



Estimación de la producción de metano entérico en ranchos de producción familiar de leche bovina en el sur del estado de Querétaro, México



Sergio Gómez Rosales ^{a*}

María de Lourdes Ángeles ^a

José Luis Romano Muñoz ^a

José Ariel Ruíz Corral ^b

^a Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Ajuchitlán, Querétaro, México.

^b Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100 Nextipac, 44600, Zapopan, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: gomez.sergio@inifap.gob.mx

Resumen:

El objetivo fue estimar el factor de emisión (FE) de metano (CH₄) y pérdidas diarias de energía bruta (EB) convertida en CH₄ (PCH₄), por medio de ecuaciones de predicción del método nivel 2 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) y con base en información técnica de ranchos del sistema familiar de producción de leche bovina. El estudio se realizó en 10 establos, y se obtuvo información técnica, tipo y cantidad de ingredientes ofrecidos al hato durante tres visitas en diferentes meses del año. La información técnica, junto con análisis de laboratorio del contenido de materia seca (MS) y EB de los ingredientes muestreados, se usó para estimar el consumo de MS y EB; usando la metodología del IPCC se estimó el FE y PCH₄. Las mismas variables fueron estimadas usando las ecuaciones de predicción del IPCC. En vacas en ordeña el FE (81 y 70, kg CH₄ año⁻¹) y PCH₄ (2.95 y 2.56, Mcal día⁻¹) usando las ecuaciones del IPCC fueron similares a

las obtenidas con las observaciones en ranchos; el FE ponderado por rancho fue similar (49.06 y 54.09, kg CH₄ año⁻¹), pero la PCH₄ fue menor (1.11 y 1.97, Mcal día⁻¹ $P < 0.01$) usando las ecuaciones del IPCC con relación a las observaciones en ranchos. En general, a través del uso de información técnica de los ranchos fue posible estimar el FE y evidenciar una mayor PCH₄ por rancho, y, en consecuencia, menor eficiencia energética, con respecto a la metodología del IPCC.

Palabras clave: Establos, Producción de subsistencia, Fermentación ruminal, Contaminación ambiental, Pérdida de energía.

Recibido: 18/11/2017

Aceptado: 27/08/2019

Introducción

La ganadería de bovinos productores de leche es muy importante para satisfacer la demanda de alimento de alta calidad para el consumo humano; no obstante, también contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (EGEI) como el metano (CH₄) que se produce por fermentación entérica y es eliminado, en su mayoría, a través del eructo^(1,2). El CH₄ es uno de los principales GEI proveniente de los sistemas de producción de ganado bovino, que se ha asociado al calentamiento global y cambio climático, evidenciado desde la era preindustrial^(1,2). El CH₄ emitido también contribuye a la fuga de energía en los sistemas de producción pecuaria, ya que representa la pérdida del 6 a 12 % del total de la energía bruta (EB) consumida por el ganado productor de leche⁽²⁾.

Una referencia importante para estimar la producción de CH₄ es la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)⁽³⁾. Esta metodología es usada en diferentes países para generar los inventarios de EGEI, la cual aplica los procedimientos correspondientes dependiendo de la información con que se cuente al nivel 1, 2 y 3. Para México y países en desarrollo, se aplica el nivel 1 (Tier 1), que se basa en el uso de un factor de emisión (FE) de CH₄ animal⁻¹ año⁻¹ que se multiplica por el inventario nacional dentro de cada categoría de ganado. Una crítica a esta metodología es que se emplea un FE que en muchas situaciones no representa la realidad de las condiciones particulares de producción, en especial, lo referente a las características de los alimentos para ganado lechero criado en diferentes regiones del país, y que varían según las características agroecológicas, ambientales, económicas y sanitarias^(4,5).

Las emisiones de CH₄ también se han estimado para ganado de leche en México, de acuerdo a la metodología del nivel 2, para lo cual se requiere calcular el requerimiento de EB y usar un factor de conversión de CH₄, por defecto, que en promedio es de 6.5 %, que representa el porcentaje de la EB del alimento convertida en CH₄. Con base en este método, se ha estimado un FE de 166 y 182 kg CH₄ año⁻¹, en vacas primíparas y multíparas en ordeña en hatos con registro de la Asociación Holstein de México⁽⁶⁾, y de 115 kg CH₄ año⁻¹, para el hato lechero total de México⁽⁷⁾. La variabilidad en el FE obtenido en estos estudios probablemente está relacionada a factores dentro de cada sistema de producción, como el grado de tecnificación, capacidad genética de los animales para producción de leche e influencias ambientales. Debido a la diversidad de factores que pueden influir en el FE, se recomienda contar con un FE para cada tipo de sistema, y dentro de estos, para cada subtipo, que tome en cuenta las características particulares de producción y, en especial, los esquemas de alimentación, incluyendo el tipo, concentración y calidad de los insumos usados en la formulación de las raciones⁽³⁾.

