

EMISIÓN DE METANO Y ÓXIDO NITROSO DE EXCRETAS DE BOVINOS EN COSTA RICA

Johnny Montenegro-Ballester¹, Eduardo Barrantes-Guevara²

RESUMEN

Emisión de metano y óxido nitroso de excretas de bovinos en Costa Rica. En el trópico seco de Costa Rica se cuantificó la emisión de N_2O-N y de CH_4-C proveniente de excretas de bovinos, y se evaluó la influencia de las condiciones climáticas en la emisión de estos gases. Para ello se recolectó orina y excretas sólidas de novillos Brahman y se establecieron cuatro experimentos según época climática: seca, transición a lluvias, lluviosa, y transición a época seca. En cada una se evaluaron tres tratamientos: orina, excretas sólidas y, testigo sin excretas, y cinco repeticiones en un arreglo de parcelas divididas. Las evaluaciones se realizaron durante 30 días en cada época climática, utilizando la técnica de la cámara fija para recolectar muestras gaseosas. La emisión de óxido nitroso mostró las mayores fluctuaciones y con episodios de emisión más elevados durante la época lluviosa, y valores intermedios para la transición tanto a la época lluviosa como a la seca. Además, presentó interacción de época*tratamiento ($P<0,041$). La emisión de metano fue mayor ($P<0,0171$) en las excretas sólidas. Los factores de emisión determinados para el N_2O-N y CH_4-C (0,25% y $306,4\text{ g}^{-1}\text{ c}^{-1}\text{ a}^{-1}$, respectivamente) son inferiores a los propuestos por IPCC. Los resultados apoyan la realización de este tipo de investigación y la utilización de los mismos para calcular y estimar la emisión de estos gases proveniente de este tipo de sustrato.

Palabras clave: Trópico, factor de emisión, ganado bovino, época climática, Brahman

ABSTRACT

Methane and nitrous oxide emitted from bovine excreta in Costa Rica. This research was carried out in the tropic dry forest ecosystem of Costa Rica in order to quantify the emission of N_2O-N and CH_4-C from bovine excreta, and to assess the influence of climatic conditions on the emission of these gases. Urine and solid manure were collected from Brahman steers and four experiments were established according to different climatic condition: dry season, transition to rainy season, rainy season, and transition to dry season. In each one three treatments were evaluated: urine, dung and, control without excreta, each with five replicates, with an arrangement of divided plots. The evaluations were carried out for 30 days in each season, using the fixed chamber technique to collect gaseous samples. The emission of nitrous oxide showed the

1 Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. E-mail: jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr. Teléfono (506) 2222-5616 / Fax (506) 2223-1837. ORCID:0000-0001-8526-570X

2 Dirección de Investigación y Transferencia, Universidad Técnica Nacional - Sede Atenas, Email: ebarrantes@utn.ac.cr Teléfono (506) 2455-1004 ORCID: 0000-0002-0383-3388

greatest fluctuations and with higher emission episodes during the rainy season, and intermediate values for the transition to both the rainy and dry seasons. In addition, the emission presented season*treatment interaction ($P < 0.041$). The methane emission was higher ($P < 0.0171$) for solid excreta. The emission factors determined for N_2O-N and CH_4-C (0.25% and $306.4 \text{ g}^{-1} \text{ c}^{-1} \text{ a}^{-1}$) are lower than those proposed by IPCC. The results support both the realization of this type of research and the use these values for the calculation and estimation of the emission from this type of substrate.

Keywords: Tropic, emission factor, cattle, season, Brahman

INTRODUCCIÓN

El incremento de la concentración atmosférica de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), gases denominados con efecto invernadero (GEI), están fuertemente correlacionados con el calentamiento global. Estimaciones recientes (NOAA 2018) muestran que a mediados del 2018, los niveles atmosféricos promedio de CH_4 y N_2O fueron 53 y 16% más altos que los observados en 1900; estos gases tienen un potencial de calentamiento 21 y 310 veces mayor que el CO_2 .

