



ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE BOVINA EN PEQUEÑA ESCALA BAJO DIFERENTES ESTRATEGIAS DE ALIMENTACIÓN †

[ESTIMATION OF ENTERIC METHANE EMISSIONS IN SMALL-SCALE BOVINE MILK PRODUCTION SYSTEMS UNDER DIFFERENT FEEDING STRATEGIES]

Sirley Carrillo-Hernández¹, Fernando Prospero-Bernal²,
Felipe López-González¹, Gonzalo Flores-Calvete²,
Carlos Galdino Martínez-García¹ and Carlos Manuel Arriaga-Jordán^{1*}

¹ Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), Universidad Autónoma del Estado de México, Campus UAEM El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas, 50090 Toluca, Estado de México, México.

E-mails: scarrilloh002@alumno.uaemex.mx; flopezg@uaemex.mx;
cmarriagaj@uaemex.mx*

² Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM), Betanzos a Mesón do Vento, 15318 Mabegondo - Abegondo, La Coruña, Galicia, España. E-mails: fer1047@hotmail.com; gonzalo.flores.calvete@xunta.gal

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Small-scale dairy systems are a development option, and in Mexico they represent over 78% of dairy farms providing 37% of milk production. They are a source of employment and income in rural areas that enable dairy families to overcome poverty. However, ruminant production systems emit 17% of world methane, a greenhouse gas that affects climate change. Strategies must be devised to reduce the environmental footprint of dairy systems through increase productivity. **Objective:** The objective was to estimate the methane emission from enteric fermentation in small-scale dairy systems in the highland valleys of central Mexico with four feeding strategies. **Methodology:** Twenty four small-scale farms, with herds between 7 and 18 dairy cows participated in the study, which had implemented different feeding strategies that were assigned to the following groups: (CC) five farms that had a conventional management based on the cut-and-carry of temperate irrigated pastures, use of concentrates and straw, (CC+EM) six farms that use cut-and-carry of pastures plus maize silage in the dry season, (PCI) six farms that manage intensive continuous grazing of pastures, (PCI+EM) seven farms with continuous grazing of pastures, and use maize silage in the dry season. Farms were visited monthly during a whole year to record individual milk yields, milk composition and live weight of cows, to sample feeds for chemical analyses and record amounts of used feed. This information enabled to define a diet type per month, and dry matter and gross energy intakes were estimated subtracting the energy contribution of the supplements from total requirements. Methane emissions were estimated from a model derived by a global meta-analysis that includes variables of feed intake, diet composition, milk composition, and cow live-weight. A hierarchical experimental design was used where 288 records were subjected to analysis of variance to detect differences among the groups ($\alpha P < 0.05$). **Results:** Farms that implemented grazing of pastures as a source of fresh quality herbage (PCI) in mean generated 10.5% less enteric methane and 13.9% less intensity of emission ($P < 0.05$) compared with those that incorporated cut and carry or implemented corn silage for the dry season. **Implications:** Results show the potential of small-scale dairy systems to reduce their methane emissions and intensity of emissions by implementing grazing of temperate irrigated pastures. **Conclusions:** The implementation of fresh quality herbage through continuous grazing of temperate irrigated pastures with the use of moderate supplementation without incorporation of corn silage is a viable methane mitigation strategy in small-scale dairy systems in the highlands of Mexico.

Keywords: Bovine milk; dairy systems; small-scale; feeding strategies; methane.

RESUMEN

Antecedentes: Los sistemas de producción de leche en pequeña escala (SPLPE) son una opción de desarrollo; en México estos sistemas representan más de 78% de las unidades especializadas que generan 37% de la producción de leche. Los SPLPE Son una fuente de empleo e ingresos en áreas rurales que permiten a las familias productoras reducir

† Submitted October 13, 2020 – Accepted January 26, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

la pobreza. Sin embargo, la producción de rumiantes emite 17% del metano mundial, gas de efecto invernadero que afecta el cambio climático. Por lo tanto, se hace necesario desarrollar estrategias de alimentación para reducir la huella de carbono de los sistemas de producción de leche a través de incrementar su productividad. **Objetivo:** El objetivo fue estimar la emisión de metano por fermentación entérica en sistemas de producción de leche bovina en pequeña escala en los Valles Altos del centro de México con cuatro estrategias de alimentación. **Metodología:** Veinticuatro unidades de producción de leche en pequeña escala (UPLPE), con hatos entre 7 y 18 vacas, participaron en el estudio, las cuales implementan diferentes estrategias de alimentación, que fueron asignadas a los siguientes grupos: (CC) cinco UPLPE de manejo convencional, basado en corte y acarreo de forraje de praderas irrigadas de clima templado, más uso de concentrado y pajas; (CC+EM) seis UPLPE que usan corte y acarreo de forraje de praderas más ensilado de maíz en época seca; (PCI) seis UPLPE que manejan pastoreo continuo en praderas irrigadas, y (PCI+EM) siete UPLPE que con pastoreo continuo en sus praderas y uso de ensilado de maíz en época seca. Las UPLPE se visitaron mensualmente durante todo un año para registrar el rendimiento individual de leche, composición de la leche y peso vivo de las vacas, así como para muestrear alimentos para análisis químico y registrar cantidades utilizadas. La información de los alimentos ofrecidos permitió establecer dietas tipo por mes; y restar el aporte de energía de los suplementos al total de los requerimientos permitió estimar los consumos de materia seca y energía bruta. Las emisiones de metano se estimaron a partir de un modelo derivado de un meta-análisis que incluye variables de consumo de alimento, composición de la dieta, composición de la leche, y peso vivo de las vacas. Se empleó un diseño experimental jerárquico donde 288 registros fueron sujetos a análisis de varianza para detectar diferencias entre los grupos ($P \leq 0.05$). **Resultados:** Las UPLPE que implementaron el pastoreo de praderas como fuente de forraje fresco de calidad (PCI) generaron en promedio 10.5% menos metano y 13.9% menos intensidad de emisión ($P < 0.05$) respecto a las UPLPE que incorporaron corte y acarreo de forraje o implementaron el suministro de ensilado de maíz para la época seca. **Implicaciones:** Los resultados indican el potencial de los sistemas de producción de leche en pequeña escala para reducir sus emisiones e intensidad de emisión de metano al implementar el pastoreo de praderas irrigadas de clima templado. **Conclusiones:** El suministro de forraje fresco de calidad por medio del pastoreo continuo de praderas de clima templado con suplementación moderada sin suministro de ensilado de maíz, es una estrategia viable para mitigar el metano en sistemas de producción de leche en pequeña escala.