En el país, existen diferentes sistemas de producción de leche, siendo el más preponderante el de producción intensiva, que se caracteriza por el uso de tecnologías modernas y eficientes en todos los eslabones del proceso de producción⁽⁶⁾; y en el otro extremo se encuentra el sistema de producción de traspatio o de tipo familiar, que aporta el 10 % de la producción nacional de leche, que está basado principalmente en esquemas tradicionales de producción, y se caracteriza por tener una amplia variedad de subsistemas, distintos grados de tecnificación y eficiencia productiva^(5,8,9). En general, los sistemas de producción de traspatio han sido poco estudiados, y no se han generado los FE para esta categoría de ganado, lo cual es relevante para estimar las EGEI corregidos para cada tipo de sistema, conocer el grado de impacto de esta clase de ganadería sobre las emisiones y pérdidas de energía en forma de CH₄, y además, para diseñar y aplicar estrategias de investigación, transferencia de tecnologías e innovaciones para mejorar la sustentabilidad de la producción de leche en sistemas de traspatio. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue estimar el FE y PCH₄, usando las ecuaciones de predicción del método nivel 2 del IPCC y con base en información técnica obtenida en unidades de producción del sistema familiar de producción de leche.

Material y métodos

El estudio se llevó a cabo en ranchos de los municipios de El Marqués, Pedro Escobedo y San Juan del Río, en el estado de Querétaro. Los tres municipios se encuentran enclavados en el Eje Neovolcánico, que se caracteriza por contrastes geomorfológicos entre cerros situados entre los 2 y 3 mil msnm y valles localizados entre los mil 800 y mil 900 msnm; predominan los climas templados subhúmedos, con una temperatura media anual y

precipitación pluvial anual de 17.3 ° y 542.9 mm, respectivamente. Se realizaron visitas a 20 establos del sistema familiar pertenecientes a los Grupos de Ganaderos de Validación y Transferencia de Tecnología del Estado de Querétaro, con bajo nivel de tecnificación y en proceso de adopción de nuevas tecnologías. Se entrevistó a los propietarios para obtener información técnica, para lo cual se realizaron, al menos, tres visitas por productor en diferentes meses del año durante el período de abril a agosto.

El peso corporal se estimó a partir del perímetro torácico en los animales adultos y el de los animales jóvenes se estimó por los mismos productores de manera subjetiva; la producción de leche se estimó usando una cubeta de plástico con una escala en litros. En el análisis de datos solamente se incluyeron 10 establos, ya que se descartaron los ranchos participantes que no proporcionaron la información completa o los datos no fueron fidedignos.

La estructura del hato se dividió, siguiendo la terminología empleada por los productores entrevistados, de la siguiente manera: vacas en ordeña o en producción; vacas gestantes de entre 210-270 días de preñez que no estaban en ordeña; vaquillas de entre 200-400 kg; becerras de entre 100-200 kg; toros o sementales; y toretes en engorda. En el Cuadro 1 se presenta el número de animales por categoría.

Cuadro 1: Inventario de animales y producción de leche de vacas en ordeña

	No.	Promedio±DE	Mínimo	Máximo	CV
Inventario de animales					
Vacas en ordeña	10	17.90±7.4	5	27	41.34
Vacas gestantes	9	4.60±2.6	0	9	63.45
Vaquillas	8	6.50±5.42	0	18	83.4
Becerras	9	6.70±4.88	0	17	72.8
Toros	5	0.60±0.7	0	2	116.53
Toretos en engorda	4	1.60±2.27	0	6	141.91
Total	10	39.10±19.73	5	55	50.45
Producción de leche de vacas en ordeña					
Producción de leche, kg/día		8.90±3.84	3	14	43.36
Duración de la lactancia, días		253.10±131.77	180	420	52.06
Producción de leche, kg/lactancia		2130±1620.2	669	5546	76.08
Producción de leche, kg/año		3231±1401.2	1253	5263	43.36

No.= número de ranchos que tuvieron animales en cada categoría; DE= desviación estándar; CV= coeficiente de variación.

En todos los establos se tomaron muestras de los ingredientes alimenticios y se llevó un registro del tipo y cantidad de ingredientes ofrecidos a los animales en las diferentes fases productivas. Con esta información, se calcularon los niveles de inclusión de cada ingrediente en kilos de materia fresca para cada categoría de animales. La lista de ingredientes alimenticios y número de muestras tomadas se presentan en el Cuadro 2. En el laboratorio, los ingredientes se secaron en estufa de aire forzado a una temperatura de 55 °C por un período de 24 a 72 h dependiendo del contenido de humedad, y se molieron usando un molino tipo Wiley a través de una criba de 2 mm. Se determinó el contenido de materia seca (MS) siguiendo el método oficial de la AOAC 930.15⁽¹⁰⁾. El contenido de EB se determinó por combustión de las muestras en una bomba calorimétrica adiabática.

Cuadro 2: Lista de ingredientes alimenticios, número de muestras, contenido de materia seca y de energía bruta en base seca

Ingredientes	No	Materia seca, %	Energía bruta, Kcal/kg			
			Promedio ± DE	Mínimo	Máximo	CV
Concentrado	14	90.76	3927±288.53	3206	4649	7.35
<i>Medicago sativa</i> L., forraje verde	13	33.11	3602±298.76	2787	3824	8.29
<i>Medicago sativa</i> L., heno	14	84.69	3724±302.26	2963	4090	8.12
<i>Zea mayz</i> , grano	15	92.80	4068±669.22	2395	5741	16.45
<i>Zea mayz</i> , ensilado	15	32.46	3694±181.81	3239	4148	4.92
<i>Zea mayz</i> , rastrojo	15	92.12	3713±311.79	2933	4492	8.40
Avena sativa, heno	9	92.32	3790±236.74	3198	4382	6.25
<i>Lolium perenne</i> , forraje verde	1	91.87	4412±0	4412	4412	0
<i>Brassica oleracea</i> , forraje verde	1	21.85	3407±0	3407	3407	0
Mezcla de pastos, heno	4	74.34	3787±321.74	3020	4554	8.49
Pollinaza	5	77.12	3375±769.33	1452	5298	22.79

Número de muestras analizadas; DE= desviación estándar; C= coeficiente de variación.