Diferentes sectores contribuyen con la emisión de los GEI siendo el agropecuario uno de ellos, principalmente por el N_2O que se deriva de la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el CH_4 producto de la fermentación entérica. También debe considerarse la emisión directa e indirecta de estos dos gases que son generados en las excretas de ganado que se depositan en las pasturas. De acuerdo con proyecciones realizadas, se estima que para el 2030 debido al aumento en la demanda de productos ganaderos, la emisión de N_2O y CH_4 se incrementarán entre 35% y 60% (Oenema *et al.* 2005).

La emisión de N_2O está directamente relacionada con la baja eficiencia de utilización del nitrógeno (N) consumido, ya que entre 70% y 95% del N ingerido es retornado al suelo en las excretas sólidas y la orina (Oenema *et al.* 2005, Saggarr *et al.* 2013). En consecuencia, pequeñas áreas reciben gran cantidad de N disponible ($500-1000 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}$) (Williams y Haynes 2000; Barneze *et al.* 2014).

La gran concentración de N y carbono (C) en las excretas sólidas y en los parches de orina

de los bovinos actúan como “puntos calientes” para la emisión de N_2O , ya que el suministro de nitrógeno en los parches de excretas excede el potencial de asimilación (Haynes y Williams 1993) y retención por parte de las plantas, los microorganismos y el suelo (Di *et al.* 2014).

Por lo tanto, se pierde el exceso de N del sistema por lixiviación de nitratos (NO_3-N) y emisiones gaseosas (por ejemplo, N_2O) (Di y Cameron 2002; Saggarr *et al.* 2011). Según Oenema *et al.* (2005) la emisión de N_2O derivada de estas excretas es muy significativa ya que comprenden más del 40% del total asociado con los sistemas de producción animal.

Debido a que las emisiones a menudo se correlacionan positivamente con la temperatura (González-Avalos y Ruiz-Suárez 2001; Rochette *et al.* 2014), se podría esperar que, en los sistemas de producción animal ubicados en el trópico, la emisión de N_2O y CH_4 generadas por las excretas sean mayores que en los climas templados. Sin embargo, la inferior calidad nutritiva de las pasturas en el trópico con respecto a aquellas de climas templados, así como el predominio del ganado de carne *Bos taurus* manejado en Costa Rica puede tener influencia en las emisiones de estos dos gases por diferencias en la eficiencia de aprovechamiento del alimento consumido.

En este sentido, el contenido de proteína en la dieta y su digestibilidad influyen en la cantidad y tipo de N y C presente en las excretas del ganado (Rotz 2004; Dijkstra *et al.* 2011). Por lo tanto, los alimentos de baja calidad probablemente resulten

en excretas con concentraciones reducidas de N y mayor relación C:N que las presentes en otras latitudes, lo cual influenciaría las emisiones que se deriven de ellas (Schlecht *et al.* 2006).

Actualmente, para estimar y reportar en los inventarios nacionales de gases con efecto invernadero la emisión proveniente de excretas de los bovinos, debido a la falta de factores nacionales, se utiliza el Nivel I de las directrices del IPCC (2006), las cuales indican que para el N₂O-N utilizar el 2% del N contenido en las excretas. En el caso del CH₄ proveniente de las excretas sólidas de los bovinos, el IPCC (2006) sugiere para América Latina la utilización del factor de emisión de 1,0 kg animal por año.

Usualmente los valores sugeridos por IPCC provienen de estudios realizados en clima templado, algunos de ellos en condiciones de laboratorio, y por lo tanto no reflejan las condiciones específicas (suelo, clima, manejo nutricional) del lugar donde se desarrollan muchos sistemas de producción (de Klein *et al.* 2003; Bell *et al.* 2015), mucho menos condiciones tropicales.

En este sentido, el IPCC alienta el desarrollo de factores específicos del país (Nivel 2), especialmente para las fuentes de emisión clave. Si esta información está disponible, es posible utilizarla para el cálculo de la emisión a reportar en los inventarios o comunicaciones nacionales.

Países como Australia y Nueva Zelandia (2012) han desarrollado sus propios factores de emisión de manera individual para la orina y las excretas y los utilizan para los cálculos correspondientes incluidos en los reportes de los inventarios de sus países (Kelliher *et al.* 2014; Department of Climate Change and Energy Efficiency 2014).

