

Efecto de la fuente de carbohidratos sobre el balance energético-nitrogenado y las emisiones de metano de vacas lecheras lactantes

Effect of carbohydrate source on energy-nitrogen balance and methane emissions in lactating dairy cows

Gustavo A. Villegas-Henao¹, Sandra L. Posada-Ochoa^{1*}, Ricardo Rosero-Noguera¹

RESUMEN

Las características químicas del pasto *Cenchrus clandestinus*, base alimenticia en los sistemas de producción lechera, hacen necesaria la suplementación energética. El grano de maíz es el alimento más empleado para este propósito, pero dada su demanda y precio, el objetivo de este trabajo fue evaluar su reemplazo parcial por otras fuentes de carbohidratos no fibrosos sobre la emisión de metano, el balance energético-nitrogenado y el desempeño productivo de vacas lecheras. Dieciséis vacas Holstein recibieron *Cenchrus clandestinus* y uno de cuatro concentrados formulados con maíz (*Zea mays*) y sorgo (*Sorghum vulgare*), yuca (*Manihot esculenta*) o pulpa cítrica (*Citrus* sp) en reemplazo parcial del maíz. La inclusión de estos ingredientes no alteró el consumo de materia seca ni su digestibilidad, producción de metano, balance energético-nitrogenado, producción de leche o su composición. Los resultados permiten concluir que esos ingredientes pueden reemplazar parcialmente al maíz en la dieta de vacas lecheras.

Palabras clave: balance de nitrógeno, balance energético, carbohidratos no fibrosos, metano entérico, producción de leche

¹ Grupo de Investigación en Ciencias Agrarias – GRICA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

* E-mail: sandra.posada@udea.edu.co

Recibido: 22 de febrero de 2023

Aceptado para publicación: 15 de septiembre de 2023

Publicado: 30 de abril de 2024

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

ABSTRACT

The chemical characteristics of *Cenchrus clandestinus* grass, nutritional base in dairy production systems, demand the energy supplementation. Corn grain is the most used food for this purpose, but considering its demand and prices, the aim of this study was to evaluate its partial replacement by alternative non-fibrous carbohydrates sources on methane emissions, energy and nitrogen balance and productive performance of dairy cows. Sixteen multiparous Holstein cows were fed *Cenchrus clandestinus* plus one of four concentrate supplements formulated with corn (*Zea mays*) or a partial replacement of corn with sorghum (*Sorghum vulgare*), cassava (*Manihot esculenta*) or citrus pulp (*Citrus* sp). Inclusion of these ingredients did not affect dry matter intake, dry matter digestibility, enteric methane emissions, energy and nitrogen balance, milk yield or composition. The results allow to conclude that these ingredients can partially replace corn in the diet of lactating dairy cows.

Key words: nitrogen balance, energy balance, non-fibrous carbohydrates, enteric methane, milk yield

INTRODUCCIÓN

Cenchrus clandestinus, comúnmente conocido como pasto kikuyo, representa la base alimenticia en los sistemas de producción lechera en el trópico de altura. Este pasto presenta alta concentración de proteína y fibra y baja de carbohidratos no fibrosos (CNF). Según García *et al.* (2014), el contenido de CNF y almidón es 11.4 y 4.8%, respectivamente, por lo cual los animales deben ser suplementados con alimentos que aporten azúcares, almidones y/o pectinas. Por otro lado, el grano de maíz (*Zea mays*) representa una fuente energética comúnmente empleada en la formulación de suplementos alimenticios para el ganado; sin embargo, su demanda por otros sectores de la economía puede incrementar el costo. Es necesario, por tanto, evaluar fuentes alternativas de energía que permitan reemplazar el maíz, sin afectar el balance nutricional y el desempeño productivo de los animales. Ingredientes como el sorgo (*Sorghum vulgare*), yuca (*Manihot esculenta*) y pulpa cítrica (*Citrus* sp) constituyen alternativas apropiadas por su contenido de almidón, azúcares y pectinas (Gómez *et al.*, 2020). De otra parte, estos

carbohidratos, al igual que la fibra digestible, contribuyen con la metano-génesis ruminal.

La emisión de metano (CH₄) de origen entérico es una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero y, por tanto, una de las causas del calentamiento global. El CH₄ tiene un potencial de calentamiento 28 veces superior al dióxido de carbono en un periodo de 100 años (EPA, 2023). La emisión de CH₄ también está asociada con la pérdida de energía alimentaria, reduciendo, por lo tanto, la eficiencia alimenticia (Haque, 2018). Así, dependiendo del nivel de consumo de alimento, la composición de la dieta, y otros factores, la pérdida de energía a través del CH₄ puede representar entre el 2 al 12% de la energía bruta consumida (Bougouin *et al.*, 2018).

Para el año 2050, se espera que la emisión total de CH₄ a partir de los rumiantes aumente en forma significativa debido a la creciente demanda mundial de leche y carne para el consumo humano, siendo necesario buscar estrategias que ayuden a mitigar las emisiones de este gas. Los alimentos concentrados, con menos fibra y mayor densidad de nutrientes como azúcares y almidón,

favorecen la producción de ácido propiónico y, consecuentemente, disminuyen la emisión de CH_4 . De ahí que la suplementación con este tipo de recursos, manejando una adecuada relación forraje: concentrado, podría ser una estrategia efectiva para reducir la emisión de CH_4 y aumentar la productividad (Haque, 2018).

El aporte de nitrógeno (N) en la alimentación es fundamental en la producción bovina y su eficiencia de utilización en el rumen depende de la disponibilidad de energía fermentable de la dieta (Hristov *et al.*, 2019). Una mejora en la eficiencia de utilización del N conlleva a mayor retención corporal y reducción de los niveles de excreción al ambiente. La contaminación por N afecta negativamente la salud humana y animal, el cambio climático y la biodiversidad de los ecosistemas naturales (Viljoen *et al.*, 2020). Ante esto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del reemplazo parcial de maíz (*Zea mays*) por otras fuentes de CNF en la dieta sobre la emisión de CH_4 , el balance energético-nitrogenado y el desempeño productivo de vacas lecheras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los procedimientos y protocolos de trabajo fueron aprobados por el Comité de Ética para la Experimentación con Animales (CEEA) de la Universidad de Antioquia – UdeA (Medellín-Colombia), según consta en el Acta 76 de mayo de 2012.