Palabras clave: leche bovina; pequeña escala; estrategias alimentación; metano.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción de leche en pequeña escala (SPLPE) son una opción de desarrollo (Bennet *et al.*, 2006), en consecuencia, la producción de leche en pequeña escala tiene potencial para incrementar los ingresos de los pequeños productores, reducir pérdidas y generar empleo en la industria de transformación de lácteos. La lechería en pequeña escala puede ser un instrumento viable para estimular el crecimiento económico y reducir la pobreza en las comunidades donde se desarrolla (Bennet *et al.*, 2006). En México, estos sistemas representan 78% de las unidades especializadas en producción de leche aportan hasta 37% de la producción total nacional (Hemme *et al.*, 2007), son fuente de empleo en zonas rurales lo que permite a las familias reducir los índices de pobreza (Espinoza-Ortega *et al.*, 2007; FAO, 2010).

Los SPLPE se caracterizan por poseer pequeñas superficies de tierra, tener hatos entre 3 y 35 vacas lecheras más sus reemplazos; se basan en el trabajo familiar, pero su debilidad se encuentra en la escala económica principalmente por una alta dependencia de insumos externos en la época seca, sobre todo concentrados (Fadul-Pacheco *et al.*, 2013; Prospero-Bernal *et al.*, 2017). Ante esto, la incorporación del pastoreo de praderas irrigadas, en lugar del manejo convencional de corte y acarreo de forrajes, así como la complementación con ensilado de maíz, durante la

época seca de invierno-primavera, reduce costos de producción, eleva la rentabilidad y mejora la sostenibilidad de estos sistemas (Prospero-Bernal *et al.*, 2017). Sin embargo, estas estrategias no han sido estudiadas desde el punto de vista del impacto ambiental y su potencial de mitigación.

Los sistemas ganaderos emiten 14.5% de los gases efecto invernadero (GEI) causantes del cambio climático (Gerber *et al.*, 2013). El metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el dióxido de carbono (IPCC, 2013); y la emisión de CH_4 por la fermentación entérica de los rumiantes representa 17% del metano global y el ganado bovino es el principal emisor (EPA, 2010).

El manejo de la alimentación representa una práctica efectiva para reducir emisiones de CH_4 e incrementar la eficiencia de los sistemas ganaderos (Hristov *et al.*, 2013 y Knapp *et al.*, 2014). El suministro de alimentos de buena calidad puede incrementar la productividad y la eficiencia en la alimentación generando impactos en la mitigación de metano cuando se mide por unidad de producto (intensidad de emisión) (Hristov *et al.*, 2013 y Knapp *et al.*, 2014). En Chile, Muñoz *et al.* (2015) concluyeron que pastoreo de forrajes de calidad es una estrategia viable de mitigación de metano por medio de una reducción en la intensidad de emisión de este gas. En el centro de México, Velarde-Guillén *et al.* (2017)

aplicando modelos en unidades de producción de leche en pequeña escala, demostraron que optimizar las estrategias de alimentación con la incorporación de alimentos de calidad aumenta la producción de leche y reduce la intensidad de emisiones de CH₄ entérico, lo que permite que estos sistemas puedan mitigar su impacto ambiental. En Kenia, el uso de una alimentación balanceada y una suplementación acorde a las necesidades de los animales ha demostrado ser una estrategia para incrementar la producción de leche y reducir la huella ambiental de los pequeños sistemas de producción de leche de esa región (Wilkes *et al.*, 2020).

Ante la complejidad y altos costos de las mediciones de producción de CH₄ del ganado bovino *in vivo*, las ecuaciones de predicción se usan de manera amplia para su estimación (Kebreab *et al.*, 2008). Una estimación precisa de estas emisiones es importante para tener inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, así como para evaluar las estrategias de mitigación a través del suministro de diferentes dietas al ganado que permitan incrementar la producción de leche y reducir la intensidad de las emisiones (Benaouda *et al.*, 2019).

Ante el escenario de cambio climático y la presión sobre los sistemas de producción ganaderos para reducir su huella de carbono se deben desarrollar estrategias que dirijan la producción a sistemas sostenibles con disminución en la emisión de gases

efecto invernadero y aumento en la productividad. Por tanto, el objetivo de este estudio fue estimar las emisiones de metano por fermentación entérica en unidades de producción de leche en pequeña escala de los Valles Altos del centro de México que implementaron diferentes estrategias de alimentación en el ganado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Siguiendo un enfoque de investigación participativa rural, en específico mediante desarrollo participativo de tecnología pecuaria de acuerdo con los lineamientos de Conroy (2005), de enero a diciembre de 2015, se evaluaron 24 unidades producción de leche en pequeña escala (UPLPE), clasificadas en 4 grupos, según las estrategias de alimentación implementadas en el ganado. Las características de las UPLPE participantes se presentan en la Tabla 1.

Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Aculco, Estado de México, en la región de valles altos del Eje Neovolcánico de México; ubicado entre las coordenadas 20° 00' y 20° 17' de latitud norte; y 99° 40' y 100° 00' de longitud oeste, una altitud entre 2 000 y 3 400 m. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2009). Durante el año de evaluación la temperatura media fue 15.6°C y precipitación de 1,054 mm.

Tabla 1. Características de las unidades de producción de leche participantes.

	Grupos			
	CC	CC+EM	PCI	PCI+EM
Número de UPLPE	5	6	6	7
Superficie total promedio de la UPLPE (ha)	4.3	7.9	5.8	9.9
Superficie promedio de praderas (ha)	1.4	1.6	1.8	2.3
Superficie promedio para cultivo de maíz (ha)	2.8	6.2	3.8	6.9
Promedio de vacas en ordeño evaluadas/UPLPE	15	8	6	9
Vacas secas del hato/UPLPE	3	1	1	2
Rendimiento promedio de leche (kg/vaca/día)	14.3	14.2	14.7	14.6

UPLPE, unidades de producción de leche en pequeña escala; CC, corte y acarreo; CC+EM, corte y acarreo más ensilado de maíz; PCI, pastoreo continuo intensivo; PCI+EM, pastoreo continuo intensivo más ensilado de maíz.

Estrategias de alimentación evaluadas

Las estrategias de alimentación empleadas por los productores se basan tradicionalmente en el corte y acarreo de forraje de praderas irrigadas (*Lolium perenne* y *Lolium multiflorum*), solas o en asociación con una leguminosa, principalmente trébol blanco (*Trifolium repens*), en el uso de rastrojo de maíz y altas cantidades de concentrados comerciales; así como otros recursos forrajeros en forma de henos, ensilados o rastrojos auto producidos o adquiridos fuera de las unidades de producción (Alfonso-Ávila *et al.*, 2012; Martínez-García *et al.*, 2015). El pastoreo de praderas y uso de ensilado de maíz, son promovidos en estos sistemas como estrategias que pueden mejorar su eficiencia productiva y rentabilidad económica (Martínez-García *et al.*, 2015).