Estimación de CH₄ usando la información de las unidades de producción

El consumo de MS (CMS) y EB (CEB) animal⁻¹ día⁻¹, se estimaron a partir del consumo de cada ingrediente y de los resultados de MS y EB del laboratorio. En la entrevista hecha a los propietarios, se obtuvo la cantidad total de cada ingrediente ofrecido en base húmeda, dentro

de cada categoría de animales del hato. Este valor se dividió entre el número de animales por categoría para obtener el consumo promedio en kilos animal⁻¹. El FE se calculó, para cada categoría de animales, usando la ecuación (1) recomendada para el nivel 2⁽³⁾:

$$FE = \langle CEB * (|Ym/100| * 365) \rangle / 55.65$$

En donde: FE= factor de emisión, kg de CH₄ cabeza⁻¹ año⁻¹; CEB= consumo de energía bruta MJ cabeza⁻¹ año⁻¹; Ym= factor de conversión de CH₄, como porcentaje de la energía bruta del alimento convertida en CH₄ (6.5 %).

El factor 55.65 (MJ/kg de CH₄) es el contenido de energía del CH₄.

Estimación de la producción de CH₄ usando la metodología del IPCC

Con la información técnica registrada en cada unidad de producción, como peso corporal, producción de leche y ganancia de peso, y uso de las ecuaciones de predicción⁽³⁾, se obtuvieron las siguientes variables:

Energía neta para mantenimiento (ecuación 2: ENm)⁽¹¹⁾:

$$ENm = Cfi * (\text{Peso corporal})^{0.75}$$

En donde: ENm= EN requerida por el animal para su mantenimiento, MJ día⁻¹; Cfi= un coeficiente que varía para cada categoría de animales: vacas en lactancia = 0.386; vacas no lactantes = 0.322; para otros vacunos y toros = 0.370 MJ día⁻¹ kg⁻¹⁽¹²⁾. Peso corporal = peso de animal en vivo, kg.

Energía neta para crecimiento (ecuación 3: ENg)⁽¹²⁾:

$$ENg = 22.02 * [PCm / (C * PChm)^{0.75}] * GDP^{1.097}$$

En donde: ENg= EN para el crecimiento, MJ día⁻¹; PCm= peso corporal promedio de los animales de la población, kg; C= coeficiente con un valor de 0.8 para hembras, 1.0 para castrados y 1.2 para toros; PChm= peso corporal maduro de una hembra adulta en condición corporal moderada, kg; GDP= ganancia diaria promedio de los animales de la población, kg día⁻¹

Energía neta para lactancia (ecuación 4: ENI)⁽¹³⁾:

$$ENI = \text{Leche} * (1.47 + 0.40 * \text{Grasa})$$

En donde: ENI= EN para lactancia, MJ día⁻¹; Leche= cantidad de leche producida, kg leche día⁻¹; Grasa= contenido graso de la leche, %. El contenido de grasa en leche se tomó de un trabajo previo donde se analizó la composición química de leche de establos del sistema familiar en municipios del estado de Querétaro⁽¹⁴⁾.

Energía neta para preñez (ecuación 5: EN_p):

$$EN_p = C_{preñez} * EN_m$$

En donde: EN_p= EN para la preñez, MJ día⁻¹; C_{preñez}= coeficiente de preñez. Para vacas es 0.10; EN_m= EN requerida por el animal para su mantenimiento, MJ día⁻¹.

Relación entre la EN disponible en la dieta para mantenimiento y la energía digestible (ED) consumida, se estimó con la ecuación 6⁽¹⁵⁾:

$$REM = [1.123 - (4.092 * 10^{-3}) + \{1.126 * 10^{-5} * (ED\%)^2\} - (25.4/ED\%)]$$

En donde: REM= relación entre la EN disponible en una dieta para mantenimiento y la ED consumida; ED%= ED expresada como porcentaje de la EB.

Relación entre la EN disponible en una dieta para crecimiento y la ED consumida, se estimó con la ecuación 7⁽¹⁴⁾:

$$REG = [1.164 - (5.160 * 10^{-3} * ED\%) + \{1.308 * 10^{-5} * (ED\%)^2\} - (37.4/ED\%)]$$

En donde: REG= relación entre la EN disponible en la dieta para crecimiento y la ED consumida; ED%= ED expresada como porcentaje de la energía bruta.