Ubicación y Animales

El trabajo se realizó en el Laboratorio de Calorimetría Animal del Centro de Prácticas y Desarrollo Agrario «La Montaña», perteneciente a la UdeA, ubicada en el municipio de San Pedro de los Milagros, a 2468 msnm. La zona presenta una temperatura y precipitación media anual de 14.2 °C y 2923 mm, respectivamente. Se emplearon 16 vacas Holstein multíparas, con 553±35 kg de

peso vivo (PV), 52.6±16.2 meses de edad, 150 a 240 días en leche, que se encontraban entre segundo y quinto parto (promedio: 3 partos). Los animales permanecieron en un sistema de estabulación completa y antes de iniciar el experimento fueron adaptados durante 42 días a las instalaciones, la alimentación y el manejo.

Alimentación y Tratamientos

Los animales recibieron pasto kikuyo de 35 días de rebrote y suplemento concentrado en presentación peletizada (Cuadro 1). Se determinó el consumo de materia seca (MS) de pasto (CMSp) por día, siendo la diferencia entre el alimento ofrecido y el rechazado. De acuerdo con el CMSp por día se calculó la cantidad de MS de concentrado a suministrar (consumo de materia seca de concentrado, CMSc), buscando garantizar una relación CMSp: CMSc próxima a 65: 35.

Durante el ordeño (06:00 y 14:00 h) se suministraron cuatro tipos de suplementos concentrados (tratamientos). ZM tuvo como fuente principal de energía el maíz (*Zea mays*), en tanto que en los otros tratamientos el maíz fue parcialmente reemplazado por otras fuentes de CNF: ZM-SV, sorgo (*Sorghum vulgare*), ZM-ME, yuca (*Manihot esculenta*) y ZM-C, pulpa cítrica deshidratada (*Citrus* sp) (Cuadro 1). Asimismo, se asignaron cuatro vacas en forma aleatoria a cada tratamiento. Las mediciones del estudio se iniciaron luego de 21 días de adaptación a las fuentes de alimento, e incluyeron el balance de nutrientes (5 días/animal) y medición de la emisión de CH_4 en cámaras respirométricas (3 días/animal).

Consumo de MS y de Nutrientes

Para determinar el CMSp, el CMSc y el balance de nutrientes se colectaron diariamente muestras del alimento ofrecido y rechazado. Al cabo de cinco días, las muestras se mezclaron obteniendo una muestra compuesta por animal para el análisis químico.

Cuadro 1. Ingredientes y composición del pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) y de los concentrados suplementados a vacas Holstein en lactación

Ingrediente	Pasto	Tratamientos			
		ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
Ingrediente (Porcentaje de materia seca)					
Maíz		43.0	20.8	19.4	24.0
Sorgo		-	22.5	-	-
Yuca		-	-	20.5	-
Pulpa cítrica		-	-	-	25.0
Salvado de trigo		15.0	15.0	13.5	10.0
Harina de arroz		7.6	6.2	9.0	7.0
Torta de girasol		6.7	6.1	7.0	8.0
Preparaciones forrajeras		5.0	5.0	5.0	5.0
Torta de soya		5.0	5.0	5.0	5.0
Cascarilla de cebada		4.0	4.0	4.0	1.7
Melaza		4.0	4.0	4.0	4.0
Carbonato de calcio		3.5	3.5	3.8	2.3
Granos de destilería		2.3	4.0	4.9	3.8
Harina de plumas hidrolizada		2.0	2.0	2.0	2.0
Sal		0.8	0.8	0.8	0.8
Aceite de pescado		0.4	0.4	0.4	0.4
Bicarbonato de sodio		0.3	0.3	0.3	0.3
Fosfato tricálcico		0.2	0.2	0.2	0.5
Premezcla mineral y vitamínica		0.2	0.2	0.2	0.2
Composición química (% de la materia seca)					
Materia seca	16.9	89.6	89.5	91.2	89.5
Proteína bruta	20.2	16	16.4	14.9	15.8
Extracto etéreo	3.1	4.3	4.1	4.0	4.1
Fibra detergente neutra	58.9	18.4	18.3	18.9	20.4
Fibra detergente ácida	27.3	7.1	7.4	8.1	7.6
Lignina detergente ácida	5.4	2.5	2.8	3.0	3.6
Cenizas	13.0	10.3	12.0	11.2	10.3
Materia orgánica	87.0	89.7	88.0	88.8	89.7
Carbohidratos no fibrosos	4.8	51.0	49.2	51.0	49.4
Almidón	-	34.6	34.5	33.9	21.3
Pectinas	-	1.4	<1.0	<1.0	8.9
Energía bruta (Mcal/kg MS)	4.3	4.4	4.3	4.3	4.3
Energía neta de lactancia (Mcal/kg MS)	1.3	1.7	1.7	1.7	1.7

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada

La relación proteína-energía de la dieta fue establecida a través de la relación entre el consumo de proteína bruta (PB) (g/animal/día) y el consumo de energía neta de lactancia (EN_L) (Mcal/animal/día), asumiendo una eficiencia de uso de la energía metabolizable (EM) para la producción de leche del 64% (NRC, 2001). La EM fue determinada mediante balance energético.

Producción y Composición de la Leche

La producción de leche por vaca se registró diariamente y fue corregida al 4% de grasa (LCG 4.0%). Las concentraciones de proteína, grasa, lactosa, sólidos totales (%) y nitrógeno ureico en leche (NUL) (mg/dL) se determinaron por espectroscopía de infrarrojo medio (Milkoscan FT+ Foss Analytical, Dina-

marca). El calor de combustión de la leche se determinó utilizando bomba calorimétrica isoperibólica (Leco Corporation, USA). La eficiencia alimenticia (EA) se estableció relacionando el desempeño productivo y el CMS total (CMSt).

Digestibilidad Aparente de la Materia Seca (DMS)

La DMS y la digestibilidad de los nutrientes se determinó a partir de la ecuación $DMS (\%) = ([\text{Nutriente consumido, g} - \text{Nutriente en las heces, g}] / \text{Nutriente consumido, g}) * 100$.

