

Ecuaciones para predecir metano en ganado lechero: Un meta-análisis

C Restrepo¹, R R Noguera y S L Posada

*Grupo de Investigación en Ciencias Agrarias-GRICA, Facultad de Ciencias Agrarias,
Universidad de Antioquia, AA 1226, Medellín, Colombia*

¹ *Solla S. A, Carrera 42 No. 33- 80 Itagüí, Colombia*

catalinarpoa@gmail.com

Resumen

El objetivo de este estudio fue generar ecuaciones a partir de datos crudos de composición química y digestibilidad de la dieta, consumo de alimento, producción de leche y parámetros ruminales para predecir la producción de metano (CH₄) en ganado de leche, a través de un meta-análisis. Se realizó una revisión de literatura para la construcción de la base de datos, conformada por un total de 44 estudios con 114 datos; el programa estadístico SAS (2001) sólo tomó 16 estudios con 47 observaciones. De un total de 27 variables, fueron escogidas mediante criterio propio del investigador y a través de un análisis de componentes principales 5 variables predictoras sin transformar y transformadas, estas últimas denotadas con la letra (t); PC: proteína cruda, FDN: fibra en detergente neutro, CMS: consumo de materia seca, F: C (relación forraje: concentrado), EB: energía bruta y kg de leche, esta última, no tuvo que ser transformada, para un total de 6 variables. Se realizó un análisis de efectos mixtos, tomando como efecto aleatorio el estudio, para correr todos los posibles modelos, seleccionando aquel modelo que presentara menor valor para los criterios de información Akaike (AIC) y bayesiano (BIC) y el mayor valor de coeficiente de determinación (R²) y menor valor del cuadrado medio del error de predicción (CMEP).

Se puede concluir que la variable con valor de p significativo, < 0.05 fue el consumo de materia seca (CMS) y las otras variables seleccionadas aunque no fueron significativas estadísticamente, aportan desde el punto de vista nutricional a la generación producción CH₄ y a la predicción de las ecuaciones.

Palabras claves: *consumo de materia seca, dieta, producción leche*

Equations for predicting methane in dairy cattle diet: a meta-analysis

Summary

The objective of this study was to generate equations from raw data of chemical composition and digestibility of the diet, feed intake, milk production and rumen parameters to predict the production of methane (CH₄) in dairy cattle, through a meta-analysis. A literature review for the construction of the database was performed, where a total of 44 studies with 114 data; SAS (2001) statistical program only took 16 studies with 47 observations. A total of 27 variables were chosen by the own discretion of the investigator and by a principal component analysis 5 predictors

unprocessed and processed variables, the latter denoted with a (t); PC: crude protein, NDF: neutral detergent fiber, dry matter intake CMS: DMI, F: C (proportion forage: concentrate), EB: gross energy and Kg of milk, the last one, did not have to be transformed, for a total of 6 variables. An analysis of mixed effects, taking as a random effect study, to run all possible models, selecting that model to present less value to the information criteria Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) and the highest value of coefficient of determination (R^2) and the lower value of the mean squared prediction error (CMEP: MSPE).

It can be concluded that the variable with p significant value <0.05 was DMI and other selected variables although they were not statistically significant, contribute from the nutritional point of view to generating production of CH_4 and prediction equations.

Keywords: *dry matter intake, diet, milk production*

Introducción

El gas metano (CH_4) forma parte de los gases con efecto invernadero (GEI) y tiene un aporte importante en el calentamiento global y en el cambio climático (Johnson y Johnson 1995). Los rumiantes producen CH_4 durante la fermentación entérica y a partir de estiércol almacenado se produce CH_4 y N_2O (óxido nitroso) (Lesschen et al 2011), contribuyendo en aproximadamente un 28% de todas las fuentes antropogénicas de emisiones de CH_4 (Beauchemin et al 2008).

El CH_4 producido por los rumiantes representa una pérdida energética para el animal, que puede variar de 2 a 12%, dependiendo del consumo de alimento, composición y calidad de la dieta, origen genético y uso de aditivos (Johnson y Johnson 1995). Por lo tanto una porción de la producción de CH_4 entérico en los rumiantes puede ser manipulada y esta disminución usualmente está asociada a una mayor productividad (Leng 1993).

Para evaluar las producciones de CH_4 bajo diferentes estrategias de mitigación, se requiere de un método preciso, confiable y de fácil manejo. El método más común para cuantificar las emisiones de CH_4 es la cámara respirométrica (Verstegen et al 1987), pues permite obtener mediciones confiables y precisas sobre los gases producidos; unas de las desventajas de este método de cuantificación de gases es que sólo tiene animales en confinamiento y es una técnica de alto costo (Berends et al 2014). Para corregir las desventajas anteriores, existe otra técnica ampliamente utilizada: la del trazador con hexafluoruro de azufre (SF_6), desarrollada a principios de 1990 para permitir mediciones en pastoreo (Johnson et al 2007). Existe otra estrategia a través de modelos matemáticos para predecir la producción de CH_4 de ganado vacuno, sin llevar a cabo una gran cantidad de experimentos que son costosos (Ellis et al 2007).

El meta-análisis utiliza modelos matemáticos y es identificado por el uso de métodos estadísticos que integran cuantitativamente los resultados de un conjunto de estudios empíricos sobre un mismo problema de investigación (Martín et al 2006). El alcance de una revisión determina en gran medida, el grado en el cual los estudios incluidos en una revisión son diferentes (Iberoamericano 2012). Por tal razón se necesita de una metodología rápida y económica, donde a través de datos crudos de composición química de la dieta y parámetros de digestibilidad se pueda predecir un valor cercano al real de producción de CH_4 . Para ello el objetivo de este trabajo fue generar ecuaciones de predicción de CH_4 entérico a través de un meta-análisis.

