Cien. Pec.** 25(3): 473-487. 2012.
- [61] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. 2010. En línea: <http://www.epa.gov/methane/sources.html>. 18. 11. 16.
- [62] VAN, J; DENTENER, J; OLIVIER, J; KLEIN, C; LELIEVELD, J. A High-Resolution Dataset of Historical Anthropogenic Trace Gas Emissions for the Period 1890-1990. **Global Biogeochem. Cycles.** 15(4): 909-28. 2001.
- [63] VARGAS, J; CÁRDENAS, E; PABÓN, M; CARULLA, J. Emisión de metano entérico en rumiantes en pastoreo. **Arch Zoot.** 61:51-66. 2012.
- [64] VERMOREL, M. Emissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production. **INRA. Prod. Anim.** 8: 265-272. 1995.
- [65] WESTBERG, H; LAMB, B; JOHNSON, K; HUYLER, M. Inventory of methane emissions from U.S. cattle. **J. Geophys. Res.** 106: 12633-12642. 2001.