La producción fecal se estimó empleando óxido crómico (Cr_2O_3) (p.a. 98%) (Fisher Scientific, USA) como marcador externo. Cada animal recibió 10 g de Cr_2O_3 por día (5 g después de cada ordeño) durante 12 días consecutivos, siendo 7 días de adaptación y 5 días de medición. Durante los días de medición se colectaron muestras de heces de cada animal directamente del recto mediante excreción voluntaria o estimulación (05:30 y 13:30 h), las cuales formaron una muestra compuesta por animal para su análisis.

Balance y Eficiencia de Uso del Nitrógeno

El balance de nitrógeno (BN) se determinó a partir de la diferencia entre el consumo de N, su excreción por las heces y la orina y su eyección a través de la leche. El volumen urinario (L/animal/día) se calculó a partir de la excreción de creatinina como marcador interno, usando un coeficiente de excreción de 29.89 mg/kg PV (Escobar *et al.*, 2010). La eficiencia de uso del N para la producción de leche (EUN) se determinó a partir de la ecuación: $EUN (\%) = (\text{N en leche, g/d} / \text{N consumido, g/d}) * 100$.

Emisión de Metano Entérico

La cuantificación de CH_4 entérico se realizó a través de cámaras respirométricas (22 m³), asegurando un recambio de aire de 1000 L/min. Las condiciones al interior de

las cámaras fueron 22 °C y 65% de humedad relativa. Se cuantificó la concentración de CH_4 (MA-10 Methane Analyzer, Sable System International, USA) cada segundo en el aire proveniente del ambiente y de la cámara. Los datos se analizaron mediante el software Expedata (Sable System International, USA). La producción de CH_4 (L/animal/d) se multiplicó por su densidad energética (9.45 kcal/L) (Nkrumah *et al.*, 2006) para obtener la energía perdida a través de este gas.

Utilización de la Energía

- El consumo de energía bruta (EB) se determinó por la diferencia entre la cantidad de EB presente en el alimento ofrecido y en el alimento rechazado.
- El consumo de energía digestible (ED) se determinó por diferencia entre el consumo de EB y el contenido de EB presente en las heces.
- El consumo de EM correspondió a la diferencia entre el consumo de ED y la pérdida de energía presente en la orina (energía urinaria, EU) y el CH_4 .
- La eficiencia de utilización de la energía se valoró a través de la relación ED/EB (digestibilidad), EM/EB (metabolicidad) y EB en leche/EB consumida (kcal/día) (EUE).

Análisis de las Muestras

El análisis químico de las muestras incluyó MS, PB, cenizas (Cen), extracto etéreo (EE), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), lignina detergente ácida (LDA), almidón, EB (Balthrop *et al.*, 2011) y pectina (Hansen *et al.*, 2001). Las Cen se determinaron por incineración de la MS a 550 °C por 4 h. La materia orgánica (MO) se calculó por diferencia entre la MS y la Cen. Los CNF se calcularon a partir de la diferencia entre la MS y las concentraciones de PB, Cen, EE y FDN. La EN_L se estimó a partir de la ecuación de Conrad *et al.* (1984). La concentración de cromo en las heces se determinó por espectrometría de absorción atómica (Williams *et al.*, 1962). La concentración de creatinina en la orina se determinó por colorimetría (Escobar *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Peso vivo y consumo de materia seca de pasto (CMSp), de concentrado (CMSc), total (CMSt) y de nutrientes en vacas Holstein, expresados en kg y en g/kg de peso metabólico ($\text{kg}^{0.75}$) (media y desviación estándar)

	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
Peso vivo (kg)	555 ± 17.8	537 ± 35.9	557 ± 50.2	565 ± 40.6
Consumo diario e individual de materia seca y de nutrientes				
CMSp (kg)	11.0 ± 0.6	10.9 ± 0.6	10.6 ± 1.1	10.9 ± 0.9
CMSc (kg)	5.8 ± 0.5 ^c	6.1 ± 0.5 ^a	6.1 ± 0.5 ^a	5.9 ± 0.5 ^b
Relación CMSp/CMSc	65.5/34.5	64.1/35.9	63.5/36.5	64.9/35.1
CMSt (kg)	16.8 ± 0.7	17.0 ± 0.5	16.7 ± 1.3	16.8 ± 1.4
CMSt (% peso vivo)	3.0 ± 0.1	3.2 ± 0.3	3.0 ± 0.4	3.0 ± 0.4
CMSt (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	146.9 ± 5.8	152.4 ± 9.5	145.7 ± 15.3	145.0 ± 15.6
Proteína bruta (kg)	3.2 ± 0.2	3.2 ± 0.1	3.0 ± 0.4	3.1 ± 0.3
Proteína bruta (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	27.5 ± 1.4	28.7 ± 1.8	26.6 ± 3.2	27.1 ± 3.8
Extracto etéreo (kg)	0.59 ± 0.03	0.59 ± 0.01	0.57 ± 0.04	0.58 ± 0.05
Extracto etéreo (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	5.2 ± 0.2	5.3 ± 0.4	5.0 ± 0.5	5.0 ± 0.5
Fibra detergente neutra (kg)	7.6 ± 0.5	7.5 ± 0.4	7.4 ± 0.8	7.6 ± 0.7
Fibra detergente neutra (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	66.1 ± 2.8	67.7 ± 4.0	64.6 ± 7.7	66.0 ± 8.6
Fibra detergente ácida (kg)	3.4 ± 0.2	3.4 ± 0.2	3.4 ± 0.4	3.4 ± 0.3
Fibra detergente ácida (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	29.9 ± 1.3	30.8 ± 1.8	29.6 ± 3.5	29.6 ± 3.9
Materia orgánica (kg)	14.8 ± 0.6	14.8 ± 0.4	14.6 ± 1.1	14.7 ± 1.2
Materia orgánica (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	129.2 ± 5.3	133.2 ± 8.5	127.8 ± 13.3	127.6 ± 13.4
Carbohidratos no fibrosos (kg)	3.5 ± 0.3	3.5 ± 0.2	3.6 ± 0.3	3.4 ± 0.3
Carbohidratos no fibrosos (g/kg $\text{PV}^{0.75}$)	30.4 ± 2.4	31.5 ± 3.2	31.6 ± 3.3	29.7 ± 3.1
Energía neta de lactancia (Mcal)	29.4 ± 2.6	30.9 ± 1.5	28.9 ± 3.9	29.8 ± 3.0
Proteína bruta (g) / Energía neta de lactancia (Mcal)	107.9 ± 2.0	103.6 ± 3.2	105.2 ± 6.6	104.7 ± 2.9