Materiales y métodos

Construcción de la base de datos

Se realizó una búsqueda en literatura electrónica para identificar los estudios realizados entre enero de 2005 y enero de 2015. Se utilizaron los siguientes buscadores por internet: Journal of Dairy Science, Acta Agriculturae Scandinavica: Section A, Animal Science, Canadian Journal of Animal Science, Revista Animals (vía EBSCOhost), PubMed (a través de Internet), Journal of Dairy Science, Livestock Science y Animal Feed Science and Technology (por medio de Science Direct), y las siguientes revistas: revista Animal (de Journals Cambridge), Journal of Dairy Science, Livestock Science y Animal Feed Science and Technology y una tesis de [Swedish University of Agricultural Sciences](#). Las combinaciones de palabras claves fueron (methane), (methane dairy), (methane dairy chamber), (methane dairy AND SF₆) y (methane SF₆).

Los criterios de inclusión para los estudios que fueron utilizados en la base de datos debían cumplir con lo siguiente: (1) las poblaciones estudiadas fueron vacas lactantes tipo leche y se incluyeron razas como Holstein, Rojo Sueco, Jersey y Pardo Suizo; (2) la información sobre la composición de la dieta debía tener reportada al menos 4 de las variables a continuación: % de Materia seca (MS), % de Materia orgánica (MO), % de proteína cruda (PC), % de fibra en detergente neutro (FDN), % de fibra en detergente ácido (FDA), concentración de Energía bruta (EB) y las digestibilidades de cada fracción; Energía neta de lactancia (ENL) Mcal/kg calculada a partir de las fórmulas del NRC (2001) que relacionan el % de total de nutrientes digestibles (TDN), energía metabolizable y/o digestible (EM o ED), pH ruminal y ácidos grasos volátiles (AGVs); (3) Era necesario que la literatura revisada reportara la producción de leche en kg leche vaca/día, consumo de materia seca (CMS) kg/día, medición de CH₄ entérico en g o L/animal/día, por medio de cámara respirométrica y/o técnica de hexafluoruro de azufre SF₆.

Se excluyeron los estudios que, aun teniendo las anteriores condiciones, presentaron alguna de las siguientes condiciones: (1) Tratamientos que tuvieran aditivos y/o materias primas con posibles propiedades antimetanogénicos como: ionóforos (lasalocid, salinomycin y monensina), enzimas fibrólíticas, ácido fumárico, taninos, saponinas, algunos aceites esenciales, etc (Sauer et al 1998; Patra 2010; Chung et al 2012; Place et al 2013), pero se tuvo presente de dichos artículos la dieta control; (2) Mediciones de CH₄ con láser, capucha de ventilación, técnica in vitro: producción de gases, Rusitec y reporte de CH₄ por ecuaciones de predicción, también fueron excluidos (Mills et al 2001; Posada et al 2006; Ellis et al 2007; Chagunda et al 2009; Place et al 2011; Avila et al 2014).

Selección de estudios

De un total de 745 resultados, se seleccionaron 44 estudios para un total de 114 datos; el programa estadístico SAS (2001) sólo tomó 16 estudios que contenían toda la información de las variables escogidas, pues no en todos los trabajos revisados existía información de todas las variables requeridas.

De las 27 variables descritas en la Tabla 1, fueron escogidas mediante criterio propio del investigador y a través de un análisis de componentes principales las siguientes 5 variables predictoras sin transformar y transformadas, estas últimas denotadas con la letra (t): PC: proteína cruda, FDN: fibra en detergente neutro, CMS: consumo de materia seca, F:C (relación forraje: concentrado) que para el cálculo de las ecuaciones de predicción se eliminó esta relación, cuando las dietas se basaban solo en forraje (100%), para evitar sesgos, EB: energía bruta y 1 variable sin transformar debido a que presentó normalidad: Kg leche, para un total de 6 variables.

Diseño estadístico

Para explicar la producción de CH_4 se corrieron todos los posibles modelos, seleccionando aquel modelo que presentara menor valor para los criterios AIC y BIC (Milliken y Johnson 2009; Patra 2013) y el mayor valor de coeficiente de determinación (R^2), con el objetivo de eliminar variables con alta correlación que no aportaran al modelo de predicción. Para mejorar la medida de ajuste del modelo se realizó la transformación en algunas de las variables predictoras y la producción de CH_4 , debido a la alta dispersión de los datos. Las transformaciones de las variables se realizaron utilizando el procedimiento de Box y Cox (1964), que consiste en encontrar un λ tal que:

$$T(X) = Y = \begin{cases} \frac{X^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln X & \lambda = 0 \end{cases}$$

Buscando que la variable transformada tenga una distribución:

$$Y \equiv X^{(\lambda)} \sim N(\mu, \sigma^2)$$

Los λ para las transformaciones fueron encontrados utilizando el comando boxcox de la librería car de R-project (2012).

Los diferentes modelos mixtos comparados consideraron, como efectos fijos las diferentes variables relacionadas con la dieta y de los animales (parámetros ruminales) y como efecto aleatorio los diferentes estudios, y fueron corridos utilizando el procedimiento PROC MIXED (SAS 2001). El modelo en términos matriciales se puede expresar como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\boldsymbol{\mu} + \mathbf{e}$$

Donde \mathbf{y} corresponde a un vector de observaciones de la producción de metano, \mathbf{X} y \mathbf{Z} son una matriz que contiene las observaciones de las variables regresoras y una matriz de incidencia que se relaciona con los estudios, respectivamente. $\boldsymbol{\beta}$ es un vector de soluciones de los efectos fijos o pendientes de la regresión (de las variables independientes), $\boldsymbol{\mu}$ es la solución del efecto aleatorio de estudio y es un vector aleatorio que hace referencia a los efectos residuales.