Basados en las estrategias anteriores se conformaron cuatro grupos. Grupo 1, corte y acarreo (CC), cinco UPLPE caracterizadas por un manejo convencional, con alimentación basada en corte y acarreo de forraje de praderas irrigadas de clima templado, uso de concentrado y pajas; Grupo 2, corte y acarreo de forraje, más ensilado de maíz para la época seca (CC+EM), seis unidades de producción que usan una alimentación con base en corte y acarreo de forraje, más ensilado de maíz en época seca; Grupo 3, pastoreo continuo (PCI), seis unidades de producción que manejan 8 horas de pastoreo continuo en las praderas irrigadas; Grupo 4, pastoreo continuo y ensilado de maíz (PCI+EM), siete unidades de producción que asignan 8 horas de pastoreo continuo en sus praderas, y usan ensilado de maíz para la época seca. En los cuatro grupos se suplementa con concentrado, adicionalmente, los productores suministran rastrojo de cereales durante la época seca, lo cual es una práctica tradicional en los sistemas de producción de leche en pequeña escala de la región (Alfonso-Avila *et al.*, 2012).

Recolección de datos y mediciones

Las 24 UPLPE se visitaron cada 30 días para recolectar información sobre alimentación, composición de la dieta y rendimiento de leche; además se tomaron muestras de los ingredientes y de la leche para su análisis en el laboratorio. El consumo (kg de materia seca, MS) de los alimentos suministrados a las vacas en el pesebre se midió mediante pasaje individual de lo ofrecido y rechazado. El consumo de materia seca en las praderas se estimó indirectamente con el método de energía metabolizable utilizado descrito por Baker (1982) y Hernández-Mendo y Leaver (2006), a partir de los requerimientos de las vacas lecheras y concentración de energía metabolizable estimada en los alimentos, restando el aporte de energía de los suplementos al total de los requerimientos. La

estimación del consumo de materia seca en sistemas de pastoreo ha sido previamente empleada (Muñoz *et al.*, 2015; Beltrán *et al.*, 2019; Carrillo-Hernández *et al.* 2020), y es considerado un método aceptable en las ecuaciones usadas en la estimación de emisión de metano entérico (Appuhamy *et al.*, 2016). La estimación de la energía metabolizable se realizó a partir de AFRC (1993)

Tomando en cuenta la proporción de cada alimento empleado en las dietas, se conformó una muestra compuesta para analizar su composición química en términos de cenizas por incineración a 550°C en un horno de mufla, proteína cruda (PC) por el método de Kjeldahl (AOAC, 1990), fibra detergente neutro (FDN) por el método de micro-bolsas (Ankom, 2005), basado en Van Soest *et al.* (1991), digestibilidad *in vitro* enzimática de la materia orgánica con el método propuesto por Riveros y Argamentería (1987), energía bruta (EB) según Moraes *et al.* (2014). El extracto etéreo (EE) se tomó de Tablas de Feedipedia (2019). El contenido de grasa, proteína y lactosa en leche se determinó con un analizador de ultrasonido (Lacti-check, model LC-01/A, Page and Pedersen International, Hopkinton, MA, USA) (McClements 1991); además la corrección de leche en energía fue según la ecuación descrita por Niu *et al.* (2018):

$$LCE = 12.95 \times GL \text{ (g /d)} + 7.65 \times PL \text{ (g /d)} + 0.327 \times RL \text{ (kg /vaca/d)}$$

Donde: GL, grasa en leche; PL, proteína en leche; RL, rendimiento de leche.

Estimación de emisiones de metano

Las emisiones de CH₄ por fermentación entérica se estimaron a partir de un meta análisis (Moraes *et al.*, 2014):

$$CH_4 \text{ (MJ /d)} = -9.311 + 0.042 \times CEB \text{ (MJ /d)} + 0.094 \times \% \text{ FDN} - 0.381 \times \% \text{ EE} + 0.008 \times PV \text{ (kg)} + 1.621 \times \% \text{ GL}$$

Donde: CEB; Consumo de energía bruta; FDN= fibra detergente neutro, EE= extracto etéreo; PV, peso vivo; GL, grasa en leche.

El factor de corrección de metano Y_m (proporción de EB perdida como metano) fue calculado a partir de IPCC (2019):

$$Y_m = 100[CH_4 \text{ (MJ /d)} / \text{Consumo de energía bruta (MJ /d)}]$$

Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental jerárquico (Kaps y Lamberson, 2004) y los valores mensuales por cada grupo (288 registros) fueron sometidos a análisis de varianza para detectar diferencias entre las estrategias

empleando el siguiente modelo: $Y_{ijk} = \mu + T_i + M_{j(k)} + P_k + e_{ijk}$

Donde:

Y_{ijk} = Variable de respuesta

μ = Media poblacional

T_i = Efecto debido a la estrategia de alimentación (1, 2, 3, 4); $M_{j(k)}$ = Efecto debido al mes anidado dentro del productor (1,2,3...12); P_k = Efecto debido al productor (1,2,3...7); e_{ijk} = Variación residual.

El modelo jerárquico de análisis estadístico utilizado permite dar cuenta tanto del efecto de los periodos de evaluación (mes) como del efecto de productores como factores de variación conocida. El objeto de estudio fue la estimación de la emisión de metano a lo largo de un año a partir de la estrategia de alimentación de las vacas lecheras como forma de evaluar el efecto de diferentes intervenciones en el mejoramiento de las estrategias de alimentación en estos sistemas en cuanto a su huella ambiental en términos de emisión de metano.

Los datos fueron analizados aplicando el procedimiento de Modelo Lineal General en el software Minitab (Minitab LLC, State College, PA, USA). Se aplicó la prueba de Tukey cuando las diferencias del análisis de varianza resultaron significativas ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Alimentación en los grupos

La Tabla 2 muestra las cantidades (kg) de los alimentos suministrados a cada grupo. La complementación con concentrado representó entre 28% y 31% del suministro total de alimento en las UPLPE evaluadas, mientras que el suministro de forrajes de calidad (fresco y conservado) fue hasta 60% del total de la dieta. El % restante correspondió las pajas ofrecidas.

En los grupos que incorporaron forraje conservado en forma de ensilado de maíz, la mayor proporción de este alimento se suministró en CC+EM (19%) en contraste con 13% para PCI+EM, menor proporción compensada con una mayor incorporación de forraje fresco (47% PCI+EM y 38% CC+EM). A su vez, los grupos PCI+EM y CC+EM suministraron las mayores cantidades de concentrado (30.8% y 30.1%, respectivamente) que en conjunto con el uso de ensilado de maíz favorecieron la disminución de uso de pajas en estos grupos. En términos de utilización de forraje fresco, los grupos PCI y CC+EM, presentaron la mayor y menor incorporación (49% y 38%, respectivamente); en contraste, en los grupos CC y PCI+EM, el uso de forraje fresco, representó similar proporción (47%) pero con diferencias en la forma de suministro (corte y acarreo o pastoreo).

Tabla 2. Valores medios de alimentos suministrados a cada grupo (kg de MS/vaca/d).

