



ESTIMACIÓN DE METABOLITOS SECUNDARIOS Y EMISIONES DE METANO EN ENSILADOS DE SORGO †

[ESTIMATION OF SECONDARY METABOLITES AND METHANE EMISSIONS IN SORGHUM SILAGE]

M. Rosas-Dávila¹, E. Morales-Almaraz^{1*}, F. López-González²
and C. M. Arriaga-Jordan²

¹ *Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. Campus UAEM El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México, CP 50090. E-mail: mrosasd153@alumno.uaemex.mx;*

emoralesa@uaemex.mx

² *Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), Universidad Autónoma del Estado de México, Campus UAEM El Cerrillo Piedras Blancas, 50090 Toluca, Estado de México, México. E-mails: flopezg@uaemex.mx* cmarriagaj@uaemex.mx*

**Corresponding author*

SUMMARY

Background. Feeding cattle in small-scale silage-based dairy production systems can improve their production efficiency while reducing greenhouse gas emissions. **Objective.** To determine the effect of partial replacement of corn silage with sorghum silage on the concentration of secondary metabolites in terms of Total Phenols (TP), Total Tannins (TT), and Condensed Tannins (CT), as well as to estimate methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) emissions. **Methodology.** The treatments were analyzed with a split-plot experimental design where the treatments (main plot) were; T1 = 50% sorghum silage cv Top Green + 50% corn silage, T2 = 50% sorghum silage cv Caña Dulce + 50% corn silage, T3 = 100% corn silage cv Cenzontle (control), and the measurement periods were the minor plots. **Results.** Inclusion of sorghum silage decreased enteric methane and carbon dioxide emissions (P<0.05), even though the concentration of phytochemical compounds among cultivars was not variable (P>0.05). **Implications.** Understanding the impact of changing forage chemical composition on reducing greenhouse gas (GHG) emissions in dairy systems is an important issue for mitigating climate change. **Conclusions.** The inclusion of sorghum silage in this study slightly reduced enteric methane and carbon dioxide emissions. Under these conditions, it is suggested that more information be provided on greenhouse gas emission factors and mitigation strategies in small-scale production systems.

Key words: fermented forages, methane, ruminants, total phenolic compounds, total tannins, condensed tannins.

RESUMEN

Antecedentes. La alimentación de bovinos en los sistemas de producción de leche en pequeña escala basada en ensilados, puede mejorar su eficiencia productiva, al tiempo que puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. **Objetivo.** Determinar el efecto de la sustitución parcial de ensilado de maíz con ensilado sorgo sobre la concentración de metabolitos secundarios en términos de Fenoles Totales (FT), Taninos Totales (TT), y Taninos Condensados (TC), así como estimar emisiones de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). **Metodología.** Los tratamientos se analizaron con un diseño experimental de parcelas divididas donde los tratamientos (parcela principal) fueron; T1 = 50 % ensilado de sorgo cv Top Green + 50% ensilado de maíz, T2 = 50 % ensilado de sorgo cv Caña Dulce + 50% ensilado de maíz, T3 = 100% ensilado de maíz cv Cenzontle (testigo), y los periodos de medición fueron las parcelas menores. **Resultados.** La inclusión del ensilado de sorgo disminuyó las emisiones entéricas de metano y dióxido de carbono (P<0.05), aun cuando la concentración de compuestos fitoquímicos entre cultivares no fue variable (P>0.05). **Implicaciones.** Conocer el impacto del cambio de la composición química de los forrajes en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los sistemas lecheros es una cuestión importante para mitigar el cambio climático. **Conclusiones.** La inclusión del ensilado de sorgo en este estudio disminuyó ligeramente las emisiones de metano entérico y dióxido de carbono. Bajo estas condiciones, se sugiere ampliar la información sobre los factores de emisión y estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en los sistemas de producción en pequeña escala.

Palabras clave: forrajes fermentados; rumiantes; compuestos fenólicos totales; taninos totales; taninos condensados.

† Submitted July 18, 2024 – Accepted January 20, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5746>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = M. Rosas-Dávila: <https://orcid.org/0000-0003-1188-3585>; E. Morales-Almaraz: <https://orcid.org/0000-0003-0675-2193>; F. López-González: <https://orcid.org/0000-0002-5518-5458>; C.M. Arriaga-Jordán: <https://orcid.org/0000-0002-6140-0847>

INTRODUCCIÓN

Aunque la ganadería lechera de pequeña escala ha sido reconocida como un medio de vida de las comunidades campesinas (Espinoza-Ortega *et al.*, 2007; Rosas-Dávila *et al.*, 2020), también existe la preocupación a nivel mundial por los impactos ambientales de la producción bovina, que es particularmente intensiva en emisiones de metano (CH₄) entérico; con un impacto desproporcionalmente mayor que el dióxido de carbono (CO₂) para inducir el calentamiento global y el cambio climático (Aguirre-Villegas *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2018; Robles-Jiménez *et al.*, 2021; Zanon *et al.*, 2023). En estas circunstancias, la producción animal y la conservación ambiental consensan el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Toro-Mujica *et al.*, 2017; Eugene *et al.*, 2021).