El estudio se consideró dentro del modelo como un efecto aleatorio debido principalmente a que ignorar el efecto del estudio causa sesgos en los parámetros de estimación (pendientes e intercepto) de los modelos de regresión y por lo tanto se podría incurrir en el error tipo II (St-Pierre 2001). Cualquier tipo de variabilidad entre los estudios de una revisión sistemática se le puede llamar heterogeneidad, esta surge de la diversidad metodológica, o las diferencias en las evaluaciones de resultados indicando que no todos los estudios están calculando la misma cantidad, pero no indica necesariamente que el efecto verdadero de la intervención varíe. Por lo tanto, si se considera un modelo de efectos aleatorios este no “toma en cuenta” la heterogeneidad, en el sentido de que deja de ser un problema, pues allí se toma cada estudio como efecto aleatorio (Iberoamericano 2012).

La programación en SAS (2001) se describe a continuación:

```

DATAUNO;
PROC MIXED data=uno COVTEST NOCLPRINT NOITPRINT;
TITLE "predicción de metano con 16 estudios";
CLASS Study;
MODEL CH4 = PC FDN CMS kgleche FC EB/SOLUTION outp=salida;
RANDOM Study/type=VC solution;
RUN;

```

Se usó el procedimiento para efectos mixtos (fijos y aleatorios) PROC MIXED, NOCLPRINT como comando de control de impresión de la información, COVTEST permite analizar los componentes de la varianza y covarianza, VC es la estructura de covarianza y la instrucción RANDOM coloca al estudio como efecto aleatorio, basados en lo descrito por St-Pierre (2001).

Para generar solo el intercepto la programación en SAS (2001) fue:

```

DATAUNO;
PROC MIXED data=uno COVTEST NOCLPRINT NOITPRINT;
TITLE "solo el intercepto";
CLASS Study;
MODEL CH4 = /SOLUTION outp=salida;
RANDOM Study/type=VC solution;
RUN;

```

Para elegir el modelo más correcto se consideró aquel que presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2) según lo descrito por Nakagawa y Schielzeth (2013), que resulta de restarle a 1 la relación entre el valor de menos dos veces la verosimilitud del modelo con todos los efectos

(L_{β}) y el valor de menos dos veces la verosimilitud del modelo con solo el intercepto (L_0),

$$R^2 = 1 - \frac{-2\ln(L_{\beta})}{-2\ln(L_0)}$$

También se consideró el valor más bajo de los criterios de información bayesiana (AIC y BIC), (Milliken y Johnson 2009; Patra, 2013) y el valor más bajo de (CMEP o MSPE) obtenido con la fórmula:

$$MSPE = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2/n$$

Donde O_i es el valor observado, P_i es el valor predicho y n es el número de observaciones

Una vez obtenido el mejor modelo se realizaron los respectivos análisis para evaluar que cumpliera con los supuestos de normalidad de los residuales (prueba de shapiro-wilk), heterogeneidad de varianza (test de levene) y de independencia (se asumió por el origen de los datos).

Resultados

En un modelo realizado previamente se incluyó la técnica de medición, SF₆ y cámara respirométrica, pero esta inclusión no fue significativa, por lo que fue retirada de las variables predictoras, pues el objetivo de estas ecuaciones de predicción es para usos rápidos y económicos en campo.

Una descripción de los factores de los animales y de la dieta recogidos y utilizados para realizar el meta-análisis sin transformar, se presenta en la Tabla 1. Los valores atípicos fueron eliminados para la generación de los modelos de predicción.

Tabla 1. Descripción estadística de las características de la dieta y de parámetros animales en el conjunto de datos utilizados para predecir la producción de CH₄.

Variable	n	Media	DE	Mín.	Max.
Composición de la dieta, % de la MS					
MS %	63	43.9	20.4	14.5	89.8
MO, % MS	51	92.1	1.97	84.6	94.8
PC, % MS	86	16.7	2.13	13.3	21.9
FDN, % MS	108	39.4	6.99	25.3	59.0
FDA, % MS	90	23.9	3.80	16.2	35.0
EB, Mcal	67	4.41	0.178	3.99	4.92
ENL, Mcal/kg	58	1.60	0.140	1.20	1.90
Consumo de alimento					
CMS, kg/día	108	18.9	3.22	13.4	28.3
Relación F:C	96	2.39	2.01	0.220	14.0
Leche, kg/día	104	24.8	6.54	12.8	39.8
MS dig, kg	32	14.2	2.57	8.95	18.7
MO dig, Kg	43	12.6	2.62	8.12	17.9
PC dig, kg	34	2.06	0.600	0.570	3.32
FDN dig, kg	51	4.54	1.06	2.59	7.46
FDA dig, kg	24	2.55	0.720	1.38	3.69
EB Consumida, Mcal/kg	71	78.4	15.91	42.1	120
Digestibilidad de la dieta					
dig CMS	32	66.9	5.39	49.2	75.3
dig MO %	59	73.0	6.80	52.0	85.9
dig PC %	34	65.8	7.48	47.1	83.0
dig FDN %	51	62.3	12.4	36.5	86.5
dig FDA %	24	55.0	13.4	31.8	78.1
Parámetros ruminales					
pH	49	6.39	0.300	5.92	7.04
Ace, mM	54	65.0	11.7	40.1	89.6
prop, mM	54	21.2	5.89	9.57	32.0
ace:prop	54	3.20	0.640	2.16	4.57
Producción de CH₄					
CH ₄ , g/día	108	380	84.6	233	648
CH ₄ /CMS, g/kg	108	20.4	4.19	8.50	36.3