Alimentos	Grupos			
	CC	CC+EM	PCI	PCI+EM
Forraje de corte y acarreo	5.27	4.71		
Forraje de pastoreo			5.21	5.42
Concentrado	3.27	3.80	2.93	3.46
Ensilado de maíz		2.32		1.52
Pajas	2.57	1.50	2.41	1.03
Total	11.12	12.34	10.55	11.44
% de forraje de calidad (fresco+ conservado)	47.4	57.02	49.36	60.72
Relación forraje concentrado (%)	71:29	69:31	72:28	70:30

CC, corte y acarreo; CC+EM, corte y acarreo más ensilado de maíz; PCI, pastoreo continuo intensivo; PCI+EM, pastoreo continuo más ensilado de maíz.

Tabla 3. Valores medios de peso vivo, consumo de MS, composición química de la dieta y rendimiento y calidad de leche.

	Grupos				EEM ¹	Valor de P
	CC	CC+EM	PCI	PCI+EM		
Número de observaciones, n=	60	72	72	84		
Peso vivo (kg)	512.50	500.13	502.33	505.15	3.970	0.284
Consumo de MS (kg/d)	11.12 ^b	12.34 ^a	10.55 ^c	11.44 ^b	0.190	0.001
Consumo de EB (MJ /d)	208.06 ^b	229.99 ^a	194.81 ^c	213.37 ^b	3.572	0.001
Composición nutricional de la dieta						
EB (MJ /kg de MS)	18.64 ^a	18.64 ^a	18.47 ^b	18.66 ^a	0.023	0.001
MO (g/kg de MS)	907.11 ^b	913.30 ^a	893.20 ^d	900.21 ^c	1.388	0.001
PC (g /kg de MS)	146.71 ^a	131.25 ^b	150.23 ^a	143.56 ^a	2.091	0.001
FDN (g /kg de MS)	415.29 ^c	427.05 ^b	406.86 ^c	439.83 ^a	5.810	0.010
EE (g /kg de MS)	28.48 ^b	28.97 ^b	29.88 ^a	30.39 ^a	0.400	0.001
DIVMO (g /kg de MS)	719.13 ^c	734.07 ^b	768.67 ^a	772.96 ^a	4.965	0.001
EM (MJ/ kg de MS)	10.16 ^c	10.44 ^b	10.67 ^a	10.83 ^a	0.069	0.019
Rendimiento y composición de la leche.						
Rendimiento (kg leche /vaca/d)	14.36	14.20	14.69	14.60	0.293	0.473
LCE (kg /vaca/d)	14.65	14.36	14.73	14.81	0.304	0.358
Grasa (g /kg)	34.33	33.74	32.95	34.00	0.351	0.070
Proteína (g /kg)	32.65	32.31	32.28	32.30	0.163	0.425
Lactosa (g /kg)	45.98	46.28	45.43	45.29	0.415	0.500

^{a,b,c} Medias con distinta literal entre columnas son diferentes estadísticamente (P<0.05). ¹EEM, error estándar de la media; EB, energía bruta; PC, Proteína Cruda; FDN, Fibra Detergente Neutro; EE, Extracto Etéreo; DIVMO, digestibilidad *in vitro* de la materia orgánica; EMe, energía metabolizable estimada; LCE, Leche Corregida en Energía; MS, materia seca.

Composición química de la dieta y variables animales

La Tabla 3 muestra los resultados para peso vivo, consumo, composición química de la dieta, rendimiento y composición de la leche. En las variables de consumo se presentaron diferencias (P<0.05) entre los grupos, con un mayor consumo de materia seca (MS) y de energía bruta (EB) en CC+ EM, un menor consumo en PCI y valores intermedios para CC y PCI+ EM, aunque sin diferencias entre estos últimos grupos, con una media de 11.28 kg MS/ d y 210.72 MJ/d.

El menor contenido de EB se presentó en PCI (P<0.05), sin diferencias entre los demás grupos (P>0.05). La concentración de PC de la dieta fue menor (P<0.05) para CC+EM, grupo con menor incorporación de forraje fresco y mayor inclusión de ensilado de maíz. El contenido de fibra detergente neutro (FDN) fue mayor para PCI+EM, intermedio para CC+ EM y menor para los grupos que incorporaron el forraje solo en forma fresca (CC y PCI) (P<0.05). El contenido de materia orgánica (MO) varió entre los grupos (P<0.05) y aquellos grupos que

emplearon la estrategia de pastoreo continuo con y sin ensilado (PCI y PCI+EM) presentaron el mayor contenido de EE (P<0.05), así como la mayor digestibilidad (P<0.05) y mayor contenido de energía metabolizable (P<0.05). El rendimiento de leche, contenido de grasa, proteína, y lactosa en leche fueron similares (P>0.05) entre los grupos con promedios de 14.46 kg/vaca/d, 33.75 g/kg, 32.39 g/kg y 45.74 g/kg respectivamente.

El valor promedio de consumo de alimento de materia seca (11.36 kg de MS) representó un 2.3% de la media del peso vivo (505 Kg), este valor coincide con el reportado en los sistemas de producción de leche en pequeña escala de la misma zona para estrategias de alimentación basadas en pastoreo (López-González *et al.*, 2017) y estrategias con inclusión de ensilado (Celis-Álvarez *et al.*, 2016; Burbano- Muñoz *et al.*, 2019).

En los sistemas de pastoreo el consumo de materia seca está limitado por la dependencia a un mayor número de variables relacionadas con la disponibilidad y calidad de los alimentos, comportamiento animal o una combinación de estos (Bargo *et al.*, 2003). Cuando la

estrategia de alimentación se basó en el pastoreo continuo (PCI) y la suplementación con concentrado fue la más baja (Tabla 2), el consumo total de materia seca fue el más bajo. La incorporación de ensilado de maíz como complemento al pastoreo en PCI+EM permitió un consumo total mayor, comparado con el grupo que solo recibió pastoreo (PCI). El uso de ensilados para complementar el pastoreo es una estrategia que ha sido empleada como medio para superar la escasez de forraje e incrementar el consumo en sistemas de vacas lecheras en pastoreo (Anaya-Ortega *et al.*, 2009). El suministro de más concentrado en el grupo CC+EM (concentrado más ensilado de maíz, 60% del total de la dieta), permitió un mayor consumo, similar a lo reportado por Jiao *et al.* (2014), quienes indican que al aumentar el nivel de suplementación se presenta un mayor consumo en las vacas lecheras.

Los resultados de composición química de la dieta en términos de PC, FDN, EE y DIVMO son similares a lo reportado en estudios previos, en donde se han evaluado estrategias de alimentación basadas en corte y acarreo, pastoreo y uso de ensilado de maíz (Heredia-Nava *et al.*, 2007; Anaya-Ortega *et al.*, 2009; Alfonso-Ávila *et al.*, 2012; Velarde-Guillen *et al.*, 2017; 2019).