Paradójicamente, la producción de leche de vaca representa una de las principales actividades económicas del país (Robles-Jiménez *et al.*, 2021); ratificando la necesidad de fomentar la sostenibilidad agrícola en la producción animal frente a la creciente aridez y la disminución de los recursos (Aguirre-Villegas *et al.*, 2017; Sabertanha *et al.*, 2021).

Al respecto, los sistemas de producción de leche de pequeña escala, influidos por la dependencia de insumos externos (concentrados comerciales, que representan hasta el 70% de los costos de producción), el cambio climático, y la baja calidad nutricional de los forrajes, proyecta la sensible realidad del sistema ganadero (Prospero-Bernal *et al.*, 2017). En estos escenarios, es imperativo adoptar estrategias no solo para incrementar su productividad, sino para la mitigación de emisiones de GEL, soluciones como: mejorar el valor nutricional de los forrajes, la complementación estratégica de la dieta (suplementación con concentrado) o la selección de cultivos (por ejemplo, forrajes taníferos), podrían aplanar la curva de la intensidad de emisiones de CH₄ (CH₄ g/kg de producto), al tiempo que se aumenta la eficiencia general del uso de nutrientes del alimento (Hristov *et al.*, 2013; Benaouda *et al.*, 2017; Vega-García *et al.*, 2024).

A medida que se hacen más frecuentes las repercusiones ambientales (calentamiento atmosférico, alteración del régimen estacional de precipitaciones y la falta de forrajes adaptados a condiciones más secas), como compensación, las prácticas adaptativas tendrán una mayor dependencia a cultivos tolerantes al calor (Yang *et al.*, 2019).

En estas circunstancias, el sorgo se ha convertido en un recurso alimentario cada vez más común, justificado por sus características agronómicas y nutricionales como: adaptación, eficiencia hídrica, capacidad de rebrote, producción de materia seca; contenido

moderado de proteína cruda y carbohidratos solubles, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2007; McCary *et al.*, 2020; Sabertanha *et al.*, 2021), pero, generalmente ricos en compuestos anti-nutricionales, particularmente, sustancias tánicas (taninos totales, taninos condensados, fitatos y ácido cianhídrico) (Oliveira *et al.*, 2007; McCary *et al.*, 2020; Sabertanha *et al.*, 2021), relacionadas con la reducción de la disponibilidad de proteínas y carbohidratos en la digestión (Goel and Makkar, 2012; Díaz-Medina *et al.*, 2021), y efectos beneficiosos asociados con el potencial para disminuir la metanogénesis entérica (Andrade-Rivero *et al.*, 2012), debido a su efecto en la reducción de las poblaciones protozoarias y bacterias metanogénicas (efecto directo) o a través de la reducción de la degradación de los componentes de la dieta (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2017). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la sustitución del ensilado de maíz por ensilado de sorgo en dietas de vacas lecheras sobre la concentración de metabolitos secundarios y la estimación de las emisiones de metano y dióxido de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en condiciones de campo, en Aculco (20° 17' N y 100° 00' O; altitud 2440 m sobre el nivel del mar), en el altiplano central de México, durante el período seco de primavera del 12 de marzo al 22 de abril de 2022. La región es templada subhúmeda, con un rango de precipitación anual de 800 a 1000 mm y una temperatura media de 13.5°C y con predominancia de suelo phaeozem y vertisol (50.01 y 29.19% de su territorio, respectivamente) (INEGI, 2013).

Ensilados

Los cultivos se establecieron en parcelas contiguas de una hectárea cada uno, con una dosis de 36.2 kg de semilla de maíz/ha (híbrido variedad Cenzontle) y 20 kg de semilla de sorgo/ha (Caña Dulce o Top Green). La fertilización se realizó con 302.5 kg N, 92 kg P y 120 kg K/ha. Para el control de malas hierbas se aplicó en post emergencia un herbicida a base de atrazina (1 l/ha) + prosulfuron (30 g/ha). Las plantas se cosecharon en una etapa de crecimiento lechoso-masoso del grano (350 g MS /kg).