MS: Materia seca, MO: Materia orgánica, PC: Proteína cruda, FDN: Fibra en detergente neutro, FDA: Fibra en detergente ácido, EB: Energía Bruta, ENL: Energía neta de lactancia, CMS: consumo de materia seca, Relación (%/%) F:C: Forraje: Concentrado, dig: digestible, ace: acético, prop: propiónico. mM: milimolar

La Tabla 2 presenta las variables escogidas y algunas de ellas transformadas, para la generación de las ecuaciones de predicción de CH₄.

Tabla 2. Descripción estadística de los datos utilizados para predecir la producción de CH₄ (transformados:t)

Variable	n	Media	DE	Min.	Max.	*(λ)
Composición de la dieta % MS						
PCt	86	0.439	0.000198	0.439	0.440	-2.273
FDNt	108	2.85	0.105	2.59	3.10	-0.141
EBt, Mcal	67	0.207	0.0000307	0.207	0.207	-4.818
Consumo de alimento						
CMSt	108	1.19	0.0184	1.15	1.23	-0.747
Relación ¹ F:Ct	96	0.619	0.705	-1.51	2.64	NA
Leche, kg/día ²	104	24.8	6.54	12.8	39.8	NA
FDN dig, kg ²	51	4.54	1.06	2.59	7.46	NA
Producción de CH ₄						
CH ₄ t	108	2.26	0.0202	2.22	2.31	-0.400

¹ la variable F:C, precisa transformación por logaritmo natural

² Variables que cumplen supuesto de normalidad, por lo tanto no requieren transformación

* (λ): valor de lambda por transformación Box cox

NA: no aplica

Los diferentes modelos seleccionados, con el procedimiento PROC MIXED, con el estudio como efecto aleatorio, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelos propuestos para predecir la producción de CH₄

* Ecuación	RV ¹	SV ²	AIC ³	BIC ⁴	R ²	CMEP ⁵
A CH ₄ = PCt+FDNt+CMSt+KgLeche+FCt+EBt	515	2447	370	372	0.681	316
B CH ₄ = PC+FDN+CMS+KgLeche+FC+EB	572	2292	430	432	0.630	354
C CH ₄ = PCt+FDNt+CMSt+FCt+EBt	505	2364	375	376	0.678	317
D CH ₄ = PC+FDN+CMS+FC+EB	557	2261	434	436	0.626	351
E CH ₄ t= PCt+FDNt+CMSt+KgLeche+FCt+Ebt	0.000042	0.000188	-283.1	-282	0.537	0.0000256

* Identificación de la ecuación, en todas las ecuaciones hay un total de 16 estudios con 47 observaciones

¹ Varianza residual; ² Componente de varianza atribuible al efecto del estudio; ³ Criterio de información Akaike

⁴ Criterio de información Bayesiana; ⁵ Cuadrado medio del error de predicción, siglas en inglés (MSPE: mean square prediction error); R²: coeficiente de determinación CH₄: metano, PC: Proteína cruda, FDN: Fibra en detergente neutro, EB: Energía Bruta, CMS: consumo de materia seca, Relación (%/%) F: C: Forraje: Concentrado; t: variable transformada.

En todas las ecuaciones de regresión, la única variable significativa fue el CMSt y CMS, con un valor p < 0.05. Por alta correlación con la FDN, la variable kg de FDN digestible fue excluida de los modelos, las otras variables no incluidas en la tabla 3, pertenecientes a la tabla 1, no presentaban todas las observaciones requeridas, por lo tanto tampoco fueron incluidas en los modelos.

Para retransformar (Y t*) las variables transformadas que tienen la letra t, se usa la siguiente fórmula según sea el caso, de acuerdo a los valores λ , que se hayan obtenido en la transformación box cox de las variables:

$$Y_{t^*} = \begin{cases} (\lambda Y_t + 1)^{1/\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \exp(Y_t) & \lambda = 0 \end{cases}$$

exp: exponencial, se usa cuando la transformación se hizo por logaritmo natural (ln)

Las ecuaciones de cada modelo de la tabla 3. Son descritas a continuación:

Ecuación de regresión (A):

$$CH_4 = -83792 + 34958 (PCt) + 117.73 (FDNt) + 2505.49 (DMI_t) + 0.01596 (kgleche) + 3.2213 (FCt) + 315835 (GrossEt)$$

Ecuación de regresión (B), con las variables sin transformar:

$$CH_4 = -157.95 + 1.8241 (PC) + 1.8244 (FDN) + 13.2360 (DMI) + 0.7965 (kgleche) + 1.1647 (FC) + 35.1557 (GrossE)$$

Ecuación de regresión (C), sin kg de leche:

$$CH_4 = -84431 + 34555 (PCt) + 117.85 (FDNt) + 2508 (DMI_t) + 3.2194 (FCt) + 319752 (GrossEt)$$

Ecuación de regresión (D), con las variables sin transformar y sin kg de leche:

$$CH_4 = -185.96 + 1.7020 (PC) + 1.7351 (FDN) + 14.0532 (DMI) + 0.8620 (FC) + 44.0221 (GrossE)$$

Ecuación de regresión (E), con el CH_4t transformada:

$$CH_{4t} = -20.7820 + 9.4983 (PCt) + 0.03388 (FDNt) + 0.6921 (DMI_t) - 0.00014 (kgleche) + 0.001408 (FCt) + 86.5975 (GrossEt)$$

Para utilizar la ecuación que tenga variables transformadas (t), se deben tener en cuenta los λ o método de transformación de datos obtenidos por el investigador; en este estudio los valores están en la tabla 2. de cada variable transformada.