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Análisis Estadístico

Los datos se analizaron empleando un modelo lineal mixto, con el tratamiento como efecto fijo y el animal como efecto aleatorio. Los días en leche y la producción al inicio del experimento se utilizaron como covariables. Las medias de los tratamientos se compararon a través de la prueba de Tukey, empleando un nivel de significancia del 5%. Para el procesamiento de la información se utilizó el programa estadístico R (R Development Core

Team, 2020). El modelo empleado para el análisis de la información fue: $Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \xi_j + \beta(X_{ij} - X_{..}) + \varepsilon_{ijk}$, donde Y_{ijk} = k -ésima observación bajo el i -ésimo nivel del tratamiento, μ = valor medio global, T_i = efecto fijo del nivel i -ésimo del tratamiento, ξ_j = efecto aleatorio del nivel j -ésimo del animal, β = coeficiente de regresión que relaciona Y_{ijk} con la covariable X_{ij} , X_{ij} = medida de la covariable que se hace para Y_{ijk} , X = media de los valores de X_{ij} , ε_{ijk} = error aleatorio.

RESULTADOS

En la composición química de los alimentos se observa un mayor contenido de FDN y de pectinas y un menor contenido de almidón en el concentrado ZM-C, mientras que los porcentajes de los demás nutrientes fueron muy similares entre los concentrados. Los contenidos de FDN, FDA y PB fueron superiores en el pasto kikuyo respecto los alimentos concentrados (Cuadro 1).

El CMSt, el CMSp (kg/animal/día) y el consumo de nutrientes fue equivalente entre tratamientos ($p>0.05$) (Cuadro 2). El mayor CMSc se presentó en los tratamientos ZM-SV y ZM-ME ($p<0.05$). La DMS y de los nutrientes no difirió entre tratamientos ($p>0.05$) (Cuadro 3). La producción de leche

y su composición no fue afectada por el tratamiento ($p>0.05$) (Cuadro 4). Solo se observaron diferencias entre tratamientos ($p<0.05$) en el N consumido desde el concentrado (g/animal/día), que fue mayor para ZM-SV y menor para ZM-ME, en tanto que la EUN no presentó diferencia entre tratamientos ($p>0.05$) (Cuadro 5).

En el Cuadro 6 se presenta el balance de energía y su eficiencia de utilización. Los tratamientos no tuvieron efecto sobre la energía contenida en la leche y los consumos de EB, ED y EM ($p>0.05$). Solo se registraron diferencias en la digestibilidad (ED/EB) y en la metabolicidad (EM/EB) de la energía ($p<0.05$), que fue superior para el tratamiento ZM-SV. En la Cuadro 7 se observa que la producción de CH_4 entérico fue similar entre tratamientos ($p>0.05$).

Cuadro 3. Producción fecal expresada en kg y en g/kg de peso metabólico ($\text{kg}^{0.75}$) y digestibilidad aparente de la materia seca (MS) y los nutrientes en vacas Holstein (media y desviación estándar)

	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
MS fecal (kg/animal/día)	4.6 ± 0.6	4.3 ± 0.6	4.5 ± 0.9	4.4 ± 0.3
MS fecal (g/kg $\text{PV}^{0.75}$ /día)	40.8 ± 5.8	38.6 ± 6.5	39.7 ± 10.9	37.8 ± 1.9
Digestibilidad aparente (%)				
Materia seca	72.3 ± 3.6	74.8 ± 3.2	72.9 ± 5.6	73.8 ± 2.1
Proteína	74.7 ± 4.7	75.1 ± 3.9	74.9 ± 6.1	74.7 ± 0.5
Fibra detergente neutra	66.4 ± 5.2	69.4 ± 5.6	67.3 ± 9.1	69.1 ± 4.0
Materia orgánica	73.8 ± 3.3	76.1 ± 2.8	74.6 ± 5.3	75.3 ± 1.9

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada

DISCUSIÓN

La composición química del pasto kikuyo coincide con la reportada por Correa *et al.* (2008a). Se destaca su alta concentración de proteína y fibra y el bajo nivel de CNF, denotando la importancia de aumentar los CNF

en la dieta de las vacas lactantes a través de la suplementación concentrada, como estrategia para incrementar la disponibilidad de energía a nivel ruminal. Respecto a los alimentos concentrados, el almidón en el tratamiento ZM-C representó el 43.1% de los CNF, mientras que en los otros tratamientos constituyó entre el 66.5 al 70.1% (Cuadro 1).

Cuadro 4. Producción y composición de la leche en vacas Holstein (media y desviación estándar)

Desempeño individual	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
Producción de leche (kg/día)	18.7 ± 3.0	21.1 ± 3.4	20.8 ± 3.0	19.2 ± 4.0
Producción 4% de grasa (kg/día)	16.5 ± 2.8	17.7 ± 3.8	18.7 ± 2.3	17.4 ± 3.8
Grasa (%)	3.21 ± 0.21	2.89 ± 0.50	3.34 ± 0.22	3.39 ± 0.35
Grasa (g/día)	0.60 ± 0.11	0.62 ± 0.17	0.69 ± 0.08	0.65 ± 0.15
Proteína (%)	2.96 ± 0.3	2.69 ± 0.15	2.75 ± 0.07	2.86 ± 0.35
Proteína (g/día)	0.55 ± 0.05	0.56 ± 0.07	0.57 ± 0.08	0.54 ± 0.08
Relación Grasa/Proteína	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.2
Lactosa (%)	4.75 ± 0.07	4.75 ± 0.10	4.68 ± 0.11	4.75 ± 0.15
Lactosa (g/día)	0.89 ± 0.14	1.01 ± 0.18	0.98 ± 0.16	0.91 ± 0.22
Sólidos totales (%)	11.8 ± 0.32	11.2 ± 0.43	11.6 ± 0.18	11.9 ± 0.24
Sólidos totales (g/día)	2.20 ± 0.31	2.37 ± 0.42	2.42 ± 0.34	2.27 ± 0.44
N ureico en leche (mg/dL)	20.3 ± 1.6	19.8 ± 1.6	19.8 ± 2.0	19.9 ± 1.0
Eficiencia alimenticia				
kg de leche/kg CMS	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.1 ± 0.2
kg de leche corregida al 4% grasa/kg CMS	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.2