El requerimiento de EB se derivó sobre la base de la suma de los requerimientos de EN y las características de disponibilidad de energía de los alimentos. Para vacas en lactancia se utilizaron los requerimientos de: EN_m, EN_l y EN_g; en vacas gestantes: EN_m, EN_p y EN_g; y, en animales en crecimiento: EN_m y EN_g. La ecuación general (8) fue la siguiente:

$$EB = [\{(NEM + NEL + NEp)/REM\} + (NEg/REG)]/(ED\%/100)$$

En donde: EB= energía bruta, MJ día⁻¹; EN_m= EN requerida por el animal para su mantenimiento, MJ día⁻¹; EN_l= EN para lactancia, MJ día⁻¹; EN_p= EN requerida para la preñez, MJ día⁻¹; REM= relación entre la EN disponible en una dieta para mantenimiento y la ED consumida; EN_g= EN para el crecimiento, MJ día⁻¹; REG= relación entre la EN disponible en una dieta para crecimiento y la ED consumida; ED%= ED expresada como porcentaje de la EB.

El requerimiento de EB obtenido, se usó como equivalente del CEB para calcular el FE mediante la ecuación recomendada para el nivel 2, para cada categoría de animales. También se estimó el CMS por día, dividiendo el requerimiento de EB por la densidad de energía del alimento, usando un valor por defecto de 18.45 MJ kg⁻¹ de MS⁽³⁾.

Adicionalmente a la estimación del FE, se calculó la pérdida diaria de EB en forma de CH₄ para cada categoría animal usando la ecuación 9:

$$PCH_4 = [EB * (Y_m/100)]/0.236$$

En donde: PCH₄= Pérdida diaria de EB en forma de CH₄, Mcal animal⁻¹; El factor 0.236 se usó para convertir los valores de energía de MJ a Mcal.

Posteriormente, se estimaron los promedios ponderados de FE y PCH₄, por rancho, considerando todas las fases productivas. También se calculó el promedio ponderado de la pérdida de EB kg leche⁻¹ día⁻¹ (PL) usando la ecuación 10:

$$PL = PCH_4 \text{ Leche}^{-1}$$

En donde: PL= Pérdida de EB en forma de CH₄, Mcal Kg leche⁻¹ día⁻¹; PCH₄= Pérdida diaria de EB en forma de CH₄, Mcal animal⁻¹ día⁻¹; Leche= Producción de leche, kg día⁻¹.

Los inventarios de animales, producción de leche de vacas en ordeña y concentración de EB de los ingredientes se sometieron al procedimiento PROC MEANS del SAS⁽¹⁶⁾ para calcular las medias y valores mínimos y máximos. Adicionalmente se estimó el coeficiente de variación (CV) de acuerdo a la fórmula siguiente: CV= (desviación estándar ÷ media) * 100. Los resultados de CMS, CEB, FE, PCH₄ y PL usando las ecuaciones del IPCC se compararon con los resultados de CMS, CEB, FE, PCH₄ y PL usando los datos técnicos de los ranchos mediante análisis de varianza y los procedimientos de GLM del SAS⁽¹⁶⁾. Se usó un modelo completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento. Para estas variables, en los cuadros de resultados se presentan las medias de cuadrados mínimos y el error estándar de la media. En los casos de significancia estadística, las diferencias entre medias se compararon con la prueba de Diferencia Mínima Significativa.

Resultados y discusión

En el Cuadro 1 se presenta el número de animales por categoría y la producción de leche de vacas en ordeña. El total de vacas en ordeña y gestantes fue en promedio de 22.5 y las hembras en crecimiento sumaron 13.2 animales, lo que representó 57.5 y 33.8 % del total de animales; los toretes en engorda y los toros solo contribuyeron con 4 y 1.5 % del total del hato, respectivamente. El total de animales fue de 39.1 con un mínimo y máximo de 5 y 55. Debido a que en todos los ranchos se encontraron vacas en ordeña, pero solo en cuatro se encontraron toretes en engorda, ya que el resto de los productores los vende a intermediarios; esto se reflejó en menor y mayor CV en estos dos grupos de animales. Solamente un rancho tuvo cinco vacas en ordeña y el resto de las unidades tuvieron de 8 a 27 vacas en ordeña y de 23 a 55 animales en total. El tamaño del hato en el presente estudio estuvo dentro del rango reportado en unidades de producción de tipo familiar de producción de leche en diferentes estados de la República^(5,8,9). En ocho ranchos se tenían solamente animales de raza Holstein y en dos se encontraron animales Holstein y Pardo Suizo americano.

La producción de leche promedio, mínima y máxima fue de 8.9, 3.4 y 14.4 kg día⁻¹. La duración de la lactancia fue en promedio de 253.1 días con mínimos y máximos de 180 y 420 días. La producción promedio, mínima y máxima de leche kg⁻¹ lactancia⁻¹ fue de 2,130, 670 y 5,546 kg. La producción de leche en kg año⁻¹ fue en promedio de 3,231 con mínimos y

máximos de 1,253 y 5,263 kg. La producción de leche reportada en otras evaluaciones en sistemas familiares fue de 10.7, 11 y 17.3 kg de leche vaca día^{-1(5,8,9)}, las cuales son mayores que la reportada en el presente trabajo. Así mismo, la producción de leche en kg año⁻¹ fue menor a la reportada para sistemas familiares de producción de leche con manejo tradicional o mejorado a través de un programa de validación y transferencia de tecnología de 3,417 y 4,632 kg de leche año⁻¹, respectivamente⁽⁵⁾.