Para ilustrar la relación de los valores predichos y observados, solo se presentan gráficamente las ecuaciones A y B en las figuras 1 y 2 respectivamente.

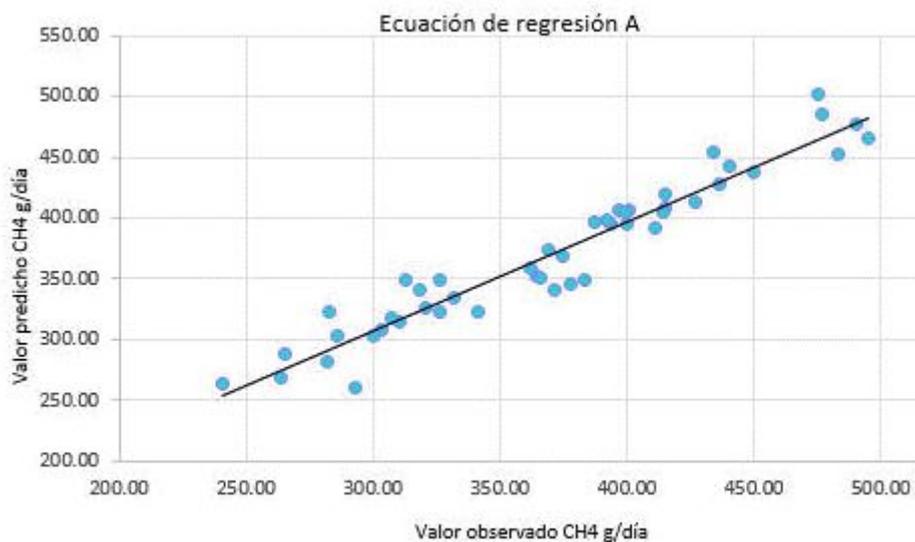


Figura 1. Relación entre el valor predicho y observado (CH_4 g/día), ecuación A

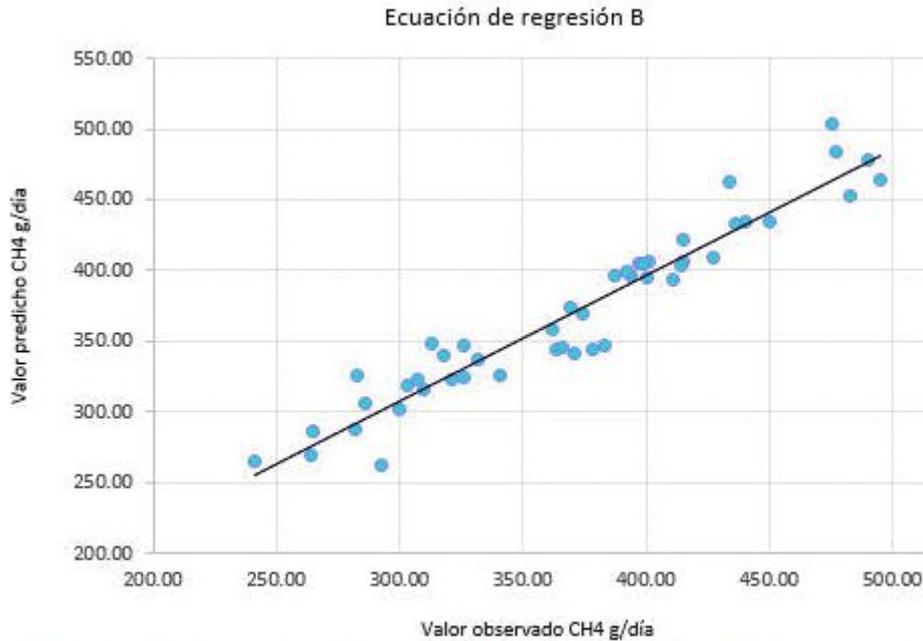


Figura 2. Relación entre el valor predicho y observado (CH_4 g/día), ecuación B

Discusión

En otros estudios (Mills et al 2003; Ellis et al 2007; Patra 2013; Ramin y Huhtanen 2013), encontraron que el CMS predijo la producción de CH_4 con un R^2 de 0.64 hasta 0.85, seguido del consumo de energía metabolizable con un R^2 de 0.53, % de FDN de la dieta con un R^2 de 0.44 y % de FDA de la dieta con un R^2 de 0.34 hasta 0.4, lo que indica que el uso de las variables predictoras CMS y FDN usadas en este análisis concuerda con lo usado por otros autores y tienen un buen aporte en la predicción de CH_4 .