Tratamientos

Se analizó el efecto de la inclusión de dos variedades de forraje de sorgo (Caña Dulce y Top Green) ensilado como un complemento al ensilado de maíz para la alimentación de nueve vacas lecheras (Rosas-Dávila *et*

al., 2024). Los tratamientos fueron T1: Ensilado de maíz (5 kg MS) + ensilado de sorgo variedad Top Green (5 kg MS), T2: Ensilado de maíz (5 kg MS) + ensilado de sorgo variedad Caña Dulce (5 kg MS), T3: Ensilado de maíz (10 kg MS) (testigo). Adicional a los forrajes de los tratamientos, un concentrado comercial y heno de alfalfa completaron la dieta, estos fueron fijos para todos los tratamientos (3.7 y 2.4 kg MS, respectivamente). Los tratamientos (ensilados más complementos) fueron suministrados a vacas lecheras en tres periodos experimentales de 14 días cada uno, 12 días de adaptación y 2 de medición como lo describen Rosas-Dávila *et al.* (2024). Las muestras de la oferta de los alimentos que conformaron los tratamientos se tomaron los últimos dos días de cada periodo.

Análisis de laboratorio

Las muestras de alimentos se secaron por 72 h, aproximadamente a 30 °C en un horno botánico para evitar la desnaturalización de los metabolitos secundarios. La concentración de compuestos Fenólicos Totales (FT) y Taninos Totales (TT) fueron cuantificados mediante el método de Folin-Ciocalteu (Makkar, 2003). Los Taninos Condensados (TC) se determinaron por la técnica butanol HCL (Makkar, 2007) y la producción de metano se estimó a partir de los procedimientos reportados por Niu *et al.* (2018):

$$\text{CH}_4 \text{ (g/d)} = -60.5 + (12.4 * \text{CMS}) - (8.78 * \% \text{EE}) + (2.1 * \% \text{FDN}) + (16.1 * \% \text{grasa en leche}) + (0.148 * \text{PV})$$

Dónde: CMS = consumo de materia seca (kg/vaca/día), EE = extracto etéreo de la dieta, FDN = fibra detergente neutro de la dieta y PV = peso vivo (kg/vaca). A partir de los resultados reportados por Rosas-Dávila *et al.* (2024)

El factor de corrección para metano Ym (proporción de la energía bruta perdida como metano) fue calculado del IPCC (2019): $Y_m = [100 * \text{CH}_4 \text{ (MJ/día)} / \text{Consumo de EB (MJ/día)}]$

El dióxido de carbono (CO₂) se estimó a partir de los gramos de CH₄ (Robles-Jiménez *et al.*, 2021), de la siguiente manera: $\text{CO}_2 = \text{g CH}_4/\text{d} * 28$

Diseño experimental

Las variables respuesta (CH₄, Ym, CO₂, FT, TT, TC) se evaluaron con un diseño de parcelas divididas (Plata-Reyes *et al.*, 2023), donde los tratamientos fueron el efecto fijo (parcelas principales), y los periodos de medición los efectos aleatorios (parcelas menores), el modelo estadístico para el análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + R_i + T_j + E_K + p_l + T_{p_{jl}} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde, μ = media general; R = efecto debido a las réplicas (divisiones de las parcelas), $i = 1, 2$; T = efecto debido a los tratamientos (parcela principal), $j = 1, 2, 3$; E = error de las parcelas principales; p = efecto debido a los periodos experimentales (parcela menor), $l = 1, 2, 3$; T_p = efecto debido a la interacción entre tratamientos y periodos experimentales; y ε = error residual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 presenta la concentración de metabolitos secundarios en las dietas evaluadas con la inclusión de ensilado de sorgo.

La sustitución parcial del ensilado de maíz por ensilado de sorgo no mostró ningún efecto sobre la concentración de Fenoles Totales (FT), Taninos Totales (TT) o Taninos Condensados (TC) entre tratamientos ($P > 0.05$), periodos de muestreo ($P > 0.05$) o en sus interacciones (tratamientos x periodos de muestreo) ($P > 0.05$; Tabla 1). Sin embargo, se pudo apreciar que la inclusión de ensilado de sorgo, aportó cuantitativamente más metabolitos secundarios a la dieta.