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada

Cuadro 5. Balance de nitrógeno (N) y su eficiencia de utilización (EUN) en vacas Holstein (media y desviación estándar)

Balance/animal	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
Consumo de N (g/día)				
Pasto	356 ± 34	352 ± 32	344 ± 50	351 ± 42
Concentrado	148 ± 13 ^b	159 ± 12 ^a	144 ± 11 ^c	148 ± 13 ^b
Total	503 ± 36	510 ± 23	486 ± 56	499 ± 51
N digestible (g/día)	377 ± 49	383 ± 35	365 ± 62	373 ± 39
Consumo (%)	74.7 ± 4.7	75.1 ± 3.9	74.9 ± 6.1	74.7 ± 0.5
N en orina (g/día)	121 ± 10	116 ± 6.7	119 ± 11.3	120 ± 7.7
Consumo (%)	24.1 ± 1.7	22.8 ± 1.5	24.8 ± 4.7	24.3 ± 3.6
Orina (kg/día)	35.7 ± 2.3	33.7 ± 3.0	34.8 ± 5.4	35.6 ± 5.6
N en leche (g/día)	87.2 ± 7.9	90.1 ± 11.1	91.2 ± 13.0	86.6 ± 12.6
EUN (%)	17.4 ± 1.8	17.6 ± 1.8	18.9 ± 3.2	17.3 ± 1.5
Balance N (g/día)	168.3 ± 42.6	176.9 ± 35.3	154.9 ± 68.4	166.4 ± 33.4

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada
Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05)

Cuadro 6. Balance de energía y su eficiencia de utilización (EUE) en vacas Holstein (media y desviación estándar)

Balance/animal	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
Energía bruta (Mcal/día)	73.1 ± 3.1	73.4 ± 2.0	71.8 ± 5.5	72.4 ± 5.8
Pasto	47.8 ± 2.5	47.3 ± 2.7	45.8 ± 4.5	47.1 ± 3.7
Concentrado	25.3 ± 2.2	26.1 ± 1.9	25.9 ± 1.9	25.2 ± 2.2
Energía digestible (Mcal/día)	51.7 ± 4.3	53.9 ± 2.5	51.3 ± 6.2	52.5 ± 5.1
% Energía bruta	70.6 ± 3.9 ^b	73.5 ± 3.1 ^a	71.4 ± 5.6 ^{ab}	72.5 ± 1.8 ^{ab}
Energía urinaria (Mcal/día)	3.9 ± 0.3	3.9 ± 0.1	4.0 ± 0.6	4.1 ± 0.4
% Energía bruta	5.3 ± 0.3	5.4 ± 0.1	5.7 ± 0.7	5.7 ± 0.5
% Energía digestible	7.3 ± 0.7	7.2 ± 0.2	7.7 ± 0.8	7.6 ± 0.7
E en gas metano (Mcal/día)	4.0 ± 0.5	3.9 ± 0.4	4.2 ± 0.5	4.1 ± 0.4
% Energía bruta (Y _m)	5.5 ± 0.6	5.4 ± 0.3	5.8 ± 0.8	5.6 ± 0.1
% Energía digestible	7.7 ± 0.8	7.4 ± 0.5	8.2 ± 1.2	7.7 ± 0.1
% Energía metabolizable	9.2 ± 1.0	8.7 ± 0.6	9.8 ± 1.7	9.1 ± 0.2
Energía metabolizable (Mcal/día)	43.8 ± 3.8	45.9 ± 2.2	43.1 ± 5.7	44.4 ± 4.5
% Energía bruta	59.9 ± 3.9 ^b	62.7 ± 2.9 ^a	59.9 ± 5.4 ^b	61.3 ± 1.7 ^b
% Energía digestible	84.7 ± 1.3	85.2 ± 0.6	83.9 ± 1.9	84.5 ± 0.8
Energía en la leche (Mcal/día)	12.0 ± 2.0	12.8 ± 2.8	13.5 ± 1.8	12.9 ± 2.3
% Energía bruta (EUE)	16.4 ± 2.2	17.5 ± 3.5	18.8 ± 2.2	17.7 ± 2.2

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada
 Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Cuadro 7. Producción de metano (CH₄) entérico en vacas Holstein (media y desviación estándar)

Emisión individual	Tratamientos			
	ZM	ZM-SV	ZM-ME	ZM-C
L/día	423 ± 54	422 ± 36	442 ± 51	428 ± 42
Kcal/día	3998 ± 518	3994 ± 347	4177 ± 486	4046 ± 398
L/kg peso vivo	0.76 ± 0.09	0.79 ± 0.09	0.80 ± 0.12	0.76 ± 0.11
L/kg peso metabólico (PV ^{0.75})	3.7 ± 0.5	3.8 ± 0.4	3.9 ± 0.5	3.7 ± 0.5
L/kg leche	23.0 ± 3.6	20.3 ± 2.6	21.5 ± 3.1	22.8 ± 3.1
L/kg leche corregida al 4% de grasa	26.0 ± 3.5	24.5 ± 3.9	23.8 ± 2.7	25.1 ± 3.1
L/kg materia seca	25.2 ± 2.6	24.9 ± 1.6	26.5 ± 3.7	25.55 ± 0.6
L/ kg materia seca digestible	34.9 ± 3.4	33.3 ± 2.2	36.7 ± 5.6	34.6 ± 0.5
L/kg de fibra detergente neutra	55.9 ± 5.4	56.1 ± 3.3	60.3 ± 8.9	56.3 ± 1.8
L/kg de materia orgánica	28.6 ± 2.9	28.5 ± 1.8	30.4 ± 4.1	29.0 ± 0.8
L/kg de carbohidratos no fibrosos	122.3 ± 17.7	121.1 ± 13.4	123.7 ± 21.0	125.0 ± 4.2
L/Mcal de energía bruta	5.8 ± 0.6	5.8 ± 0.4	6.2 ± 0.8	5.9 ± 0.2

ZM: maíz, ZM-SV: maíz + sorgo, ZM-ME: maíz + yuca, ZM-C: maíz + pulpa cítrica deshidratada

Esa diferencia no se refleja en la concentración de CNF, ya que esta fracción, además del almidón, incluye azúcares y pectinas. En la pulpa cítrica, Bampidis y Robinson (2006) reportaron una concentración de almidón, azúcares y pectinas de 2.3, 24.1 y 22.3%, respectivamente.