Las mejores ecuaciones A, C y B estuvieron relacionadas con un alto R^2 (0.681, 0.678 y 0.630) y menores valores de BIC (372, 376 y 432) y CMEP (316, 317 y 354) respectivamente, lo anterior concuerda con lo encontrado en las mejores ecuaciones de predicción de Ellis et al (2007), donde incluían el CMS y también fueron escogidas por presentar menores valores de BIC y CMEP y mayores valores de R^2 . Aunque el R^2 (0.630 y 0.626) de la ecuación B y D es menor comparado con la ecuación A y C (0.681 y 0.678), es una ecuación más sencilla que para efectos prácticos, es de más fácil uso en campo, pues no es necesario transformar y retransformar los datos; en el caso de la ecuación D, es para uso en campo cuando no se conoce el dato exacto de kg de producción de leche/vaca/día. La ecuación E, es la única que usa la variable respuesta (CH_4 t) transformada, es más compleja de usar pues lleva todas las variables transformadas y ellos implicaría retransformarlas para obtener el dato predicho de CH_4 , adicional es la ecuación con menor R^2 0.537.

Las Figuras 1 y 2, indican una buena relación entre los valores observados y predichos para la producción de CH_4 en la medida que tienen unos R^2 altos: 0.681 y 0.630 y bajos valores de CMEP: 316 y 354, la primera ecuación tiene algunas variables que debían ser transformados y la segunda ecuación no tiene ninguna variable predictor transformada.

Jentsch et al (2007), informó que existe una relación más estrecha entre la producción de CH_4 y nutrientes digestibles en comparación con los nutrientes en crudo ($R^2 = 0.90$ vs. 0.86). Los

modelos de regresión son mejores con más descripciones de composición de la dieta (Wilkerson et al 1995), en especial cuando se adiciona la digestibilidad de las fracciones nutricionales; en este análisis aunque se tuvieron en cuenta las variables de digestibilidad, al momento de generar las ecuaciones de predicción de CH_4 no fueron ingresadas, por la poca disponibilidad de datos en los estudios revisados.

En muchos estudios las ecuaciones de predicción se hacen utilizando análisis de correlación, pero este no tiene en cuenta los efectos aleatorios del estudio; por lo tanto, estos resultados son probablemente sesgados, además, este análisis no tiene en cuenta la interacción entre las variables (Ellis et al 2007). Por ello para obtener las ecuaciones de predicción propuestas en la Tabla 3, se utilizó cada estudio como efecto aleatorio, de acuerdo a St-Pierre (2001).

Ellis et al (2007), también sugieren la utilización del uso de la proporción forraje: concentrado (F:C) en los análisis de predicción de CH_4 ya que hace parte de la variable CMS y a su vez existe una correlación positiva de la FDN (kg / día) con la producción de CH_4 que puede deberse al resultado de un aumento en la fermentación ruminal, disminución en la velocidad de paso del rumen, y alta relación acetato : propionato debido a la FDN, al CMS y las características de la fracción fibrosa de la dieta (Benchaar et al 2001, Boadi et al 2004). Otros autores han reportado efectos variables en el aumento de la proporción de concentrado en la producción de CH_4 (Van Soest 1994; Russell 1998).

Aumentar el nivel de carbohidratos no estructurales en la dieta en un 25% reduciría la producción de CH_4 , pero esto puede resultar en otros efectos perjudiciales por ejemplo problemas de acidosis, laminitis y de fertilidad (Moss et al 2000); la acidosis puede estar asociada con deficiencia de FDN y de fibra efectiva (Boadi et al 2004). Las simulaciones ruminales realizadas por Benchaar et al (2001) mostraron que la producción de CH_4 (MJ / día) aumenta cuando el porcentaje de forraje en la dieta se aumentó de 30 a 80%. La disminución del porcentaje de forraje de la dieta da lugar a un cambio en la fermentación ruminal hacia aumentar la producción de propionato y la disminución de pH ruminal (Church 1988) y esto favorece vías competitivas para el uso de H_2 (hidrógenos) en el rumen, y, por tanto disminuir la producción total de CH_4 (Moss et al 2000). Por ello es importante incluir las proporciones forraje: concentrado, para las predicciones de producción de CH_4 .

El efecto directo sobre la metanogénesis de la producción de leche y/o carne es todavía variable y poco claro, pero cuando la producción de CH_4 se lleva a unidad de producto, esta se reduce (Moss et al 2000).

Para la inclusión de la PC como variable predictora se tuvo en cuenta lo enunciado por Bach et al (2005) y McSweeney et al (2001), quienes reportaron que una mayor concentración de PC se ha asociado más con la disminución en las emisiones de CH_4 que la misma fermentación de carbohidratos (Cone y Van Gelder 1999; Jentsch et al 2007). La velocidad y extensión a la cual se produce la degradación de proteínas depende de la actividad proteolítica de la microbiota ruminal y del tipo de proteína de la dieta, así como las interacciones con otros nutrientes y otros factores (Bach et al 2005; McSweeney et al 2001).

La asincronía entre el nitrógeno y la disponibilidad de energía en el rumen, provoca un desacoplamiento en la fermentación (Casper et al 1994; Oba y Allen 2003). El rendimiento de la proteína microbiana ruminal (PMR) no sólo depende de la solubilidad de PC de la dieta, sino también en la fuente de energía fermentable y grado de sincronización ruminal de la PC y el catabolismo de los hidratos de carbono (Beever 1993).

La producción de metano entérico constituye una pérdida energética para el rumiante que representa entre el 2 y el 12% de la energía bruta consumida (Johnson y Johnson 1995). En otros estudios se incluye la energía metabolizable (EM) en relación a la EB (Blaxter y Clapperton 1965; Ramin y Huhtanen 2013), pero debido a la poca información de EM, no se tuvo en cuenta esta variable y solo se tuvo en cuenta la EB.