El contenido de TC de los ensilados fue superior a los valores reportados por Dini *et al.* (2012) en praderas de pasto (2.8 g/kg MS) o de leguminosas (4.6 g/kg MS). Los valores de FT, TT y TC se encuentran en un rango similar a los encontrados por Ojeda *et al.* (2010) en híbridos de sorgo granífero con concentraciones de compuestos fenólicos de 9.2 a 3.7 g/kg MS, TT con 6.1 a 2.9 g/kg MS y TC de 9.5 a 6.5 g/kg MS. Según Oliveira *et al.* (2007), la presencia de taninos en forrajes como el sorgo, podrían disminuir las emisiones de metano, por un efecto inhibitorio de la fermentación de las fibras mediante la formación de complejos lignocelulósicos con una disminución en la producción de H₂ o debido a la inhibición de los microorganismos celulíticos. Las variedades de sorgo evaluadas en el presente estudio mostraron valores de taninos por debajo del rango adverso (20 g/kg MS) para el crecimiento de la microbiota ruminal y la cinética de fermentación (Andrade-Rivero *et al.*, 2012), es decir, no tendrían una acción negativa sobre el valor nutritivo del sorgo.

La tabla 2 muestra las emisiones de metano estimadas. La producción de CH₄ (g/vaca/día), el rendimiento de CH₄ (g/kg MS ingerida) y la proporción de la energía bruta perdida como metano (factor Ym), fueron diferentes entre los tratamientos ($P < 0.05$). El incremento de la producción diaria de CH₄ (g/vaca) en T3 podría estar asociado con una elevada cantidad de carbohidratos insolubles, pero potencialmente fermentables en el ensilado de maíz, además,

cuantitativamente se observó el contenido más bajo de metabolitos secundarios en T3. De acuerdo con Ku-Vera *et al.* (2020), los metabolitos secundarios de las plantas pueden modular el microbioma del rumen y modificar su función, mejorando la degradación de la fibra y reduciendo la pérdida de energía del alimento en forma de metano.

Es interesante notar que no obstante el bajo contenido de taninos y fenoles, sin diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 1), se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para todas las variables excepto la de intensidad de emisión expresada en g CH₄/kg leche. Sin embargo, cuando la

leche se expresó en leche corregida al 3.5% de grasa, se presentaron diferencias significativas, con una menor intensidad de emisión en los tratamientos T1 y T2 que contenían los ensilados de sorgo (Tabla 2). Los taninos tienen la capacidad de reducir la síntesis de metano en el rumen directa o indirectamente por la inhibición de la población de metanógenos o protozoarios, respectivamente (Ku-Vera *et al.*, 2020). Sin embargo, de acuerdo con Jayanegara *et al.* (2012), parte de esa disminución de metano puede ser debido a una disminución del consumo de materia seca y de la digestibilidad de nutrientes, lo cual puede impactar negativamente la producción del animal.

Tabla 1. Concentración de metabolitos secundarios en dietas de vacas lecheras con ensilado de sorgo (Caña Dulce y Top Green).

Variables	Periodos experimentales			Media τ	EEM _T	EEM _{PE}
	PE1	PE2	PE3			
				FT (g/kg MS)	1.37 ^{NS}	0.97 ^{NS}
T1	7.5	8.4	8.3	8.1		
T2	8.8	9.4	11.6	9.9		
T3	6.2	7.5	8.3	7.0		
Media _{PE}	7.5	8.4	9.5			
EEM _{T*PE} = 0.18 ^{NS}						
				TT (g/kg MS)	1.45 ^{NS}	1.01 ^{NS}
T1	3.2	3.8	4.1	3.6		
T2	3.7	5.5	6.7	5.3		
T3	1.2	3.0	3.7	2.3		
Media _{PE}	2.7	4.1	4.8			
EEM _{T*PE} = 0.17 ^{NS}						
				TC (g/kg MS)	3.58 ^{NS}	1.97 ^{NS}
T1	4.9	5.7	9.5	6.7		
T2	7.8	9.3	14.2	9.9		
T3	2.7	2.8	3.8	2.9		
Media _{PE}	5.1	5.9	9.1			
EEM _{T*PE} = 0.48 ^{NS}						

T1= 50 % ensilado de sorgo cv Top Green + 50% ensilado de maíz; T2= 50% ensilado de sorgo cv Caña Dulce + 50% ensilado de maíz; T3= 100% ensilado de maíz cv Cenzontle; FT= Fenoles Totales; TT= Taninos Totales; TC= Taninos Condensados; PE= Periodo experimental; EEM_T= Error estándar de la media de los tratamientos; EEM_{PE}= Error estándar de la media de los periodos experimentales; EEM_{T*PE}= Error estándar de la media de la interacción entre tratamientos y periodos experimentales; NS (P>0.05); *(P<0.05).