Con respecto al desarrollo de investigaciones para la obtención de factores de emisión, Byrnes *et al.* (2017) en Colombia, Mazzeto (2014) en Brasil, Luo *et al.* (2013) en Nueva Zelandia, Krol *et al.* (2016) en Irlanda, Pelster *et al.* (2016) en Kenia, y Bell *et al.* (2015) en Escocia, determinaron que estos fueron más bajos que el valor del 2% sugerido por el IPCC.

En Costa Rica, al igual que en otros países del trópico, este tipo de información aún no está disponible, por lo tanto, se requiere investigación científica para determinar los factores de emisión correspondientes. Por lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron el cuantificar la emisión de N₂O-N y de CH₄-C provenientes de la orina y excretas sólidas de bovinos en el trópico seco de Costa Rica, evaluar la influencia de las condiciones climáticas a lo largo del año en la emisión de estos gases y comparar los factores de emisión determinados con los propuestos por el IPCC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

Esta investigación se llevó a cabo en la Universidad Técnica Nacional (UTN), Sede Atenas (9°56'20.65" N y 84°22'16.02" O, 546 msnm), Costa Rica; en un clima de bosque seco tropical, que tiene un promedio anual de 1200 mm de lluvia y 25°C de temperatura. Esta región presenta seis meses sin lluvia, condición que se presenta desde noviembre y hasta abril, meses donde ocurre la transición de la época lluviosa a la seca y, de la seca a la lluviosa.

El suelo de textura franco arcilloso se clasifica como Ultisol, con características químicas mostradas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Análisis químico del suelo (0-20 cm de profundidad). Atenas, Costa Rica, 2018.

	pH	cmol (+)/L					%		mg/L				
Profundidad	H ₂ O	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn	
0-20 cm	5,4	0,19	8,2	4,6	0,4	13,4	1,4	1,0	1,5	33	288	37	

CICE = Capacidad de intercambio de cationes efectiva = Acidez + Ca + Mg + K

SA = Porcentaje de saturación de acidez = (Acidez/CICE)*100

Recolección de excretas

Las excretas sólidas provinieron de novillos Brahman de dos años de edad y un peso promedio aproximado de 280 kg, que pastoreaban *Brachiaria brizantha* cv Marandú sin fertilizar y con 45 días de rebrote; durante la época seca recibieron silopacas de la misma gramínea, pero con más de 60 días de rebrote. En ningún caso se les proporcionó suplemento.

Los novillos se introdujeron a un galpón donde la orina fue recolectada directamente de los mismos al momento de la micción, mientras que las heces fueron recogidas del suelo inmediatamente después de su deposición. La recolección de ambas excretas se realizó desde las 6 a.m. y hasta las 9 a.m., momento a partir del cual se trasladaron y depositaron en el sitio de la evaluación.

Diseño experimental y tratamientos

Se establecieron cuatro experimentos, uno en cada condición climática que se presenta a lo largo

del año. El primero se estableció durante la época seca, el segundo se implementó durante la transición de la época seca a la lluviosa. El tercero se efectuó en la época lluviosa, y finalmente el cuarto se desarrolló durante la transición de la condición lluviosa a la seca. En los cuatro experimentos las evaluaciones se realizaron durante 30 días a partir del momento que se aplicaron las excretas.

En todos los experimentos se evaluaron tres tratamientos (aplicación de orina, excretas sólidas, y testigo sin la adición de excretas), cada uno con cinco repeticiones.

El peso de las excretas sólidas y el volumen de la orina utilizados en cada una de las evaluaciones (Cuadro 2) fue el equivalente a un evento de deposición promedio (Mori y Hojito 2015) en cada una de las épocas climáticas; este se calculó con base en los pesos o volúmenes individuales de cada deposición determinados durante dos días, lo cual se realizó con anterioridad al inicio de los experimentos.

Cuadro 2. Concentración de nitrógeno en la orina y excretas sólidas, volumen y cantidad aplicada de cada uno de ellos según época climática. Atenas, Costa Rica, 2018.