El contenido promedio, valores mínimos y máximos, y CV de EB se presentan en el Cuadro 2. En general, los valores promedio y CV encontrados coinciden con otros reportes y reflejan la variación natural de los ingredientes disponibles para los animales^(12,17). El CV mínimo y máximo se presentó en el ensilaje de maíz (4.9 %) y pollinaza (22.8 %). Se ha reportado que diferentes condiciones de manejo y agroecológicas influyen en el contenido de EB en diferentes épocas del año, dependiendo del clima, producción en riego o temporal y dosis de fertilización. Probablemente, los mayores extremos en cuanto a la disponibilidad y calidad de los ingredientes se presenten entre las épocas seca y de lluvias; en el presente trabajo se trató de minimizar este efecto al llevar a cabo los muestreos entre primavera y verano. Otros factores que influyen en el contenido de EB son la variedad de las plantas, momento de la cosecha, condiciones de manejo y almacenamiento postcosecha y tipo de procesamiento^(12,17,18). Durante las visitas a los ranchos se observó que algunas alfalfas se producían en terrenos aledaños, pero la mayoría de los productores desconocía la variedad de la semilla, edad del cultivo, número de cortes y edad del forraje al corte; algunas alfalfas se ofrecían frescas, achicaladas o deshidratadas. Otros productores compraban la alfalfa en pacas, normalmente deshidratada, desconocían la información mencionada antes y tampoco sabían el tiempo que las pacas habían estado almacenadas antes de adquirirlas. Esta falta de información se observó en la mayoría de los ingredientes muestreados.

El CMS, CEB, FE y PCH₄ por fase productiva se presentan en el Cuadro 3. En vacas en ordeña, el CMS (11.28 y 10.42, kg día⁻¹), CEB (45.42 y 39.41, Mcal día⁻¹), FE (81 y 70, kg CH₄ año⁻¹) y PCH₄ (2.95 y 2.56, Mcal día⁻¹) estimados con las ecuaciones del IPCC fueron similares a los estimados de las observaciones en ranchos. Esto indica que, en vacas en ordeña, los resultados de las ecuaciones del IPCC constituyen un buen punto de comparación o verificación para la predicción de estas variables con el uso de los procedimientos recomendados para el nivel 2. En los alimentos de vacas en ordeña se incluyeron concentrados en todos los establos, lo que representa la mayor proporción de la ración, en promedio de 33 %; en orden de frecuencia le siguió la alfalfa y silo de maíz. De acuerdo a la mayoría de los productores entrevistados, en los sistemas familiares de producción de leche se siguen esquemas de alimentación de vacas en ordeña similares al de las vacas en sistemas intensivos localizados en la zona de estudio. Probablemente esta es la razón por la cual no hubo diferencias en las variables evaluadas en ranchos y las estimadas con el IPCC.

Cuadro 3: Consumo de materia seca y de energía bruta, factor de emisión de metano y pérdida de energía en forma de metano por fase productiva usando las ecuaciones del IPCC o los datos técnicos de los ranchos

	IPCC	Ranchos	EEM	P <
Consumo de materia seca, kg día ⁻¹				
Vacas en ordeña *	11.28	10.42	0.757	0.43
Vacas gestantes **	11.47 ^c	9.28 ^d	0.456	0.01
Vaquillas	7.09	6.93	0.545	0.84
Becerras	4.51	4.49	0.367	0.98
Toros	14.88 ^e	9.75 ^f	1.217	0.02
Toretas	6.95	7.4	0.819	0.75
Consumo de energía bruta, Mcal día ⁻¹				
Vacas en ordeña	45.42	39.41	3.896	0.28
Vacas gestantes	26.58 ^c	34.97 ^d	1.662	0.01
Vaquillas	14.63 ^c	25.96 ^d	2.271	0.01
Becerras	10.57 ^c	16.77 ^d	1.385	0.01
Toros	34.26	37.11	4.505	0.46
Toretas	15.55 ^e	22.88 ^f	2.191	0.05
Factor de emisión (kg de CH ₄ cabeza ⁻¹ año).				
Vacas en ordeña	81.02	70.3	6.95	0.28
Vacas gestantes	47.41 ^e	62.36 ^f	2.964	0.01
Vaquillas	26.10 ^e	46.29 ^f	4.049	0.01
Becerras	18.86 ^e	29.91 ^f	2.469	0.01
Toros	61.12	66.17	8.033	0.46
Toretas	27.74 ^g	40.82 ^h	3.908	0.05
Pérdida de energía en forma de metano, Mcal día ⁻¹				
Vacas en ordeña	2.95	2.56	0.253	0.28
Vacas gestantes	1.73 ^c	2.27 ^d	0.108	0.01
Vaquillas	0.95 ^c	1.69 ^d	0.148	0.01
Becerras	0.69 ^c	1.09 ^d	0.09	0.01
Toros	2.23	2.41	0.293	0.46
Toretas	1.01 ^g	1.49 ^h	0.136	0.05

IPCC = usando las ecuaciones recomendadas por el IPCC; Ranchos= usando la información técnica de los ranchos; EEM= error estándar de la media.

* Medias sin literal en la misma línea no son diferentes ($P > 0.05$).