Tabla 2. Efecto de la inclusión del ensilado de sorgo (Caña Dulce y Top Green) en la alimentación de vacas lecheras sobre las emisiones de metano (CH₄).

Variables	Tratamientos			EEM	Periodos experimentales			EEM
	T1	T2	T3		PE1	PE2	PE3	
CH ₄ (g/vaca/d)	325.2 ^b	333.9 ^a	339.9 ^a	3.32*	333.3	329.6	336.2	3.32 ^{NS}
CH ₄ (g/kg MS)	23.4 ^a	23.1 ^b	21.7 ^c	0.11*	22.7	22.7	22.9	0.11 ^{NS}
CH ₄ (g/kg leche)	15.5	16.2	16.8	0.46 ^{NS}	15.8 ^b	15.8 ^b	17.1 ^a	0.46*
CH ₄ (g/kg LCG 3.5%)	14.2 ^b	14.8 ^b	15.7 ^a	0.37*	14.7	14.7	15.4	0.37 ^{NS}
Y _m	6.9 ^a	6.8 ^b	6.4 ^c	0.02*	6.7 ^b	6.7 ^b	6.8 ^a	0.02*
CO ₂ (eq kg d/kg LCG 3.5%)	0.40 ^b	0.41 ^b	0.43 ^a	0.01*	0.4	0.4	0.4	0.01 ^{NS}

T1= 50 % ensilado de sorgo cv Top Green + 50% ensilado de maíz; T2= 50% ensilado de sorgo cv Caña Dulce + 50% ensilado de maíz; T3= 100% ensilado de maíz cv Cenzontle; PE= Periodo experimental; LCG= Leche corregida en grasa 3.5%; EEM= Error estándar de la media; NS (P>0.05); *(P<0.05).

Los valores medios de CH₄ en este experimento están en el rango reportado en Uruguay por Dini *et al.* (2012), para ganado lechero en pastoreo de forrajes templados, con un rendimiento de CH₄ por unidad de materia seca de 22.2 g/kg MS y como porcentaje de energía bruta consumida, Y_m= 6.6%; los autores explican que los animales alimentados con leguminosas, disminuyen la proporción de energía perdida como CH₄ g/kg MS, al promover un mayor consumo de materia orgánica. Por otra parte, Goel and Makkar (2012) indicaron que la pérdida de energía como metano en ganado alimentado con forrajes tropicales era mayor que en aquellos alimentados con forrajes templados, debido a sus niveles altos de fibra y lignina y bajo nivel de carbohidratos no estructurales en los forrajes tropicales, lo que da un aumento de la metanogénesis ruminal. El rendimiento de CH₄ g/kg MS también fue consistente con los hallazgos reportados en Nueva Zelanda por Jonker *et al.* (2017), entre el ganado lechero y el de carne, alimentadas 100% con pasto fresco con una producción de CH₄ de 64 a 325 g/día y un rendimiento de CH₄ de 21.4 a 26.5 g/kg MS.

De este modo, el consumo de forrajes con un alto contenido de carbohidratos solubles (almidón) y un bajo grado de lignificación, aumenta la digestibilidad de los alimentos y reduce la cantidad de CH₄ generado. De otro modo, en los alimentos altos en carbohidratos estructurales, donde los ácidos fenólicos y la lignina están ligados, su consumo limita la digestibilidad de los polisacáridos, produciendo más CH₄ por unidad de sustrato digerido (Vega-García *et al.*, 2024).

En relación al valor nutricional de los alimentos que completaron la dieta de las vacas, Rosas-Dávila *et al.* (2024) describen la composición química de estos, brevemente, el concentrado comercial tuvo 931.3 gr MS, 205.8 gr PB, 302.7 gr FDN, 141.1 g FDA, 12.1 MJ de EM y una digestibilidad *in vitro* de la MS de 80.7%; y el heno de alfalfa 941.3 gr MS, 194.3 gr PB, 381.5 gr FDN, 252.1 g FDA, 11.9 MJ de EM y una digestibilidad *in vitro* de la MS de 79.7%. Así mismo, la digestibilidad *in vitro* de la MS de estos forrajes fue de 63.2, 65.3 y 67.9% para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente (Rosas-Dávila *et al.*, 2023), estos valores muestran una relación estrecha con la producción de CH₄/kg de MS (Tabla 2), reflejando una disminución de metano cuando la digestibilidad de la MS del ensilado se eleva. Otros estudios que usaron aditivos en el forraje de sorgo para ensilar, han observado una disminución de la producción *in vitro* de metano con el incremento de la digestibilidad *in vitro* de la MS (Kaewpila *et al.*, 2021) y con la inhibición de la degradación de la proteína (Khota *et al.*, 2017) en el ensilado de sorgo.