Orina		Excretas sólidas			
Época climática	Concentración de N (%)	Volumen aplicado, ml	Concentración de N (%)	Cantidad aplicada, kg	Materia seca, %
Transición época seca a lluviosa	2,03	300	1,42	1,85	20,9
Lluviosa	0,61	565	1,69	1,29	15,4
Transición época lluviosa a seca	1,33	385	1,80	1,32	15,9
Seca	0,53	350	1,46	2,01	24,2

Las excretas se depositaron de manera que no sobresalieran el área cubierta por la cámara estática, la cual de 30 cm de alto y circunferencia de 94,2 cm, provista de un septum por donde se recolectó la muestra gaseosa.

Debido a que el cambio en el contenido de humedad del suelo es parte de la perturbación normal causada por la orina, en el tratamiento control no hubo aplicación alguna de líquido (Orwin *et al.* 2010) para mantener el contenido de humedad inalterado y reflejando la condición normal de la época climática.

El ganado no pastoreó el sitio donde se ubicaron los experimentos al menos desde dos meses antes del inicio de la primera evaluación. Esta área nunca recibió fertilización.

Previo a la aplicación de los tratamientos, y al inicio de cada ciclo de evaluación, se cortaron a 5 cm del suelo las gramíneas en los lugares donde se ubicaron las cámaras estáticas.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron de acuerdo con un diseño de parcelas divididas donde la parcela grande sería la época climática, y las parcelas pequeñas los tratamientos. Para determinar la diferencia entre medias, se utilizó Tukey con un nivel de 0,05 en InfoStat (DiRienzo *et al.* 2018).

Muestreo de gases

En cada uno de los experimentos realizados, el primer muestreo de gas se realizó el mismo día que se aplicaron los tratamientos y se recolectaron muestras gaseosas diariamente durante la primera semana del experimento, tres veces la segunda semana, dos veces la tercera semana, y luego una vez por semana hasta completar el período de evaluación. Todos los muestreos de gas se realizaron entre las 9 y las 11 a.m.

Cada día de muestreo se recolectó una muestra de gas inmediatamente después de colocar la cámara (45 cm diámetro, 30 cm alto) en

el campo (t_0) y otra después de 45 minutos (t_1) (Luo *et al.* 2011; Berneze *et al.* 2014; Bell *et al.* 2015), en ambos casos se utilizó una jeringa de polipropileno de 20 ml y se trasvasó de inmediato a un vial de vidrio al vacío previamente identificado.

Las muestras gaseosas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), utilizando un cromatógrafo de gases Agilent (modelo 7890A; Santa Clara, CA, Estados Unidos) equipado con dos detectores: ionización de llama y captura de electrones.

La concentración de N_2O y de CH_4 en las muestras gaseosas se determinó por interpolación a partir de curvas de calibración construidas con estándares de concentración conocida y trazable a NIST (Scott-Marrin, Inc., Ca.); como control de calidad se utilizaron muestras estándar las cuales se analizaron intercaladamente con las muestras provenientes del campo.

Cálculo del factor de emisión

El factor de emisión de N_2O-N , para cada época climática, se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación (Sordi *et al.* 2014):

Ec. 1

$$FE (\%) = \frac{(N_2O-N_{\text{emitido}}) - (N_2O-N_{\text{control}})}{N_{\text{aplicado}}} \times 100$$

Donde FE (%) es el factor de emisión (porcentaje del N aplicado en la orina o excreta sólida y emitido como N_2O-N), N_2O-N_{emitido} es la emisión de N_2O-N proveniente de la orina o excreta sólida (g), N_2O-N_{control} es la emisión de N_2O-N determinada en el tratamiento control (g), y N_{aplicado} es la cantidad de N aplicado con la orina o excreta sólida (g).

La cantidad de N aplicado se calculó multiplicando el peso seco de la excreta sólida por el contenido total de N; en el caso de la orina se obtuvo la cantidad de N aplicado multiplicando el volumen de orina por su concentración.