Los requerimientos de proteína metabolizable para las vacas lecheras de bajos rendimientos, aquí evaluadas, se calcularon, en promedio, en 950 g por día según NRC (2001). Teniendo en cuenta la proporción de cada alimento empleado en los grupos, las dietas tuvieron una concentración de PC entre 131.25 g/kg de MS y 150.23 g/kg de MS, el cual es suficiente para cubrir dichos requerimientos, sin generar excesos, lo cual implica beneficios en términos de uso eficiente del nitrógeno por los animales, y económicos al evitar sobrecostos por una sobrealimentación de PC (Broderik, 2003; Barros *et al.*, 2017). El menor contenido de PC en el grupo CC+EM se relacionó con una mayor incorporación de ensilado de maíz (19% del total de MS de la ración), alimento reconocido por su bajo contenido de PC (Kolver *et al.*, 2001). En la zona de estudio el análisis de ensilado de maíz ha mostrado contenidos de PC entre 64 g/kg MS y 79 g/kg MS (Anaya-Ortega *et al.*, 2009; Albarrán-Portillo *et al.*, 2012; Celis-Álvarez *et al.*, 2016).

La forma de suministro de forraje fresco tuvo influencia en la calidad de la dieta empleada; cuando los grupos se basaron en el suministro de forraje mediante pastoreo continuo (PCI y PCI+EM), hubo mayor calidad en términos de digestibilidad y contenido de EM que aquellos donde el forraje se ofreció en forma de corte y acarreo (CC y CC+EM). En la estrategia de pastoreo continuo el forraje tiende a ser más joven y en general de mayor calidad que en el corte y acarreo (Heredia-Nava *et al.*, 2007). En el

centro de México, el corte de forraje se realiza cuando este alcanza una altura entre 25 a 30 cm y su calidad ha disminuido (Pincay-Figueroa *et al.*, 2016). Las menores alturas manejadas y el rebrote constante en sistemas de pastoreo continuo permiten que las vacas consuman un forraje más tierno con mayor contenido de hoja en comparación al forraje suministrado de corte y acarreo (Heredia-Nava *et al.*, 2007). Comparando entre los grupos que incorporaron la estrategia de corte y acarreo, la mayor digestibilidad en CC+EM se atribuye a una mayor proporción en la incorporación de alimentos de calidad como concentrado, así como al uso de ensilado de maíz, sustituyendo así, a alimentos de baja calidad como las pajas. Numéricamente, en los grupos que emplearon pastoreo, se observó una mayor DIVMO y contenido de EM en PCI+EM, lo cual también pudo estar influenciado por lo anteriormente expuesto.

Los rendimientos y composición de leche en los grupos evaluados fueron similares a lo reportado en la misma área para estrategias basadas en el suministro de forraje y concentrados (Alfonso-Ávila *et al.* (2012) pero son inferiores a lo reportado en estrategias que incorporan ensilado de maíz para complementar el pastoreo (Anaya-Ortega *et al.*, 2009; Miguel *et al.*, 2014) o el corte y acarreo (Vaughn *et al.*, 2005; Pincay-Figueroa *et al.* 2016) diferencias atribuidas a los bajos consumos aquí presentados.

La forma de suministro del forraje (corte y acarreo o pastoreo) y la incorporación de ensilado de maíz no tuvieron efecto en el rendimiento o composición de la leche, resultados acorde a lo encontrado por Albarrán *et al.* (2012) en México y Dall-Orsoletta *et al.* (2019) en Brasil, quienes evaluando praderas suplementadas con ensilado de maíz y acorde por lo reportado por Velarde-Guillen *et al.* (2019) comparando corte y acarreo con pastoreo en la misma región.

El consumo de materia seca es considerado una de las principales limitantes en la producción de leche (Braudracco *et al.*, 2010). En el grupo PCI, el bajo consumo fue compensado por una alta calidad en términos de fibra, digestibilidad y contenido de EM, lo que permitió un aporte suficiente de nutrientes para lograr los rendimientos de leche y la síntesis de los componentes lácteos reportados en los demás grupos, en los que se dio un mayor nivel de suplementación, mostrando en PCI, una mayor eficiencia alimenticia al producir similar cantidad de leche con un menor consumo de alimento. Si bien el objetivo de este estudio no contempló un análisis económico, lo anterior implica beneficios al respecto, debido a un uso eficiente de los recursos de la unidad de producción y menor dependencia de insumos externos para la producción de leche.

Tabla 4. Valores promedio de las emisiones de metano entérico estimadas bajo diferente estrategia de alimentación en sistemas de producción de leche en pequeña escala.

	Grupos				EEM ¹	Valor de P
	CC	CC+EM	PCI	PCI+EM		
CH ₄ g /vaca/d	215.78 ^b	230.58 ^a	197.76 ^c	220.66 ^b	3.822	0.001
CH ₄ MJ /vaca /d	11.97 ^b	12.73 ^a	10.91 ^c	12.18 ^b	0.211	0.001
CH ₄ g /kg de LCE	15.02 ^b	16.45 ^a	13.57 ^c	15.29 ^b	0.293	0.001
CH ₄ g /kg CMS	19.37 ^a	18.75 ^b	18.67 ^b	19.32 ^a	0.168	0.027
Y _m (% del consumo de EB)	5.74 ^a	5.56 ^b	5.58 ^b	5.72 ^a	0.050	0.008

^{a,b,c} Medias con distinta literal entre columnas son diferentes estadísticamente (P<0.05). ¹EEM, error estándar de la media; LCE, leche corregida en energía; CMS, consumo de materia seca; Y_m, porcentaje de energía bruta perdida como metano.

Emisiones de metano

En la Tabla 4 se presenta la emisión de metano estimada. La mayor producción de metano (CH₄ g/vaca/d y CH₄ MJ /vaca/d) y la mayor intensidad de emisión (CH₄ g /kg de LCE) se presentaron en el grupo CC+EM (P<0.05) y a su vez, los menores valores para estas variables se encontraron en PCI, emisiones relacionadas con el consumo de materia seca (CMS) reportado en cada grupo. El rendimiento de metano (CH₄ g/kg CMS) y el porcentaje de energía bruta perdida como metano (Y_m) fueron mayores en CC y PCI+EM (P<0.05).