Consumo y Digestibilidad de la Materia Seca

El CMSp y el CMSt (Cuadro 2) se encuentran próximos a los valores reportados por Cardona-Iglesias *et al.* (2019) en vacas Holstein pastoreando kikuyo, de 11.0 y 17.2 kg, respectivamente. Con respecto al CMSc, la similitud en la composición química (Cuadro 1) dificulta como explicar las diferencias obtenidas. El consumo medio de FDN representó el 44.7% del CMSt, valor que supera el rango de 25-33% descrito por el NRC (2001) para no afectar la producción de LCG 4.0%, lo que denota la naturaleza fibrosa de la dieta. El mayor consumo de FDN es coherente con un menor consumo de CNF, 20.8% del CMSt (Cuadro 2). El NRC (2001) sugiere una concentración máxima de carbohidratos no estructurales (CNE) del 30-40% de la MS y de CNF 2-3% superior, para evitar acidosis ruminal y otros problemas metabólicos.

La relación consumo de PB/consumo de EN_L para todos los tratamientos fue próxima a 105 g PB/Mcal EN_L (Cuadro 2), que de acuerdo con Hess *et al.* (1999) se asocia con excesos de proteína o deficiencia de energía a nivel ruminal. La equivalencia en el consumo de nutrientes entre tratamientos explica la ausencia de diferencia estadística en la DMS (Cuadro 3).

Producción y Composición de la Leche

La ausencia de diferencia estadística entre tratamientos en la producción de leche y en EA (Cuadro 4) concuerda con Gómez *et al.* (2020), quienes evaluaron las mismas fuentes de carbohidratos del presente trabajo. Los autores, no obstante, reportaron una mayor producción (31.9 kg/día) y eficiencia

(1.59 kg de leche/kg MS) con vacas Holstein durante los primeros 60 días de lactancia. Desde el punto de vista nutricional, la EA depende de la concentración de fibra y proteína en la ración y de la relación carbohidratos/proteína (Phuong *et al.*, 2013).

Los porcentajes de grasa y proteína en leche se corresponden con los valores reportados en las lecherías de trópico alto (Gallego *et al.*, 2017; Hoyos *et al.*, 2021). La menor concentración de proteína puede obedecer a la baja eficiencia de utilización de N en la síntesis de proteína microbiana, con lo cual disminuye la disponibilidad de precursores (aminoácidos esenciales y no esenciales) para la glándula mamaria. La menor eficiencia de utilización del N también se asocia con mayor NUL, cuyo valor medio fue 20 mg/dL, superando el rango óptimo descrito por Jonker *et al.* (1999), entre 10-16 mg/dL. Según Aguilar *et al.* (2012), la excreción de urea es determinada por el balance entre el N consumido y el N depositado en el cuerpo y la leche.

Balance de Nitrógeno

El consumo de N desde el pasto fue similar entre tratamientos (Cuadro 5), lo cual es consistente con la ausencia de diferencia en el CMSp (Cuadro 2). Por otro lado, el consumo de N desde el concentrado presentó diferencias entre tratamientos (Cuadro 5), debido a variaciones en su consumo y composición. El menor consumo de N se asoció con la menor concentración de PB en el concentrado ZM-ME (Cuadro 1). El CMSc, inferior para los tratamientos ZM y ZM-C (Cuadro 2), generó un menor consumo de N respecto al tratamiento ZM-SV (Cuadro 5). El consumo de N total promedió 499.5 g/animal/día, lo que corresponde a una concentración de 18.6% PB del CMSt. El N excretado a través de las heces representó el 25.2% del N consumido (Cuadro 5). La excreción fecal de N está relacionada con la edad del pasto, como descrito por Correa *et al.* (2016), quienes encontraron digestibilidades del 75 y 60% a los 45 y 79 días de rebrote en el pasto

kikuyo. El pasto consumido por los animales del presente estudio fue de 35 días, lo que puede explicar el valor de digestibilidad del N observado.

En el trópico de altura, los sistemas de producción lechera especializada se caracterizan por presentar una baja EUN. Los datos analizados por Correa *et al.* (2008b) presentaron un valor promedio de $17.4 \pm 3.2\%$, muy próximo al valor obtenido en el presente trabajo (17.8%) (Cuadro 5). En zonas templadas, no obstante, Jonker *et al.* (2002) reportaron una EUN de 28.4%, mientras que Phuong *et al.* (2013) reportaron una media de 42.6% y un valor mínimo de 29.2%. La menor EUN observada en este trabajo, respecto a la literatura internacional, puede obedecer a los altos consumos de N. Correa *et al.* (2008b) y Jonker *et al.* (2002) describieron una relación inversa entre el contenido de PB de las dietas y la EUN para la síntesis de proteínas lácteas.

Balance Energético

La ausencia de diferencia estadística en el consumo de EB (Cuadro 6) fue consistente con la similitud en el CMSt entre tratamientos (Cuadro 2), resultando en una densidad energética media de 4.3 Mcal de EB/kg MS consumida. La mayor digestibilidad de la energía en el tratamiento ZM-SV, respecto ZM (Cuadro 6), es difícil de explicar dada la similitud en la composición química (Cuadro 1) y el CMSt de ambas dietas (Cuadro 2). Sin embargo, la mayor digestibilidad de la energía en el tratamiento ZM-SV explica su mayor metabolibilidad (EM/EB) (Cuadro 6).