La intensidad de las emisiones de metano (CH₄ g/kg LCG 3.5%) del tratamiento testigo (T3) fue 8%

superior al generado bajo T1 y T2 (P<0.05), estas diferencias reflejan la baja eficiencia alimenticia para transformar la energía consumida en leche (producción de leche menor), que se traduce en una mayor emisión de CH₄ por unidad de producto. La intensidad media de emisiones de CH₄ fue análoga a las estimaciones reportadas por Carrillo-Hernández *et al.* (2021) con estrategias de alimentación convencionales en Sistemas de Producción de Leche de Pequeña Escala (SPLPE) del centro de México (15.1 g CH₄/kg leche). Los valores de CH₄ expresadas como CO₂-eq fueron igualmente mayores en el tratamiento testigo (T3) (P<0.05).

La variación del efecto anti-metanogénico de los taninos es inconsistente dependiendo del tipo de taninos, su estructura, el peso molecular, la dosis, la fuente y la especie animal utilizada (Piñeiro-Vázquez *et al.*, 2018), adicionalmente, la producción de CH₄ puede variar por factores que incluyen la etapa fisiológica del animal, la técnica de predicción y los componentes de la dieta como las proporciones de almidón y fibra detergente neutro (FDN) (Dong *et al.*, 2019).

Así, el desarrollo de estrategias para reducir la producción entérica de metano puede, por un lado, contribuir a aminorar los efectos del CH₄ sobre el cambio climático y, por otro lado, traer beneficios económicos a los ganaderos al hacer animales más eficientes en el uso de la energía de los alimentos (Benaouda *et al.*, 2017).

CONCLUSIÓN

En las condiciones experimentales evaluadas, sustituir hasta el 50% del ensilado de maíz por ensilado de sorgo (Caña Dulce o Top Green), no presentó cambios en los metabolitos secundarios (Fenoles Totales (FT), Taninos Totales (TT) o Taninos Condensados (TC)); sin embargo, la estimación de la producción de metano en vacas por kg de leche corregida en grasa disminuye con la inclusión de ensilado de sorgo indistintamente de la variedad de sorgo, pero en contraste, la producción diaria de metano por vaca y por kilogramo de materia seca consumida así como la pérdida de energía bruta como metano se elevan con el ensilado de sorgo variedad Top Green en comparación con el ensilado de maíz. Se sugiere ampliar la información sobre los efectos metabólicos positivos de los compuestos secundarios del sorgo.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de posgrado otorgada a Melchor Rosas Dávila.

Funding. This work was funded by Universidad Autónoma del Estado de México, Project 6217/2020CID

Conflict of interests. Nothing to declare.

Data availability. Data is available with the corresponding author upon reasonable request.

Compliance with ethical standards. Experimental procedures were approved by the ethics and animal welfare committee of the Universidad Autónoma del Estado de México. Approval number DICARM-1623.

Author contribution Statement (CRediT). **M. Rosas-Dávila**- writing – original draft, methodology, validation. **E. Morales-Almaráz** – Writing – review and editing, validation. **F. López-González** - conceptualization, writing – review and editing, methodology. **C.M. Arriaga-Jordán** - conceptualization, writing- review and editing, supervision, validation.