La producción promedio de CH₄ estimada fue de 216.12 g/vaca/d, valor inferior a lo reportado por Castelán-Ortega *et al.* (2014) para sistemas de producción con bovinos de clima templado en México (283 g/vaca/d) e inferior al estimado por Velarde Guillén *et al.* (2017) para sistemas de producción de leche en pequeña escala del altiplano central de México (329 g/vaca/d). Sin embargo, es un valor cercano a lo reportado por Pinares-Patino *et al.* (2003) de 235 g/vaca/d para vacas Charolais con consumos de energía bruta similares a los presentados en esta investigación. g

La intensidad de emisión de metano promedio (15.1 g CH₄/kg de LCE), fue similar a lo reportado por Dall-Orsoletta *et al.* (2019) en Brasil para la estrategia de pastoreo con uso de ensilado de maíz. Sin embargo, es un valor contrastante con lo reportado por Benaouda *et al.* (2020) para la región de América Latina (19.9 g CH₄ /kg de leche) y con lo estimado por Velarde-Guillen *et al.* (2017) en sistemas de producción de leche en pequeña escala de México para estrategias de alimentación optimizadas (18.2 g CH₄/kg de leche), esto debido a las mayores emisiones de metano y rendimientos de leche reportados por dichos autores. La menor intensidad de emisión de CH₄, presentada en el grupo PCI es similar a la reportada por Muñoz *et al.* (2015) con 13.6 g CH₄/ kg LCE para vacas lecheras en

pastoreo con suplementación. El rendimiento promedio de metano se estimó en 19.1 g/kg CMS, valor comparable con 19.2 g CH₄/kg CMS y 18.8 g CH₄/kg CMS, reportados para vacas lecheras en pastoreo con suplementación (Jiao *et al.*, 2014; Muñoz *et al.*, 2015).

Los resultados del presente estudio, muestran un comportamiento lineal entre el consumo de MS y la emisión de metano. El consumo de MS está altamente correlacionado con la emisión de metano, siendo el principal predictor de esta emisión (Hristov *et al.*, 2013; Ramin y Huhtanen *et al.*, 2013). En el grupo CC+ EM el CMS promedio fue 8.6 % mayor que en los grupos CC y PCI+EM y 14.5 % mayor que en el grupo PCI; el mayor consumo se reflejó en un incremento de 5.4% y 14.2% en la emisión de CH₄ respectivamente.

El suministro de forraje fresco de mayor calidad mediante pastoreo en PCI, favoreció una reducción de 8.9% en la emisión de CH₄ por animal día, en comparación al grupo (CC), mostrando un efecto en el régimen de incorporación del forraje en esta emisión. Lo anterior corresponde a lo reportado por Cameron *et al.* (2018), quienes indicaron que el aumento de la proporción de forraje de pastoreo en las dietas de ganado lechero puede tener este efecto. El grupo PCI incorporó la mayor proporción de forraje fresco y la dieta empleada en este grupo fue de alta calidad lo que también permitió una reducción de 12.1% en la emisión de metano, en comparación con los grupos que incorporaron ensilado de maíz (grupo CC+ EM y PCI+ EM). Esto es similar a lo indicado por Cameron *et al.* (2018), quienes identificaron que la incorporación de forrajes frescos y de alta calidad son elementos que permiten disminuir la emisión de CH₄ en un 15% respecto a sistemas de manejo convencional como el de corte y acarreo y 39% respecto a dietas de ración mixta basadas principalmente en ensilado de maíz en sistemas lecheros en Escocia.

Comparando entre los grupos según la forma de suministro de forraje fresco (CC y CC+EM; PCI y PCI+EM), los grupos CC+EM y PCI+EM emitieron más CH₄ que CC y PCI. El uso de una mayor suplementación (concentrado + ensilado), en CC+EM y PCI+EM, favoreció una mayor ingestión de material para fermentación y, aunque se podría esperar una disminución en la producción de CH₄ por efecto de la suplementación a favor de una mayor producción de propionato (Jiao *et al.*, 2014), esto no se vio reflejado en las emisiones totales por efectos del mayor consumo total mostrado en estos grupos. Sin embargo, la suplementación sí causó efecto en el rendimiento de CH₄ en el grupo CC+EM, al emitir 3.3% menos CH₄ por kg de alimento consumido, comparado con el grupo CC; sin embargo, no ocurrió lo mismo entre los grupos PCI y PCI+EM, donde PCI emitió 3.4% menos CH₄/ kg de CMS comparado PCI+EM, esto en respuesta al menor contenido de FDN y alta digestibilidad en PCI.

La mayor ingesta de carbohidratos rápidamente fermentables como el almidón producto de una mayor suplementación, y dietas altamente digestibles con bajos contenidos de FDN, resultan en menos metano por kg de alimento consumido (O'Neill *et al.*, 2011; Jiao *et al.*, 2014). La rápida fermentación en este tipo de dietas, ocasionan un menor tiempo de retención del alimento en el rumen (Moe y Tyrrell, 1979), generando cambios en el pH ruminal y en las proporciones ácidos grasos volátiles en el rumen a favor de una mayor formación de propionato, resultando en menos hidrógeno disponible para formación de CH₄ en relación con el material suministrado para fermentación (O'Neill *et al.*, 2011; Niu *et al.*, 2018).

Los menores valores de Y_m en los grupos CC+EM y PCI se asocian a lo anteriormente expuesto, debido a que la menor formación de metano por unidad de alimento consumido en estos grupos, representó menores pérdidas de energía como metano en relación al material suministrado para fermentación. El tipo de fermentación hacia una posible mayor formación de propionato, favorecido por el tipo de dieta, pudo favorecer la proporción acetato:propionato, representando menores pérdidas de energía del sustrato como metano (Johanson and Johanson, 1995).

La intensidad de emisión de CH₄ se basa en la emisión por unidad de producto y refleja mejor el impacto de una estrategia de alimentación en la emisión de metano (Histrov *et al.*, 2013). Debido a la ausencia de diferencias en la producción de leche, entre los grupos investigados, la intensidad de emisión se relacionó directamente con la producción de CH₄. El grupo PC tuvo menor emisión de CH₄, emitió 10% y 17% menos

CH₄ por Kg de LCE que CC y los grupos CC+EM y PCI+EM respectivamente.

En términos del efecto del uso de ensilado de maíz en las UPLPE, al comparar los grupos basados en el corte y acarreo de forraje (CC) y pastoreo (PCI) con los grupos que incorporaron este alimento como complemento a estas estrategias (CC+EM y PCI+EM), la inclusión del ensilado no causó cambios en los parámetros productivos de las vacas ni una disminución en la producción de CH₄ ni en la intensidad de emisión, similar a lo reportado por Dall-Orsoletta *et al.* (2019) en Brasil para sistemas de pastoreo, así como a lo encontrado por Waugh *et al.* (2005) en Nueva Zelanda para sistema de corte y acarreo de forraje. El uso de suplementos puede ser una práctica de mitigación de metano a través de una reducción en la intensidad de emisión en cuanto vaya acompañada de un incremento en la producción de leche (Histrov *et al.*, 2013; Jiao *et al.*, 2014) lo cual no ocurrió en esta investigación.