La EM representó el 84.6% de la ED. De acuerdo con Van Soest (1994), las pérdidas de ED promedian entre 5 a 12% en CH_4 y de 3 a 5% en orina. En el Cuadro 6 se observa que la pérdida de CH_4 , como porcentaje de la ED (7.8%), estuvo dentro del rango informado; no obstante, la pérdida de energía por la orina fue superior (7.45%), lo cual puede deberse a la cantidad de desechos nitrogenados excretados por esta vía,

como resultado del alto consumo de N (Cuadro 5). La ausencia de diferencia estadística en la energía contenida en la leche y en la EUE se debe a la similitud entre tratamientos en el consumo de EB (Cuadro 6), la producción de leche y su composición (Cuadro 4). En promedio, la EUE correspondió al 17.6% (Cuadro 6), coincidente con el rango de 17.0 a 20.5% informado por VandeHaar y St-Pierre (2006). Al establecer la relación entre la energía contenida en la leche y la ED (Mcal/día) (Cuadro 6), la media para todos los tratamientos fue 24.5%, similar al valor mínimo de eficiencia energética (23.3%) descrito por Phuong *et al.* (2013).

De acuerdo con Phuong *et al.* (2013), la menor EUN y EUE es el resultado de altas concentraciones de proteína digestible y FDN en la ración (13.2 y 40% de la MS, aproximadamente), y del desbalance en la relación carbohidratos/proteína en el rumen, que reduce la tasa de síntesis microbiana, aumentando consecuentemente la excreción de amonio al ambiente. Las concentraciones de proteína digestible y FDN en el presente experimento, 13.9 y 44.8% de la MS, respectivamente, superaron los valores referenciados por los autores. El efecto negativo de la FDN sobre la EUN y la EUE puede ser atribuido a la menor digestibilidad de los nutrientes. Dietas fibrosas, como las del presente experimento, limitan físicamente el CMSt porque presentan menor tasa de digestión y de pasaje, con lo cual se afecta la producción de leche y la eficiencia. Además, dietas fibrosas contienen menor energía para soportar el crecimiento microbiano.

Emisión de Metano Entérico

Si bien la producción de CH_4 entérico es muy variable, ya sea expresada en relación con el CMSt (entre 18.5-50.2 L/kg; Ramin y Huhtanen, 2013) o con base en la EB consumida (Y_m) (2-12%; Bougouin *et al.*, 2018), se observa que los valores obtenidos en este trabajo están próximos al límite inferior, 25.6 L CH_4 /kg MS consumido (Cuadro 7) y 5.6% de la EB (Cuadro 6). Noguera y

Posada (2017), trabajando con vacas Holstein en el segundo tercio de lactancia, registraron una producción de 22.5 ± 5.5 L CH_4/kg de MS consumida y un Y_m de $4.9 \pm 1.2\%$.

El consumo de FDN ha sido relacionado con la emisión de CH_4 entérico porque el perfil fermentativo de esta fracción favorece la producción de ácido acético, que desde el punto de vista estequiométrico da origen a la formación de CH_4 . Esto se evidencia cuando se compara la producción absoluta de CH_4 del presente experimento (428.8 L/día) (Cuadro 7) con la informada por Noguera y Posada (2017) (402 L/día), quienes garantizaron una dieta con menor concentración de FDN. No obstante, con dietas fibrosas, como las del presente trabajo, es de esperar una menor relación L CH_4/kg FDN porque la tasa de fermentación ruminal es menor. Bougouin *et al.* (2018) confirman el anterior concepto al reportar producciones de CH_4 de 482.5 y 394.5 L/día en dietas altas en fibra y en almidón, respectivamente, y de 50.8 y 60.2 L/kg FDN, correspondientemente.

A nivel mundial se han realizado grandes esfuerzos para mitigar el impacto ambiental de la ganadería. Una de las alternativas consiste en mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes y aumentar el nivel productivo de cada individuo, con lo cual la cantidad de CH_4 será menor por unidad de producto. En el presente trabajo no se observó diferencia entre tratamientos en la producción de CH_4 por cada kilogramo de leche. El valor medio encontrado (24.9 L/kg LCG 4.0%) (Cuadro 7) superó el reportado por Noguera y Posada (2017) de 16.7 L/kg LCG 4.0%. Evidentemente, el nivel productivo de los animales determina en gran medida esta relación, de allí que los valores obtenidos pueden ser muy variables.

CONCLUSIONES

- La inclusión de ingredientes como sorgo, yuca y pulpa cítrica en reemplazo parcial del maíz en concentrados para va-

cas Holstein en el segundo y tercer tercio de lactancia no afectó el consumo y la digestibilidad de la materia seca, la producción y composición de la leche, el balance energético y nitrogenado, ni la eficiencia de utilización de estos componentes, razón por la que pueden ser consideradas fuentes alternativas de energía.

- Los tratamientos no tuvieron efecto sobre la producción de CH_4 en sus diferentes formas de expresión, posiblemente en respuesta a la similitud en el consumo de materia seca, la relación forraje: concentrado y la composición química de las dietas.

Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Universidad de Antioquia y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación – Minciencias de la República de Colombia – por la financiación de este trabajo a través de los proyectos 58414 (Convocatoria 745 de 2016) y 66737 (Convocatoria 836-2019).

LITERATURA CITADA

1. **Aguilar M, Hanigan MD, Tucker HA, Jones BL, Garbade SK, McGilliard ML, Stallings CC, et al. 2012.** Cow and herd variation in milk urea nitrogen concentrations in lactating dairy cattle. *J Dairy Sci* 95: 7261-7268. doi: 10.3168/jds.2012-5582
2. **Balthrop J, Benedikt B, Cowie R, Danier J, De Boever J, Leon de Jonge, Jackson F, Makkar H, Piotrowski C. 2011.** Quality assurance for animal feed analysis laboratories. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 193 p.
3. **Bampidis VA, Robinson PH. 2006.** Citrus by-products as a ruminant feeds: a review. *Anim Feed Sci Tech* 128: 175-217. doi: 10.1016/j.anifeedsci. 2005.12.002