REFERENCES

- Aguirre-Villegas, H.A., Passos-Fonseca, T.H., Reinemann, D.J. and Larson, R., 2017. Grazing intensity affects the environmental impact of dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 100(8), pp. 6804-6821. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12325>
- Andrade-Rivero, E., Martínez-Campos, A.R., Castelán-Ortega, O.A., Ríos-Quezada, J., Pacheco-Ortega, Y. and Estrada-Flores, J.G., 2012. Producción de metano utilizando plantas taníferas como substrato en fermentación ruminal *in vitro* y efecto de extractos fenólicos en la microflora ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15(2), pp. 301-312. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/841>
- Benaouda, M., González-Ronquillo, M., Molina, L.T. and Castelán-Ortega, O.A., 2017. Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4), pp. 965-974. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.20>
- Carrillo-Hernández, S., López-González, F., Estrada-Flores, J.G. and Arriaga-Jordán, C.M., 2020. Milk production and estimated enteric methane emission from cows grazing ryegrass pastures in small-scale dairy systems in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 52(6), pp. 3609-3619. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02398-0>
- Díaz-Medina, L.K., Colín-Navarro, V., Arriaga-Jordán, C.M., Brunett-Pérez, L., Vázquez-De-Aldana, B.R. and Estrada-Flores, J.G., 2021. In vitro nutritional quality and antioxidant activity of three weed species as feed additives for sheep in the Central Highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 53(3), pp. 394. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02819-8>
- Dini, Y., Gere, J., Briano, C., Manetti, M., Juliarena, P., Picasso, V., Gratton, R. and Astigarraga, L., 2012. Methane emission and milk production of dairy cows grazing pastures rich in legumes or rich in grasses in Uruguay. *Animals*, 2(2), pp. 288-300. <https://doi.org/10.3390/ani2020288>
- Dong, L., Li, B. and Diao, Q., 2019. Effects of dietary forage proportion on feed intake, growth performance, nutrient digestibility, and enteric methane emissions of Holstein heifers at various growth stages. *Animals*, 9(10), pp. 725. <https://doi.org/10.3390/ani9100725>
- Espinoza-Ortega, A., Espinosa-Ayala, E., Bastida-López, J., Castañeda-Martínez, T. and Arriaga-Jordán, C.M., 2007. Small-scale dairy farming in the highlands of central Mexico: Technical, economic, and social aspects and their impact on poverty. *Experimental Agriculture*, 43(2), pp. 241-256. <https://doi.org/10.1017/S0014479706004613>
- Eugene, M., Klumpp, K. and Sauvant, D., 2021. Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass and Forage Science*, 76(2), pp. 196-204. <https://doi.org/10.1111/gfs.12540>
- Goel, G. and Makkar, H. P., 2012. Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health Production*, 44(4), pp. 729-739. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9966-2>
- Hristov, A.N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, A., Yang, W., Tricarico, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J. and Oosting, S., 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera – Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las

- emisiones de gases diferentes al CO₂. Editado por Pierre J. Gerber, Benjamín Henderson y Harinder P.S. Makkar. Producción y Sanidad Animal FAO Documento No. 177. FAO, Roma, Italia.
- INEGI., 2013. Compendio de información geográfica municipal 2010. Aculco, México.
- IPCC., 2019. Emissions from livestock and manure management. In Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (ed) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jayanegara, A., F. Leiber, and M. Kreuzer. 2012. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 96, pp.365–375. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x>
- Jonker, A., Molano, G., Koolaard, J. and Muetzel, S. (2017). Methane emissions from lactating and non-lactating dairy cows and growing cattle fed fresh pasture. *Animal Production Science*, 57(4), pp. 643-648. <https://doi.org/10.1071/AN15656>
- Kaewpila, C., Gunun, P., Kesorn, P. Subepang, S., Thip-Uten, S., Cai, Y., Pholsen, S., Cherdthong, A. and Khota, W., 2021. Improving ensiling characteristics by adding lactic acid bacteria modifies in vitro digestibility and methane production of forage-sorghum mixture silage. *Scientific Reports*, 11, pp. 1968. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81505-z>
- Khota, W., Pholsen, S., Higgs, D., and Cai Y., 2017. Fermentation quality and in vitro methane production of sorghum silage prepared with cellulase and lactic acid bacteria. *Animal Bioscience*, 30(11), pp.1568-1574. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0502>
- Ku-Vera, J.C., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S.S., Montoya-Flores, M.D., Molina-Botero, I.C., Arango, J., Gómez-Bravo, C.A., Aguilar-Pérez, C.F., and Solorio-Sánchez, F.J., 2020. Role of secondary plant metabolites on enteric methane mitigation in ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, pp.584. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584>
- Makkar, H., 2003. Chemical, protein precipitation and bioassays for tannins, tannin levels and activity in unconventional feeds, and effects and fate of tannins. In: H.P.S. Makkar (ed), Quantification of Tannins in Tree and Shrub Foliage: A laboratory manual, (Springer Nature, Cham, Switzerland). 1–42.
- Makkar, H.P.S., Siddhuraju, P. and Becker, K., 2007. Plant Secondary Metabolites. *Methods in Molecular Biology*, 393, pp. 1-122. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-425-4_1
- McCary, C.L., Vyas, D., Faciola, A.P. and Ferraretto, L.F., 2020. Graduate Student Literature Review: Current perspectives on whole-plant sorghum silage production and utilization by lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(6), pp. 5783-5790. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18122>
- Niu, M., Kebreab, E., Hristov, A.N., Oh, J., Arndt, C., Bannink, A., Bayat, A.R., Brito, A. F., Boland, T., Casper, D., Crompton, L.A., Dijkstra, J., Eugene, M.A., Garnsworthy, P.C., Haque M.N., Hellwing, A.L.F., Huhtanen, P., Krauzer, M., Kuhla, B., Lund, P., Madsen, J., Martin, C., McClelland, S.C., McGee, M., Moate, P.J., Muetzel, S., Muñoz, C., O'Kiely, P., Peiren, N., Reynolds, C.K., Schwarm, A., Shingfield, K.J., Storlien, T. M., Weisbjerg, M.R., Yanez-Ruiz, D.R., Yu, Z., 2018. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Global Change Biology*, 24(8), pp.3368-3389. <https://doi.org/10.1111/gcb.14094>
- Ojeda, A., Frías, A., González, R., Linares, Z. y Pizzani, P., 2010. Contenido de taninos, fósforo fítico y actividad de fitasas en el grano de 12 híbridos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 60(1), pp. 93-98. <https://www.alanrevista.org/ediciones/2010/1/art-14/>
- Oliveira, S.G., Berchielli, T.T., Pedreira, M., Primavesi, O., Frighetto, R. and Lima, M., 2007. Effect of tannin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestibility and methane emission in beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 135(3), pp. 236-248.