CONCLUSIONES

Implementar la estrategia de suministrar forraje fresco de calidad, por medio del pastoreo continuo de praderas irrigadas de clima templado con uso de suplementación moderada sin incorporación de ensilado de maíz, permitió una reducción en la emisión de metano, en la intensidad de emisión y en el metano producido por kg de alimento consumido, posicionando al pastoreo como una estrategia viable para la mitigación de emisiones metano en los sistemas de producción de leche en pequeña escala; una estrategia que a su vez mantiene rendimientos aceptables de leche, objetivo de estos sistemas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los 24 productores participantes en la investigación por brindar información y muestras de sus unidades de producción; quienes en todo momento tuvieron conocimiento de los objetivos de la investigación, cuya privacidad y la de sus familias se respeta al no revelar sus nombres. Igualmente se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por financiar el proyecto 129449 CB-2009 y brindar una beca de Estudios de Posgrado para Sirley Carrillo Hernández y una beca de Investigación Posdoctoral a Fernando Prospero-Bernal.

Financiamiento. Este trabajo se realizó gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto 129449 CB-2009, y beca de Estudios de Posgrado para Sirley Carrillo Hernández y una beca de Investigación Posdoctoral a Fernando Prospero-Bernal.

Conflicto de intereses. Los autores declaramos y estamos de acuerdo con la información presentada en el manuscrito, y aceptamos el orden en que cada autor va en el documento y no existe conflicto de interés que declarar por parte de los autores.

Cumplimiento de normas éticas. Se presentan datos originales derivados del trabajo de los autores, que no han sido sometidos al mismo tiempo en revistas diferentes. El trabajo no involucró experimentación con animales, y se llevó a cabo de acuerdo a procedimientos aceptados por la Universidad Autónoma del Estado de México.

Disponibilidad de datos. Estamos de acuerdo que, si el artículo es publicado en la revista, los datos sean distribuidos por la revista y puedan subirse a un repositorio, siempre y cuando se le otorgue el crédito a la revista.

REFERENCIAS

- Albarrán, B., García, A., Espinoza, A., Espinosa, E. and Arriaga, C.M. 2012. Maize silage in the dry season for grazing dairy cows in small-scale production systems in Mexico's highlands. *Indian Journal of Animal Research*. 46: 317–324. <https://www.arccjournals.com/journal/indian-journal-of-animal-research/ARCC474>
- Alfonso-Ávila, A.R., Wattiaux, M.A., Espinoza-Ortega, A., Sánchez-Vera, E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2012. Local feeding strategies and milk composition in small-scale dairy production systems during the rainy season in the highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. 44: 637–644. doi:10.1007/s11250-011-9947-5
- Anaya-Ortega, J.P., Garduño-Castro, G., Espinoza-Ortega, A., Rojo-Rubio, R. and Arriaga-Jordán, C.M. 2009. Silage from maize (*Zea mays*), annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) or their mixture in the dry season feeding of grazing dairy cows in small-scale dairy production systems in the highlands of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. 41: 607–616. doi:10.1007/s11250-008-9231-5
- Ankom. 2005. Procedures (for NDF, ADF, and in vitro Digestibility). Ankom Technology Method. <http://www.ankom.com>. Accessed 15 Jun 2010.
- Appuhamy, J.A.D.R.N., France, J. and Kebreab, E. 2016. Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand. *Global Change Biology*. 22: 3039–3056. DOI: 10.1111/gcb.13339
- Baker, R.D. 1982. Estimating herbage intake from animal performance In: J.D. Leaver (ed), *Herbage Intake Handbook*. British Grassland Society. Maidenhead, UK. pp. 77-93.
- Bargo, F., Muller, L.D., Kolver, E.S. and Delahoy, J.E. 2003. Invited Review: Production and Digestion of Supplemented Dairy Cows on Pasture. *Journal of Dairy Science*. 86:1–42. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73581-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73581-4)
- Barros, T., Quaassdorff, M. A., Aguerre, M. J., Colmenero, J. J. O., Bertics, S. J., Crump, P. M. and Wattiaux, M. A. 2017. Effects of dietary crude protein concentration on late-lactation dairy cow performance and indicators of nitrogen utilization. *Journal of Dairy Science*. 100(7): 5434–5448. DOI: 10.3168/jds.2016-11917.
- Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Holmes, C. and Macdonald, K., 2010. Effects of stocking rate, supplementation, genotype and their interactions on grazing dairy systems: a review, *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(2), 109–133. DOI: 10.1080/00288231003777665
- Beltrán, I.E., Gregorini, P., Morales, A., Balocchi, O.A. and Pulido, R.G. 2019. Interaction between herbage mass and time of herbage allocation modifies milk production, grazing behavior and nitrogen partitioning of dairy cows. *Animal Production Science*. 59(10): 1837-1846. <https://doi.org/10.1071/AN18183>
- Benaouda, M., Martin, C., Li, X., Kebreab, E., Hristov, A.N., Yu, Z., Yanez-Ruiz, D.R., Reynolds, C.K., Crompton, L.A., Dijkstra, J., Bannink, A., Schwarm, A., Kreuzer, M., McGee, M., Lund, P., Hellwing, A.L.F., Weisbjerg, M. R., Moate, P.J., Bayat, A.R., Shingfield, K.J., Peiren, N. and Eugene, M. 2019. Evaluation of the performance of existing mathematical models predicting enteric methane emissions from ruminants: animal categories and dietary mitigation strategies. *Animal Feed Science and Technology*. 255:114207. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114207
- Bennett, A., Lhoste, F., Crook, J. y Phelan, J. 2006. Futuro de la producción lechera en pequeña escala. En: *FAO. Informe pecuario 2006*. FAO, Roma. Pág. 1-8.
- Broderick, G. A. 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. *Journal of Dairy*