** Medias con diferente literal en la misma línea son diferentes ($P < 0.05$).

Los valores de FE de las vacas en ordeña fueron entre 41.6 a 65.8 % menores a los encontrados en vacas en producción en otros estudios realizados en México en los que se usó también los procedimientos recomendados para el nivel 2. El FE en vacas primíparas y múltiparas de 16 hatos con registro en la Asociación Holstein de México fue de 166 y 182 kg CH₄ año⁻¹, en lactancias de 305 días, respectivamente⁽⁶⁾; para calcular el FE, primero se estimó la ED de la dieta usando un valor por defecto y el contenido de nutrientes digeribles totales (NDT), y posteriormente la ED se convirtió a EB usando otro valor por defecto. Mientras que para el hato lechero total de México se estimó un FE de 115 kg CH₄ año⁻¹, con un período de lactancia de 305 días⁽⁷⁾; el cálculo del FE se basó en la estimación del contenido de EB de cinco dietas reportadas en trabajos hechos en ganado de leche en México y publicados entre 1971-2009. El menor FE estimado en el presente trabajo puede tener dos explicaciones: 1) las diferencias en las metodologías empleadas para estimar el CEB respecto a los trabajos previos, en los que se destaca que no se analizó en un laboratorio el contenido de MS y EB en los ingredientes ni alimentos consumidos por los animales incluidos en los estudios, y 2) a las diferencias en el nivel de producción de leche, que afecta directamente el nivel de consumo de nutrientes, y para el caso de las estimaciones realizadas con base en el IPCC, al CEB; el factor de conversión de CH₄ (Y_m) es un valor que representa un porcentaje fijo de EB (6.5%), que es convertida en CH₄ (ecuación 1) y, por lo tanto, entre mayor es el CEB, tanto mayor la producción de CH₄⁽³⁾. En el presente trabajo, la producción de leche por lactancia ajustada a 305 días fue de 2,715 kg; para los hatos Holstein fue de 9,985 kg⁽⁶⁾ y para el hato lechero de México fue de 3,795 kg⁽⁷⁾. De manera que, el FE es mayor en las vacas con mayor producción de leche, intermedio en las vacas con producción intermedia de leche y menor en las vacas en ordeña del presente trabajo. Esta misma tendencia se observa en varios reportes donde el FE varió entre 102 a 128 kg CH₄ año⁻¹ en vacas en ordeña con una producción anual de leche de 5,365 a 8,270 kg, respectivamente^(19,20).

En vacas gestantes, el CMS observado fue 19 % menor ($P<0.01$), pero el CEB, FE y la PCH₄ observados fueron 32 % mayores ($P<0.01$) a los estimados con las ecuaciones del IPCC (Cuadro 3). Estos resultados indican que, en vacas gestantes, el uso de las ecuaciones del IPCC sobrestimó el CMS y subestimó el CEB, FE y la PCH₄ por lo que no constituyen un buen punto de comparación o verificación para la predicción de estas variables usando el método nivel 2. La diferencia en el CMS fue de 2.2 kg día⁻¹ por abajo y el CEB fue de 8.0 Mcal kg⁻¹ por arriba de lo esperado. En vacas gestantes el rastrojo de maíz y heno de avena se usaron con mayor frecuencia y en mayor concentración que en vacas en ordeña. Probablemente, estos ingredientes provocaron un mayor llenado del rumen, lo que, asociado a la presión del feto, redujo el CMS; pero al mismo tiempo, contribuyeron con el mayor CEB. El FE estimado y observado fue de 47 y 62 kg CH₄ año⁻¹ en vacas gestantes. Existen pocos trabajos sobre emisiones de CH₄ en estos animales. En un reporte se encontró que, para vaquillas de más de un año hasta el parto, con un peso corporal de 310-520 kg, el FE fue de 55.15 kg CH₄ año⁻¹⁽¹⁹⁾. En el presente trabajo, el peso corporal de las vacas gestantes fue en

promedio de 475 kg, el cual está dentro del rango mencionado anteriormente; sin embargo, el requerimiento de EB para vaquillas no gestantes y vacas gestantes se calculó por separado debido a que, al mismo peso corporal, las vacas gestantes presentan mayor requerimiento de EB. Esto se debe al uso de la EN_p (ecuación 5) y a que, en vacas de entre 210-270 días de gestación, la EN_c se incrementa paralelamente al crecimiento del feto y también depende del peso esperado de la cría al nacimiento⁽²¹⁾.

En vaquillas y becerras el CMS fue similar, pero el CEB, FE y la PCH₄ estimados fueron menores ($P < 0.01$) con las ecuaciones del IPCC a los observados en ranchos (Cuadro 3). El CEB, FE y la PCH₄ observados fueron 56 % mayores en las vaquillas y 63 % mayores en las becerras respecto a los correspondientes valores estimados. En la mayoría de los ranchos, el rastrojo de maíz representó el ingrediente usado con mayor frecuencia y en mayor proporción (en promedio, 50 % de la ración), y aportó la mayor cantidad de la EB en las hembras en crecimiento. Para becerras de hasta un año de edad, con peso corporal de 43 a 320 kg, el FE reportado fue de 34 a 35 kg CH₄ año⁻¹, y en hembras de uno a dos años, con pesos de 310 a 530 kg, el FE fue de 49 kg CH₄ año⁻¹⁽¹⁹⁾. En vaquillas de 499 kg de peso y mantenidas en confinamiento o pastoreo el FE fue de 77 y 67 kg CH₄ año⁻¹, respectivamente⁽²²⁾. El FE en vaquillas (estimado= 26 y observado= 46 kg CH₄ año⁻¹) y becerras (estimado= 19 y observado= 30 kg CH₄ año⁻¹) fueron menores a los reportados previamente. Probablemente, esto se debe a las diferencias en peso corporal, lo cual impacta en el requerimiento de EN_m y EN_c y sobre el CMS^(3,12).