- <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.07.012>
- Piñeiro-Vázquez, A.T., Jiménez-Ferrer, G., Alayon-Gamboa, J.A., Chay-Canul, A.J., Ayala-Burgos, A.J., Aguilar-Pérez, C.F. and Ku-Vera, J.C., 2018. Effects of quebracho tannin extract on intake, digestibility, rumen fermentation, and methane production in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. *Tropical Animal Health and Production*, 50(1), pp. 29-36. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1396-3>
- Plata-Reyes, D.A., Martínez-García, C.G., Hernández-Mendo, O. and Arriaga-Jordán, C.M., 2023. Dynamics of tall fescue (*Festuca arundinacea*) and Kikuyo grass (*Cenchrus clandestinus*) pastures associated with clover (*Trifolium repens*) in small scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *African Journal of Range and Forage Science*, 40(4), pp. 1-13. <https://doi.org/10.2989/10220119.2022.2144946>
- Prospero-Bernal, F., Martínez-García, C. G., Olea-Pérez, R., López-González, F. and Arriaga-Jordán, C.M., 2017. Intensive grazing and maize silage to enhance the sustainability of small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 49(7), pp. 1537-1544. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1360-2>
- Robles-Jiménez, L. E., Rosas-Dávila, M., Osorio-Avalos, J., Chay-Canul, A.J., Palacios-Riocerezo, C., Castelán-Ortega, O.A. and González-Ronquillo, M., 2021. Evaluation of Mexican native and hybrid maize (*Zea mays*) silage for sustainable milk production. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3), pp. 124. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3782>
- Rosas-Dávila, M., Estrada-Flores, J. G., López-González, F. and Arriaga-Jordan. C. M., 2020. Endophyte-free tall fescue pastures for small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *Indian Journal of Animal Science*, 90(5), pp. 778-783. <https://doi.org/10.56093/ijans.v90i5.104631>
- Rosas-Dávila, M., Morales-Almaráz, E., López-González, F. and Arriaga-Jordán, C.M. 2024. Uso del ensilado de sorgo variedad top green y variedad caña dulce para la producción de leche en sistemas de pequeña escala. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27, p.064. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4917>
- Sabertanha, E., Rouzbehan, Y., Fazaeli, H. and Rezaei, J., 2021. Nutritive value of sorghum silage for sheep. *Journal of Animal Physiology Animal Nutrition*, 105(6), pp. 1034-1045. <https://doi.org/10.1111/jpn.13548>
- Toro-Mujica, P., Aguilar, C., Vera, R. R. and Bas, F., 2017. Carbon footprint of sheep production systems in semi-arid zone of Chile: A simulation-based approach of productive scenarios and precipitation patterns. *Agricultural Systems*, 157, pp. 22-38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.012>
- Vega-García, J.I., López-González, F., Morales-Almaraz, E. and Arriaga-Jordán, C.M., 2024., Production and estimation of methane emissions from cows fed with small-grain cereals in the central highlands of Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(2), p.051. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5062>
- Yang, Y., Ferreira, G., Corl, B.A. and Campbell, B.T., 2019. Production performance, nutrient digestibility, and milk fatty acid profile of lactating dairy cows fed corn silage or sorghum silage-based diets with without xylanase supplementation. *Journal of Dairy Science*, 102(3), pp. 2266-2274. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15801>
- Zanon, T., Fichter, G., Mittermair, P., Nocker, L. and Gauly, M., 2023. Quantifying methane emissions under field conditions under 2 different dairy production scenarios: Low-input versus high-input milk production. *Journal of Dairy Science*, 106, pp. 4711-4724. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22804>