El metano producido, en $kg \text{ cabeza}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ec. 2

$$\text{CH}_4 = 365 * \frac{\text{kg PSE}}{\text{día}} \times \frac{\text{g CH}_4}{\text{kg PSE}}$$

donde CH_4 es la emisión anual (kg^{-1} cab), 365 es el total de días del año, PSE es el peso seco de las excretas diarias y, g CH_4 es la cantidad de metano emitida por cada kilo de materia seca de excretas. Para esta evaluación se asumió que la cantidad de excretas sólidas diarias representa aproximadamente el 4% del peso vivo del novillo (Pelster *et al.* 2016).

Otras determinaciones

El peso seco de las excretas sólidas se determinó secando submuestras de este sustrato en un horno de aire forzado a 60°C hasta peso constante, y la concentración total de N tanto de este material como de la orina se determinó mediante la técnica de micro Kjeldhal.

Muestras de suelo se recolectaron una vez por semana cerca de cada cámara de donde

se recolectaban las muestras gaseosas, y se determinó el contenido de agua por gravimetría. Este valor se utilizó de manera conjunta con la densidad aparente del suelo donde se realizaron los experimentos, para calcular el espacio poroso lleno de agua (EPA) del suelo.

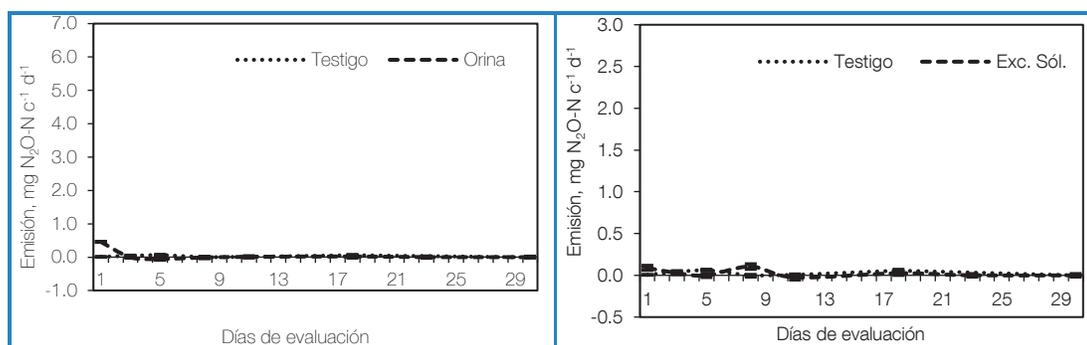
El EPA utiliza una escala de 0% (suelo completamente seco) a 100% (suelo sobre saturado de agua), en el cual entre 30% (punto de marchitez permanente) y 60% (capacidad de campo) se encuentra el agua disponible para las plantas, condición que se asocia con adecuados contenidos de humedad y oxígeno para la actividad microbiana del suelo.