Conclusión

- La variable con mayor influencia en la predicción de la producción de metano fue el consumo de materia seca (CMS), las otras variables seleccionadas PC, FDN, F: C, EB y kg de leche, aunque no fueron significativas estadísticamente, aportan desde el punto de vista nutricional a la producción de CH₄ y ayudan a mejorar la predicción del modelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la empresa Solla S.A, en especial al Dr. Luis Miguel Gómez, y al Departamento de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS por el apoyo para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto “Evaluación *in vitro* e *in vivo* de diversas estrategias nutricionales para mitigar las emisiones de metano y su impacto productivo, reproductivo y económico en ganadería de leche especializada en el norte de Antioquia” (Código 1115+569-33874).

Referencias

- Avila-Stagno J, Chaves A V, Ribeiro G O, Ungerfeld E M and McAllister T A 2014** Inclusion of glycerol in forage diets increases methane production in a rumen simulation technique system. *British Journal of Nutrition*. 111: 829-835. http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FBJN%2FBJN111_05%2FS0007114513003206a.pdf&code=f8f1ff2f1f37688cd990e75cf703ee45
- Bach A, Calsamiglia S and Stern M D 2005** Nitrogen metabolism in the rumen. *Journal of Dairy Science*. 88: E9-E21. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(05\)73133-7/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(05)73133-7/pdf)
- Beauchemin K A, Kreuzer M, O'mara F, and McAllister T A 2008** Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Animal Production Science*. 48: 21-27. https://www.researchgate.net/publication/248892137_Nutritional_management_for_enteric_methane_abatement_A_review
- Beever D E 1993** Ruminant animal production from forages—present position and future opportunities. M. Baker M.(Eded.) *Grassland for our World*. SIR Publishing, Wellington.
- Benchaar C, Pomar C and Chiquette J 2001** Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants: A modelling approach. *Canadian Journal of Animal Science*. 81: 563-574. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/A00-119>
- Berends H, Gerrits W J J, France J, Ellis J L, Van Zijderveld S M and Dijkstra J 2014** Evaluation of the SF 6 tracer technique for estimating methane emission rates with reference to dairy cows using a mechanistic model. *Journal of Theoretical Biology*. 353: 1-8.
- Blaxter K L and Clapperton J L 1965** Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British journal of nutrition*. 19: 511-522. http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FBJN%2FBJN19_01%2FS0007114565000466a.pdf&code=bbc1dea5adb7fc4cbe3d4e84592ebdd3
- Boadi D A, Wittenberg K M, Scott S L, Burton D, Buckley K, Small J A and Ominski K H 2004** Effect of low and high forage diet on enteric and manure pack greenhouse gas emissions from a feedlot. *Canadian Journal of Animal Science*. 84: 445-453. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/A03-079>
- Box G E P and Cox D R 1964** An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*. 26: 211-252. <http://www.econ.illinois.edu/~econ508/Papers/boxcox64.pdf>

Casper D P, Schingoethe D J, Brouk M J and Maiga H A 1994 Nonstructural carbohydrate and undegradable protein sources in the diet: growth responses of dairy heifers. *Journal of Dairy Science*. 77: 2595-2604. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(94\)77200-3/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(94)77200-3/pdf)

Chagunda M G G, Ross D, and Roberts D J 2009 On the use of a laser methane detector in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*. 68: 157-160.

Chung Y H, Zhou M, Holtshausen L, Alexander T W, McAllister T A, Guan L L, Oba M and Beauchemin K A 2012 A fibrolytic enzyme additive for lactating Holstein cow diets: Ruminal fermentation, rumen microbial populations, and enteric methane emissions. *Journal of dairy science*. 95: 1419-1427. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(12\)00099-9/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(12)00099-9/pdf)

Church D C 1988 The ruminant animal. Digestive physiology and nutrition. Prentice Hall, pp 269-297.

Cone J W and Van Gelder A H 1999 Influence of protein fermentation on gas production profiles. *Animal Feed Science and Technology*. 76: 251-264.

Ellis J L, Kebreab E, Odongo N E, McBride B W, Okine E K and France J 2007 Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of dairy science*. 90: 3456-3467. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(07\)71795-2/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(07)71795-2/pdf)

Iberoamericano C C 2012 Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones, versión 5.1. 0 [actualizada en marzo de 2011][Internet]. Barcelona: Centro Cochrane Iberoamericano. https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/uploads/Manual_Cochrane_510_reduit.pdf

Jentsch W, Schweigel M, Weissbach F, Scholze H, Pitroff W and Derno M 2007 Methane production in cattle calculated by the nutrient composition of the diet. *Archives of Animal Nutrition*. 61: 10-19.

Johnson K A and Johnson D E 1995 Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*. 73: 2483-2492. <https://www.animalsciencepublications.org/publications/jas/articles/73/8/2483>

Johnson K A, Westberg H H, Michal J J, Cossalman M W 2007 The SF6 Tracer Technique: Methane Measurement from Ruminants. *Measuring Methane Production from Ruminants*, pp 33-67.

Leng R A 1993 Quantitative ruminant nutrition – a green science. *Australian Journal of Agricultural*. 44: 363-380. <http://www.ciesin.org/docs/004-180/004-180.html>

Lesschen J P, Van den Berg M, Westhoek H J, Witzke H P and Oenema O 2011 Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. *Animal Feed Science and Technology*. 166: 16-28.

McSweeney C S, Palmer B, McNeill D M, Bunch R and Krause D O 2001 Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 91: 83-93. https://www.researchgate.net/publication/46026271_Microbial_interactions_with_tannins_nutritional_consequences_for_ruminants_Anim_Feed_Sci_Technol

Martín J L R, Tobías A and Seoane T 2006 Revisiones sistemáticas en las ciencias de la vida. Toledo: FISCAM.