En toros, el CMS estimado fue 53 % mayor (14.88 vs 9.75, kg día⁻¹; $P < 0.02$) al observado (Cuadro 3). Los valores estimados y observados de CEB, FE y PCH₄ fueron similares, a pesar de la gran diferencia en el CMS. En toros de más de dos años de edad se estimó un CMS de 8.6-9.2 kg día⁻¹, CEB de 37.95 Mcal día⁻¹ y FE de 62.59 kg CH₄ año⁻¹⁽¹⁹⁾, los cuales concuerdan con los valores observados en el presente estudio. En cuatro de cinco ranchos donde se tenían toros se incluyó alimentos concentrados y, en general, la composición de las raciones de los toros fue más parecida a las de las vacas en ordeña. Probablemente, la inclusión de concentrados y de ingredientes más digestibles causó que, aunque el CMS observado fue menor, el CEB fue similar a lo esperado.

En toretes en engorda, el CMS (6.95 y 7.40, kg día⁻¹) fue similar, pero el CEB (15.55 y 22.88, Mcal día⁻¹), FE (27.74 y 40.82, kg CH₄ año⁻¹) y la PCH₄ (1.01 y 1.49, Mcal) estimados fueron 69 % menores ($P < 0.05$) a los observados en ranchos (Cuadro 3). En toretes de uno a dos años de edad se estimó un CMS de 8.3 kg día⁻¹, CEB de 36.0 Mcal día⁻¹ y FE de 60.1 kg CH₄ año⁻¹⁽¹⁹⁾. Estos valores son mayores a los encontrados en el presente estudio, probablemente por el mayor peso de los toretes (en promedio, 540 kg) y calidad de la dieta en el estudio mencionado. En el presente trabajo, el peso promedio de los toretes fue de 290 kg y en tres de cuatro ranchos, el rastrojo de maíz representó el ingrediente mayoritario en el alimento.

Las medias ponderadas del FE, PCH₄ y PL rancho⁻¹ se presentan en el Cuadro 4. El FE (49.06 y 54.09, kg CH₄ año⁻¹) fue similar, pero la PCH₄ (1.11 y 1.97, Mcal día⁻¹; $P < 0.01$) y PL (0.13 y 0.27, Mcal kg leche⁻¹; $P < 0.03$) estimados fueron 44 y 52 % menores, respectivamente, a los observados en ranchos. La falta de diferencia en el FE ponderado entre los valores estimados y los observados coinciden con los resultados observados en vacas en ordeña; probablemente, por el peso específico que representan las vacas en producción, al emplear la metodología del IPCC, las estimaciones parecen adecuadas cuando se aplican al hato en su conjunto. La PCH₄ y PL no se incluyen en las estimaciones del IPCC; sin embargo, sirven para conocer el impacto de las prácticas alimenticias en la ineficiencia de uso de energía, y se pueden usar, para estimar ineficiencias económicas asociadas a estas pérdidas, con información adicional de costos de los insumos. Estas variables tienen la fortaleza que, para su estimación, se incluyen los animales productivos y no productivos del hato, además de las vacas en ordeña. Los resultados sugieren que, usando la información técnica de los ranchos fue posible evidenciar una mayor PCH₄ y PL rancho⁻¹, y, en consecuencia, menor eficiencia energética, con respecto a la metodología del IPCC. Probablemente debido a la mayor PCH₄ observada en vacas gestantes, vaquillas, becerras y toretes (Cuadro 3).

Cuadro 4: Factor de emisión y pérdidas de energía en forma de metano por unidad de producción usando las ecuaciones del IPCC o los datos técnicos de los ranchos

	IPCC	Ranchos	EEM	$P <$
Factor de emisión de CH ₄ , kg año ⁻¹ *	49.06	54.09	3.889	0.37
Pérdida de EB en forma de CH ₄ , Mcal día ⁻¹ **	1.11 ^c	1.97 ^d	0.161	0.01
Pérdida diaria de EB, Mcal kg leche ⁻¹	0.13 ^e	0.27 ^f	0.043	0.03

IPCC= usando las ecuaciones recomendadas por el IPCC; Ranchos= usando la información técnica de los ranchos; EEM = error estándar de la media.

* Medias sin literal en la misma línea no son diferentes ($P > 0.05$).

** Medias con diferente literal en la misma línea son diferentes ($P < 0.05$).

Los hallazgos sugieren que las estimaciones de CMS, CEB, FE y PCH₄ con la metodología para el nivel 2 recomendada por el IPCC solamente fueron similares a las observadas en vacas en ordeña, pero hubo resultados contrastantes en el resto de los animales del hato. Esto probablemente se debe a que la mayor parte de los estudios de donde se han derivado las ecuaciones se han realizado en vacas en ordeña, pero hay poco trabajo realizado en otras etapas productivas. La mayor PCH₄ y PL observadas en ranchos puede deberse a que las ecuaciones de predicción se han derivado de estudios en animales con mayores niveles de producción y en condiciones experimentales con adecuado control de alimentación, ambiental y sanitario; mientras que en los ranchos visitados se usan los ingredientes disponibles en función de la época del año, pero no se aplica un balanceo adecuado de las raciones, las instalaciones son deficientes y no se emplean medidas apropiadas de prevención de enfermedades^(5,8,9).