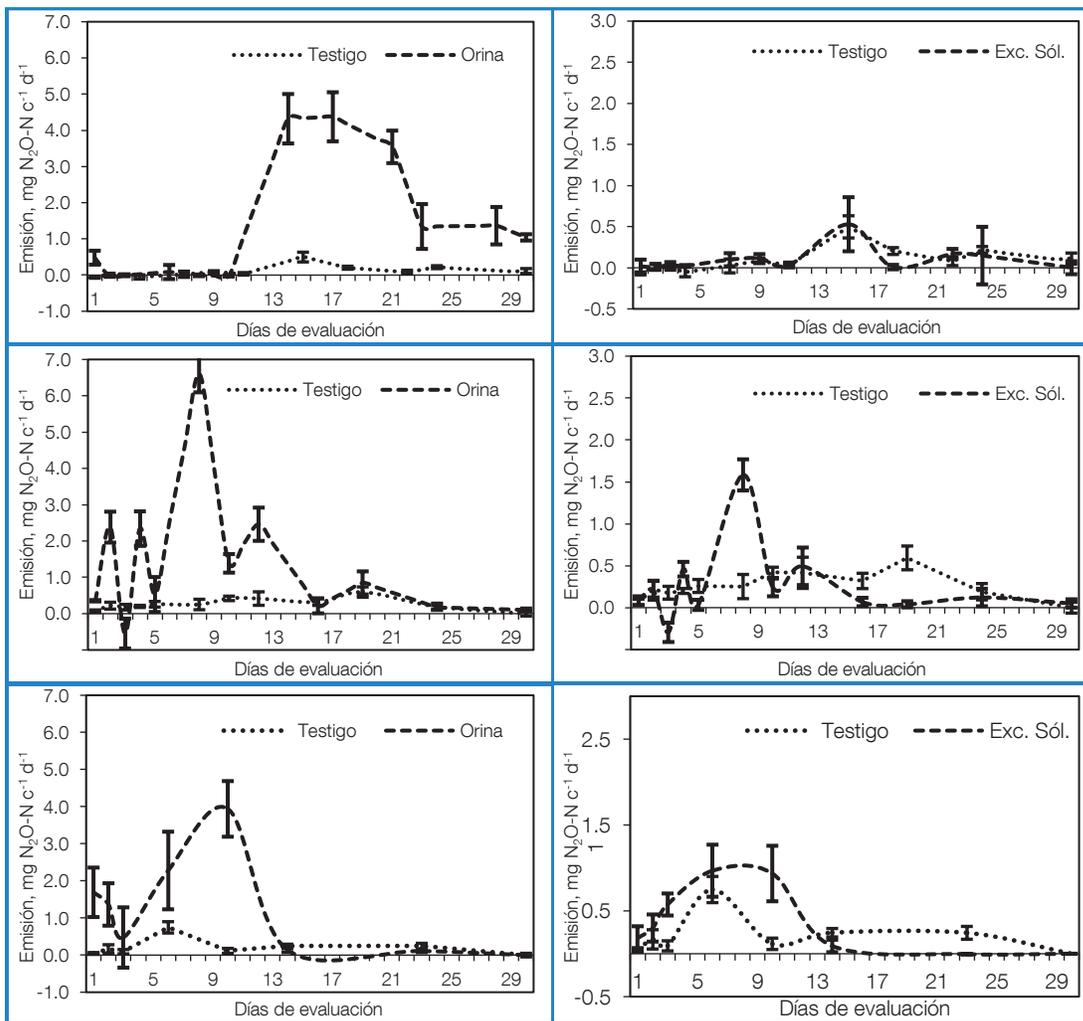
La temperatura del suelo en los primeros 10 cm de profundidad fue registrada cada día de muestreo de gases, para ello se utilizó un termómetro digital que se colocó a la par de cada cámara estática.

Los datos de la precipitación se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la misma finca de la UTN, a menos de un kilómetro de distancia del sitio experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN**Emisión de óxido nítrico**

El patrón de emisión del óxido nítrico en cada uno de los dos sustratos evaluados varió tanto dentro como entre épocas climáticas (Figura 1). La variación observada fue mínima durante la evaluación realizada en la época seca, inclusive negativa para las excretas sólidas en algunas de las determinaciones efectuadas. La emisión del tratamiento testigo durante esta época fue similar a la de los dos sustratos evaluados.





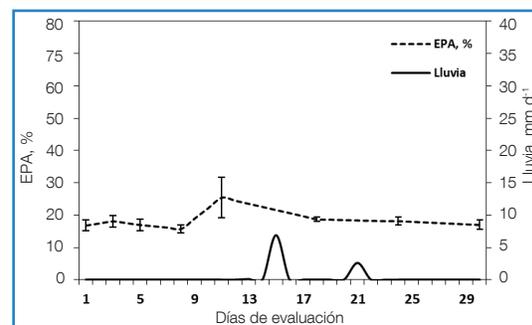
Promedio \pm 1 error estándar (EE); Época climática: Seca=A, E; Transición a lluvia=B, F; Lluviosa=C, G; Transición seca=D, H.

Figura 1. Flujo diario de N_2O-N proveniente de la orina y excretas sólidas de bovinos en diferentes épocas climáticas, Atenas, Costa Rica, 2018.

Las mayores fluctuaciones y con episodios de emisión más elevados se determinaron durante la época lluviosa, y valores intermedios para la transición tanto a la época lluviosa como a la seca (Figura 1). Para esas épocas, el tratamiento testigo mostró una tendencia similar a los sustratos evaluados, pero con inferior magnitud, salvo a partir de la tercera semana de evaluación para las excretas sólidas durante la estación lluviosa y de transición a la época seca.