Milliken G A and Johnson D E 2009 Analysis of Messy Data, Volume 1: Designed Experiments. Volume 1. CRC Press.

Mills J A, Dijkstra J, Bannink A, Cammell S B, Kebreab E and France J 2001 A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: model development, evaluation, and application. *Journal of Animal Science*. 79: 1584-1597. <https://www.animalsciencepublications.org/publications/search?search%5B-3%5D=&searchType%5B-3%5D=Any&search%5B-2%5D=&searchFields%5B-2%5D%5BAuthor%5D=Author&searchType%5B-2%5D=Phrase&search%5B-1%5D=A+mechanistic+model+of+whole-tract+digestion+and+methanogenesis+in+the+lactating+dairy+cow%3A+model+development%2C+evaluation%2C+and+application&searchFields%5B-1%5D%5BTitle%5D=Title&searchType%5B-1%5D=Phrase&volume=&issue=&year=&first-page=&journal%5Bjas%5D=jas&search%5B0%5D=>

Mills J A N, Kebreab E, Yates C M, Crompton L A, Cammell S B, Dhanoa M S, Agnew R E, and Francia J 2003 Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. *Journal of Animal Science*. 81:3141–3150. <https://www.animalsciencepublications.org/publications/jas/articles/81/12/0813141?highlight=&search-result=1>

Moss A R, Jouany J P and Newbold J 2000 Methane production by ruminants: its contribution to global warming. In *Annales de zootechnie*. 49: 231-253. <http://www.bashaar.org.il/files/125122005103109.pdf>

Nakagawa S and Schielzeth H 2013 A general and simple method for obtaining R2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*. 4: 133-142. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x/epdf>

- National Research Council (NRC) 2001** The nutrient requirement of dairy cattle. Seventh edition; National Academy Press, Washington, D. C, pp 381.
- Oba M and Allen M S 2003** Effects of diet fermentability on efficiency of microbial nitrogen production in lactating dairy cows. *Journal of dairy science.* 86: 195-207. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(03\)73600-5/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(03)73600-5/pdf)
- Patra A K 2010** Meta-analyses of effects of phytochemicals on digestibility and rumen fermentation characteristics associated with methanogenesis. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 90: 2700-2708.
- Patra A K 2013** The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: a meta-analysis. *Livestock Science.* 155: 244-254.
- Place S E, Pan Y, Zhao Y and Mitloehner F M 2011** Construction and operation of a ventilated hood system for measuring greenhouse gas and volatile organic compound emissions from cattle. *Animals.* 1: 433-446. <http://www.mdpi.com/2076-2615/1/4/433/htm>
- Place S E, Pan Y, Zhao Y and Mitloehner F M 2013** Short-term dose effects of feeding monensin on methane emissions from lactating Holstein dairy cattle. In *Energy and protein metabolism and nutrition in sustainable animal production.* Wageningen Academic Publishers, pp 493.
- Posada Ochoa S L, Rosero Noguera J R, Bolivar Vergara D M 2006** Relación entre presión y volumen para la implementación de la técnica *in vitro* de producción de gases en Medellín, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.* 19: 407-414. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v19n4/v19n4a06.pdf>
- R-project: R Core Team 2012** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Ramin M and Huhtanen P 2013** Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. *Journal of Dairy Science.* 96: 2476-2493. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(13\)00094-5/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(13)00094-5/pdf)
- Russell J B 1998** The importance of pH in the regulation of ruminal acetate to propionate ratio and methane production *in vitro.* *Journal of Dairy Science.* 81:3222-3230. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(98\)75886-2/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(98)75886-2/pdf)
- SAS Institute 2001** SAS/STAT: Guide for personal computer. Versión 8.2. SAS Institute, Cary, NY, USA.
- St-Pierre N R 2001** Invited review: Integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology. *Journal of Dairy Science.* 84: 741-755. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(01\)74530-4/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(01)74530-4/pdf)
- Sauer F D, Fellner V, Kinsman R, Kramer J K G, Jackson H A, Lee A J, Chen S 1998** Methane output and lactation response in Holstein cattle with monensin or unsaturated fat added to the diet. *Journal of Animal Science.* 76: 906-914. <https://www.animalsciencepublications.org/publications/search?searchTab=&doi=&search%5B0%5D=Methane+output+and+lactation+response+in+Holstein+cattle+with+monensin+or+unsaturated+fat+added+to+the+diet&searchFields%5B0%5D%5Btitle%5D=title&searchType%5B0%5D=Manual&search%5B1%5D=sauer&searchFields%5B1%5D%5Bauthor%5D=author&searchType%5B1%5D=Manual&year=&volume=&issue=&first-page=&citation-year=&citation-volume=&citation-first-page=&num-results=10&sort=relevance&stem=false&open-access=false&journal%5Bjas%5D=jas&searchTab=#>
- Van Soest PJ 1994** Nutritional ecology of ruminants. Ithaca, NY: Cornell University Press, pp 87-187.
- Verstegen M W A, VanderHel W, Brandsma H A, Henken A M and Bransen A M 1987** The Wageningen Respiration Unit for Animal Production Research: A Description of the Equipment and its Possibilities. *Energy Metabolism in Farm Animals.* Springer Netherlands, pp 21-48
- Wilkerson V A, Casper D P and Mertens D R 1995** The prediction of methane production of Holstein cows by several equations. *Journal of Dairy Science.* 78: 2402-2414. [http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(95\)76869-2/pdf](http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(95)76869-2/pdf)

Received 5 March 2016; Accepted 5 June 2016; Published 1 July 2016