Conclusiones e implicaciones

Las estimaciones de CMS, CEB, FE y PCH₄ usando los procedimientos propuestos por el IPCC del método nivel 2 coincidieron con los valores observados, solamente en vacas en ordeña, pero los resultados fueron inconsistentes cuando se aplicaron al resto de los animales del hato. En general, a través del uso de información técnica de los ranchos fue posible estimar el FE y evidenciar una mayor PCH₄ y PL rancho⁻¹, y, en consecuencia, menor eficiencia energética, con respecto a la metodología del IPCC. Existen varios factores alimenticios que ejercen influencia en la degradabilidad de los alimentos, los patrones de fermentación entérica y la producción ruminal de CH₄, como la cantidad y tipo de almidones, el tipo y solubilidad de las proteínas, el tipo y concentración de las fracciones de fibra, entre otros, que se deben considerar en trabajos futuros para mejorar la precisión de las estimaciones de CH₄. Otras limitantes del estudio fueron que los productores no contaban con registros sistematizados de la información; parte de los datos técnicos fueron estimados con base en la percepción subjetiva de los productores y no se contó con medios de verificación.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del Proyecto (FORDECYT Clave 143064): “Establecimiento de módulos de validación y transferencia de tecnología pecuaria para impulsar acciones de mitigación del cambio climático y cuidado del medio ambiente”.

Literatura citada:

1. Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C. Livestock's Long Shadow: environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 2006.
2. Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2013.
3. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies. 2006.

4. Opio C, Gerber P, Mottet A, Falcucci A, Tempio G, MacLeod M, Vellinga T, Henderson B, Steinfeld H. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chain– A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2013.
5. Espinosa GJA, Wiggins S, González OAT, Aguilar BU. Sustentabilidad económica a nivel de empresa: aplicación a unidades familiares de producción de leche en México. *Tec Pecu Mex* 2004;42:55-70.
6. Morante LD, Guevara EA, Suzán AH, Lemus RV, Sosa FCF. Estimación Tier II de emisión de metano entérico en hatos de vacas lactantes en Querétaro, México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2016;7:293-308.
7. Rendón-Huerta JA, Pinos-Rodríguez JM, García López JC, Yáñez-Estrada LG, Kebreab E. Trends in greenhouse gas emissions from dairy cattle in Mexico between 1970 and 2010. *Anim Prod Sci* 2013;54:292-298.
8. Sánchez GLG, Solorio RJL, Santos FJ. Factores limitativos al desarrollo del sistema familiar de producción de leche, en Michoacán, México. *Cuad Des Rural* 2008;5:133-146.
9. Álvarez-Fuentes G, Herrera-Haro JG, Alonso-Bastida G, Barreras-Serrano A. Calidad de la leche cruda en unidades de producción familiar del sur de Ciudad de México. *Arch Med Vet* 2012;44:237-242.
10. AOAC. Official methods of analysis. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA. 2002.
11. Jurgen MH. Animal feeding and nutrition. Sixth ed, Iowa, USA: Kendall/Hunt Publishing Company; 1988.
12. NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Beef Cattle, National Academy Press, Washington, DC. USA. 1996.
13. NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Dairy Cattle, National Academy Press, Washington, DC. USA. 1989.
14. Escobar RMC, Hernández AL, Alvarado IA, Gómez RS, Ángeles ML. Diagnóstico y control de microorganismos patógenos en establos de lechería familiar. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal, INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico No. 3, Colón, Querétaro. 2012.

15. Gibbs MJ, Johnson DE. "Livestock Emissions." In: International Methane Emissions, US. Environmental Protection Agency, Climate Change Division, Washington, DC, USA. 1993.
16. SAS. SAS User's Guide; Versión 9.0: SAS Institute Inc. Cary, NC (USA). 2002.
17. NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Dairy Cattle. National Academy Press, Washington, DC, USA. 2001.
18. Ali M, Cone JW, Hendriks WH, Struik PC. Starch degradation in rumen fluid as influenced by genotype, climatic conditions and maturity stage of maize, grown under controlled conditions. *Anim Feed Sci Technol* 2014;193:58-70.
19. Smink W, Pellikaan WF, van der Kolk LJ, van der Hoek KW. Methane production as a result from rumen fermentation in cattle calculated by using the IPCC-GPG Tier 2 method. *Feed Innovation Services Report FS 04 12 E*, Utrecht, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment. 2004.
20. Bannink A, van Schijndel MW, Dijkstra J. A model of enteric fermentation in dairy cows to estimate methane emission for the Dutch National Inventory Report using the IPCC Tier 3 approach. *Anim Feed Sci Technol* 2011;166-167:603-618.
21. Bell AW, Slepatis G, Ehrhardt RA. Growth and accretion of energy and protein in the gravid uterus during late pregnancy in Holstein cows. *J Dairy Sci* 1995;78:1954-1961.
22. Ominski KH, Boadi DA, Wittenberg KM, Fulawka DL, Basarab JA. Estimates of enteric methane emissions from cattle in Canada using the IPCC Tier-2 methodology. *Can J Anim Sci* 2007;87:459-467.