- Science. 86:1370–1381. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(03)73721-7
- Burbano-Muñoz, V. A., López-González, F., Estrada-Flores, J. G., Sainz-Sánchez, P. A. and Arriaga-Jordán, C. M. 2018. Oat silage for grazing dairy cows in small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *African Journal of Range & Forage Science*. 35 (1): 63 – 70. DOI:10.2989/10220119.2018.1473493
- Cameron, L., Chagunda, M. G. G., Roberts, D. J. and Lee, M. A. 2018. A comparison of milk yields and methane production from three contrasting high-yielding dairy cattle feeding regimes: Cut-and-carry, partial grazing and total mixed ration. *Grass and Forage Science*. 73(3): 789–797. DOI: 10.1111/gfs.12353
- Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C. and Estrada-Flores, J.G. 2014. Modelling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmósfera*. 27(2): 185-191.
- Celis-Álvarez, M.D., López-González, F., Martínez-García, C.G., Estrada-Flores, J.G. and Arriaga-Jordán, C.M., 2016. Oat and ryegrass silage for small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. 48: 1129–1134. DOI: 10.1007/s11250-016-1063-0.
- Conroy, C. 2005. *Participatory livestock research: a guide*, ITDG Publishing, Netherlands.
- Dall-Orsoletta, A.C., Oziemblowski, M.M., Berndt, A. and Ribeiro-Filho, H.M.N. 2019. Enteric methane emission from grazing dairy cows receiving corn silage or ground corn supplementation. *Animal Feed Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2019.05.009.
- EPA. 2011. *Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2009*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Washington, USA.
- 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: 241–256. DOI:10.1017/S0014479706004613
- Fadul-Pacheco, L., Wattiaux, M.A., Espinoza-Ortega, A., Sánchez-Vera, E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2013. Evaluation of sustainability of small-scale dairy production systems in the highlands of Mexico during the rainy season. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 37:(8) 882-901. DOI: 10.1080/21683565.2013.775990.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2010. *Status and prospects for smallholder milk production a global perspective*, (FAO, Rome, Italy).
- FEEDIPEDIA, 2019. *Animal Feed resources information system*. INRA, CIRAD, AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org>. Accessed 20 Jan 2019.
- Gerber, P., Steinfeld, H. Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. and Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock. A global Assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy.
- Hemme, T. IFCN Dairy Team and IFCN researchers. 2007. *IFCN Dairy Report, 2007*. International Farm Comparison Network, (IFCN Dairy Research Center, Kiel, Germany).
- Heredia-Nava, D., Espinoza-Ortega, A., González-Esquivel, C.E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2007. Feeding strategies for small-scale dairy systems based on perennial (*Lolium perenne*) or annual (*Lolium multiflorum*) ryegrass in the central highlands of México. *Tropical Animal Health and Production*. 39: 179-188. DOI: 10.1007/s11250-007-9003-7
- Hernández-Mendo, O. and Leaver, J. D. 2006. Production and behavioural responses of high- and low-yielding dairy cows to different periods of access to grazing or to a maize silage and soya bean meal diet fed indoors. *Grass and Forage Science*. 61: 335–346. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2006.00540.x
- Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P.J., Henderson, B. and Tricarico, J.M. 2013. SPECIAL TOPICS — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*. 91: 5045–5069. DOI: 10.2527/jas2013-6583.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Aculco, México Clave geoestadística 15003. INEGI, Aguascalientes.

- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 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.
- Jiao, H. P., Dale, A. J., Carson, A. F., Murray, S., Gordon, A.W. and Ferris, C.P. 2014. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 97: 7043–7053. DOI: 10.3168/jds.2014-7979
- Johnson, K.A. and Johnson, D.E. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 73: 2483–2492.
- Kebreab, E., Johnson, K.A., Archibeque, S.L., Pape, D. and Wirth, T. 2008. Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. *Journal of Animal Science*. 86: 2738–2748. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-0960>.
- Kaps, M. and Lamberson W. 2004. *Biostatistics for animal science*. Wallingford: CABI Publishing.
- Knapp, J.R., Laur, G. L., Vadas, P.A., Weiss, W.P. and Tricarico, J. M. 2014. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*. 97(6): 3231–3261. DOI: 10.3168/jds.2013-7234.
- Kolver, E.S., Roche, J.R., Miller, D. and Densley, R. 2001. Maize silage for dairy cows. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*. 63:195-201. DOI: 10.33584/jnzc.2001.63.2407
- López-González, F., Rosas-Dávila, M., Celis-Alvarez, M.D., Morales-Almaraz, E., Domínguez-Vara, I.A. and Arriaga- Jordán, C.M. 2017. Milk production under grazing of different pasture grasses in small-scale dairy systems in the highlands of central Mexico. *Journal of Livestock Science*. 8: 92-97.
- Martínez-García, C.G., Rayas-Amor, A. A, Anaya-Ortega, J.P., Martínez-Castañeda, F.E., Espinoza-Ortega, A., Prospero-Bernal, F. and Arriaga-Jordán, C.M. 2015. Performance of small-scale dairy farms in the highlands of central Mexico during the dry season under traditional feeding strategies. *Tropical Animal Health and Production* 47, 331–337. DOI:10.1007/s11250-014-0724-0
- McClements, D. J. 1991. Ultrasonic characterisation of emulsions and suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 37:33–72. doi:10.1016/0001-8686(91)80038-L
- Moe, P.W. and Tyrrell, H.F. 1979. Methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 62:1583–1586. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(79)83465-7
- Moraes, L.E., Strathe, A.B., Fadel, J.G., Casper, D.P. and Kebreab, E. 2014. Prediction of enteric methane emissions from cattle. *Global Change Biology*. 20: 2140–2148. DOI: 10.1111/gcb.12471.
- Muñoz, C., Hube, S., Morales, J.M., Yan, T. and Ungerfeld, E.M. 2015. Effects of concentrate supplementation on enteric methane emissions and milk production of grazing dairy cows. *Livestock Science*. 175:37–46. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.02.001.
- 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., Kreuzer, M., Kuhla, B., Lund, P., Madsen, J., Martin, C., McClelland, S.C., McGee, M., Moate, P.J., Muetzel, S., Munoz, C., O’Kiely, P., Peiren, N., Reynolds, C.K., Schwarm, A., Shingfield, K.J., Storlien, T.M., Weisbjerg, M.R., Yanez-Ruiz, D.R. and Yu, Z. 2018. Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Global Change Biology*. 24: 3368–3389. DOI: 10.1111/gcb.14094.
- NRC (National Research Council). 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- O’Neill, B.F., Deighton, M.H., O’Loughlin, B.M., Mulligan, F. J., Boland, T.M., O’Donovan, M. and Lewis, E. 2011. Effects of a perennial ryegrass diet or total mixed ration diet offered to spring-calving Holstein-Friesian dairy cows on methane emissions, dry matter intake, and milk production. *Journal of Dairy Science*. 94:1941–1951. DOI:10.3168/jds.2010-3361

- 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 México. *Tropical Animal Health and Production*. 49: 1537–1544. DOI:10.1007/s11250-017-1360-2
- Ramin, M. and Huhtanen, P. 2013. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. *Journal of Dairy Science*. 96 :2476–2493. Doi: 10.3168/jds.2012-6095
- Riveros, E, y Argamentería, A. 1987. Métodos enzimáticos de predicción de la digestibilidad in vivo de la materia orgánica de forrajes. *Avances en Producción Animal*. 12: 59–75.
- Van Soest, P.J., Robertson, J. B. and Lewis, B. A. 1991. Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*. 74:3583–3597. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2
- Velarde-Guillén, J., López-González, F., Estrada-Flores, J.G., Rayas-Amor, A.A., Heredia-Nava, D., Vicente, F., Martínez-Fernández, A., Celis-Álvarez, M.D., Aguirre-Ugarte, I.K., Galindo-González, E. and Arriaga-Jordán, C.M. 2019. Supplementation of dairy cows with commercial concentrate or ground maize grain under cut-and-carry or grazing of cultivated pastures in small-scale systems in the highlands of central Mexico. *Animal Production Science*. 59(2): 368-375. DOI:10.1071/an15375.
- Wilkes, A., Wassie, S., Odhong, C., Fraval, S. and Dijk, S.V. 2020. Variation in the carbon footprint of milk production on smallholder dairy farms in central Kenya. *Journal of Cleaner Production*. 265:121780. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121780