Relación con la humedad del suelo

La cantidad y distribución de la lluvia afectó la humedad del suelo, referida como espacio poroso lleno de agua (EPA, %; Figura 2).



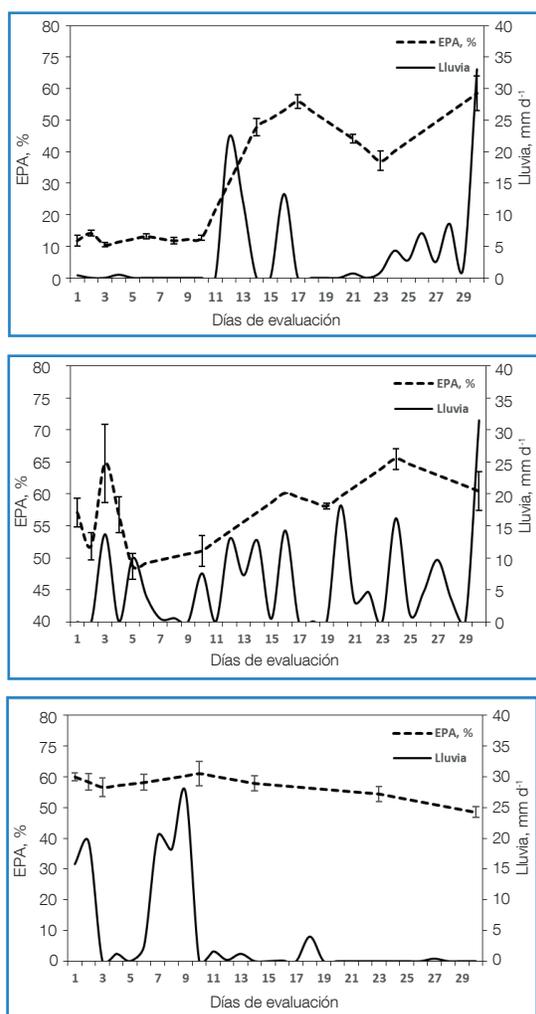


Figura 2. Lluvia diaria y espacio poroso lleno de agua, EPA %, durante diferentes épocas climáticas. Atenas, Costa Rica, 2018.

La lluvia acumulada durante los períodos evaluados y correspondientes a las diferentes épocas climáticas fue, tal y como se esperaba, mayor durante la época lluviosa (177,5 mm), similar en las épocas de transición a lluvias y a la seca (110,3 y 112,5 mm respectivamente), y casi nula para la época seca (7,0 mm); ello influyó en la humedad del suelo.

Los valores de EPA fueron bajos durante la época seca, cuando la lluvia fue mínima, incrementándose los valores con el inicio de las lluvias (época de transición) a valores cercanos a 60%, para disminuir posteriormente en la transición a la época seca.

Este patrón general observado en la humedad del suelo es similar al determinado con la emisión del óxido nítrico (Figura 1). De hecho, cuando se

consideró la emisión del óxido nítrico proveniente de la orina, el análisis de correlación mostró significancia ($P < 0,0001$) entre ambas variables en cada una de las diferentes épocas climáticas excepto para la época seca.

Para las transiciones de la época seca a la lluviosa y de la lluviosa a la seca, ambas correlaciones mostraron claramente la influencia de la humedad del suelo en los niveles de emisión, siendo la relación lineal y positiva.

La emisión de las excretas sólidas no mostró relación alguna con la humedad del suelo. Probablemente el hecho de que este sustrato quede sobre el suelo hace que la humedad de este no ejerza influencia en la generación y liberación del gas determinado.

Por otra parte, la temperatura ambiente fue relativamente alta, siendo el promedio diario similar y ligeramente mayor en la época seca ($27,9 \pm 0,24^\circ\text{C}$) y de transición al período lluvioso ($27,2 \pm 0,22^\circ\text{C}$) con respecto a la época lluviosa ($25,2 \pm 0,14^\circ\text{C}$) y de transición a la seca ($25,5 \pm 0,21^\circ\text{C}$). Esta condición cálida pudo causar el secado rápido de las excretas y con ello reducir la liberación del gas por la formación de una concha gruesa y dura en las excretas sólidas.