4. **Bougouin A, Ferlay A, Doreau M, Martin C. 2018.** Effects of carbohydrate type or bicarbonate addition to grass silage-based diets on enteric methane emissions and milk fatty acid composition in dairy cows. *J Dairy Sci* 101: 6085-6097. doi: 10.3168/jds.2017-14041
5. **Cardona-Iglesias JL, Mahecha-Ledesma L, Angulo-Arizala J. 2019.** Consumo y productividad en vacas Holstein pastoreando un sistema silvopastoril vs monocultivo de kikuyo y suplementadas con grasas insaturadas. *Rev Cient-Fac Cien V* 29: 20-33.
6. **Conrad HR, Weiss WP, Odwongo WO, Shockey WL. 1984.** Estimating net energy lactation from components of cell solubles and cell walls. *J Dairy Sci* 67: 427-436. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(84)81320-X
7. **Correa HJ, Jaimes LJ, Avellaneda JH, Pabón M, Carulla J. 2016.** Efecto de la edad de rebrote del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) sobre la producción, la calidad de la leche y el balance de nitrógeno en vacas Holstein. *Livest Res Rural Dev* 28(47). [Internet]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd28/3/jaim28047.html>
8. **Correa HJ, Pabón ML, Carulla JE. 2008a.** 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. *Livest Res Rural Dev* 20. [Internet]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd20/4/corra20059.htm>
9. **Correa HJ, Pabón ML, Carulla JE. 2008b.** Valor nutricional del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov.) para la producción de leche en Colombia (Una revisión): II-Contenido de energía, consumo, producción y eficiencia nutricional. *Livest Res Rural Dev* 20(61). [Internet]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd20/4/corr20061.htm>
10. **[EPA] United States Environmental Protection Agency. 2023.** Overview of greenhouse gases. [Internet]. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
11. **Escobar L, Bolívar DM, García D. 2010.** Uso de la excreción de creatinina como método alternativo a la colecta total de orina en vacas Holstein. *Rev Fac Nal Agr* 63: 5567-5576.
12. **Gallego LA, Mahecha, Angulo J. 2017.** Producción, calidad de leche y beneficio: costo de suplementar vacas Holstein con *Tihonia diversifolia*. *Agron Mesoam* 28: 357-370. doi: 10.15517/ma.v28i2.25945
13. **García SC, Islam MR, Clark CE, Martin PM. 2014.** Kikuyu-based pasture for dairy production: a review. *Crop Pasture Sci* 65: 787-797. doi: 10.1071/CP13414
14. **Gómez LM, Posada SL, Rosero R, Olivera ME. 2020.** Effect of carbohydrate source on productive performance, ruminal and systemic health of grazing cows. *Rev Colomb Cienc Pec* 33: 204-216.
15. **Hansen KM, Thuesen AB, Soderberg JR. 2001.** Enzyme assay for identification of pectin and pectin derivatives, based on recombinant pectate lyase. *JAOAC Int* 84: 1851-1854. doi: 10.1093/jaoac/84.6.1851
16. **Haque MN. 2018.** Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *J Anim Sci Tech* 60: 1-10. doi: 10.1186/s40781-018-0175-7
17. **Hess HD, Flórez H, Lascano C, Baquero L, Becerra A, Ramos J. 1999.** Fuentes de variación en la composición de la leche y niveles de urea en sangre y leche de vacas en sistemas de doble propósito en el trópico bajo de Colombia. *Trop Grasslands* 21: 33-42.
18. **Hoyos JE, Angulo J, Mahecha L, Willem H, Cerón M. 2021.** Comparación productiva y de calidad en leche de vacas holstein pastoreando en diferentes sistemas del trópico alto. *Acta Agron* 70: 35-41.

19. **Hristov AN, Bannink A, Crompton LA, Huhtanen P, Kreuzer M, McGee M, Nozière P, et al. 2019.** Nitrogen in ruminant nutrition: a review of measurement techniques. *J Dairy Sci* 102: 5811-5852. doi: 10.3168/jds.2018-15829
20. **Jonker JS, Kohn RA, Erdman RA. 1999.** Milk urea nitrogen target concentrations for lactating dairy cows fed according to national research council recommendations. *J Dairy Sci* 82: 1261-1273. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(99)-75349-X
21. **Jonker JS, Kohn RA, High J. 2002.** Dairy herd management practices that impact nitrogen utilization efficiency. *J Dairy Sci* 85: 1218-1226. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(02)74185-4
22. **[NRC] National Research Council. 2001.** Nutrient requirements of dairy cattle. 7^a ed. Washington, USA: National Academy Press. 405 p.
23. **Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, et al. 2006.** Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *J Anim Sci* 84: 145-153. doi: 10.2527/2006.841145x.
24. **Noguera RR, Posada SL. 2017.** Factor de emisión de metano entérico para vacas Holstein lactantes en la zona norte de Antioquia-Colombia. *Livest Res Rural Dev* 29(119). [Internet]. Disponible en: <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd29/6/cont2906.htm>
25. **Phuong HN, Friggens NC, de Boer IJM, Schmidely P. 2013.** Factors affecting energy and nitrogen efficiency of dairy cows: a meta-analysis. *J Dairy Sci* 96: 7245-7259. doi: 10.3168/jds.2013-6977
26. **R Core Team. 2020.** R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Internet]. Disponible en: <https://www.R-project.-org/>
27. **Ramin M, Huhtanen P. 2013.** Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. *J Dairy Sci* 96: 2476-2493. doi: 10.3168/jds.2012-6095
28. **Van Soest PJ. 1994.** Nutritional ecology of the ruminant. 2^a ed. New York, USA: Cornell University Press. 373 p.
29. **VandeHaar MJ, St-Pierre N. 2006.** Major advances in nutrition: relevance to the sustainability of the dairy industry. *J Dairy Sci* 89: 1280-1291. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72196-8
30. **Viljoen C, van der Colf J, Swanepoel P.A. 2020.** Benefits are limited with high nitrogen fertilizer rates in kikuyu-ryegrass pasture systems. *Land* 9: 1-20. doi: 10.3390/land9060173
31. **Williams CH, David DJ, Lismaa O. 1962.** The determination of chromic oxide in faeces samples by atomic absorption spectrophotometry. *J Agr Sci* 59: 381-385. doi: 10.1017/S002185960001546X