Una situación similar pudo causar la temperatura del suelo, ya que los valores obtenidos mostraron que durante la época seca y de transición a la lluviosa ($31,6 \pm 0,6$ y $31,4 \pm 0,4^\circ\text{C}$ respectivamente) esta fue superior a la observada durante la época lluviosa y de transición a la seca ($28,4 \pm 0,7$ y $28,6 \pm 0,6^\circ\text{C}$ respectivamente).

Emisión acumulada y factor de emisión

La emisión acumulada de óxido nítrico mostró diferencias entre épocas ($P < 0,0421$), tratamientos ($P < 0,0001$), así como interacción entre época y tratamiento ($P < 0,041$).

Los menores valores de emisión para la orina se determinaron en la época seca, intermedios en la época lluviosa y de transición a la seca, mientras que los más altos se detectaron durante la transición a la lluviosa (Cuadro 3).

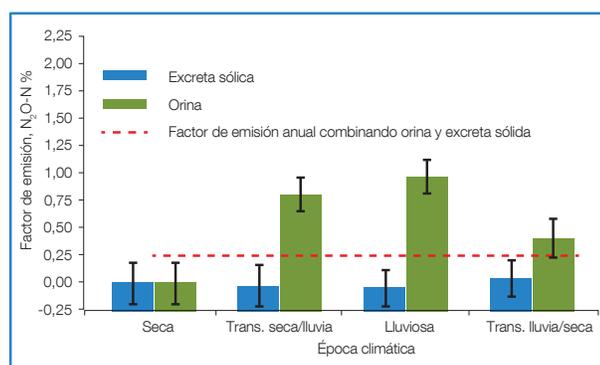
Cuadro 3. Emisión neta acumulada de N₂O-N, mg⁻¹ cámara, proveniente de orina y excretas sólidas de bovinos según época climática. Atenas, Costa Rica, 2018.

Época climática	Emisión en 30 días, mg/cámara	
	Orina	Excretas sólidas
Seca	0,04±0,10 ^{bc}	0,05±0,13 ^{bc}
Transición seca/lluvia	44,91± 7,66 ^a	-1,20±0,66 ^{bc}
Lluviosa	31,12±10,05 ^{ab}	-1,27±0,02 ^{bc}
Transición lluvia/seca	19,35±2,08 ^{ab}	1,16±1,56 ^{bc}
FE, promedio anual %	0,53±0,18^A	-0,06±0,10^B

En el caso de las excretas sólidas la emisión fue similar entre épocas climáticas, pero se observó tendencia a mayores valores de emisión durante la transición a la época seca (Cuadro 3).

En cuanto al factor de emisión (FE) se refiere, este fue mayor ($P < 0,0020$) para la orina con respecto a aquel de las excretas sólidas (Cuadro 3), mostrándose claramente el efecto de la lluvia/humedad del suelo en los FE (Figura 3), ya que los valores son mayores en cualquier época donde se presenta la lluvia. Esto demuestra la importancia de considerar las condiciones climáticas cambiantes a lo largo del año cuando se desarrolla en el trópico un factor de emisión.

Figura 3. Factor de emisión para el N₂O-N según tipo de excreta (sólida o líquida) y época climática. Atenas, Costa Rica. 2018.



Promedios ± 1 EE

El factor de emisión determinado en la orina fue mayor que para las excretas sólidas, situación que ha sido reportada en diferentes trabajos de investigación (van der Weerde *et al.* 2011; Sordi

et al. 2014; Pelster *et al.* 2016). Esto podría ser el resultado de que el N de la orina es más fácilmente disponible que el de las excretas sólidas (van der Weerde *et al.* 2011; Hoefft *et al.* 2012) y luego de la hidrólisis de la urea contenido en la orina puede ser transformado en NH₄⁺, nitrificado a NO₃⁻, el cual mediante denitrificación es transformado en N₂O (Orwin *et al.* 2010).

Por otra parte y con respecto a las excretas sólidas, el hecho de que estas queden sobre la superficie del suelo y expuestas a las condiciones ambientales cálidas (entre 25 y 28°C) se favorece la rápida formación de una capa exterior seca y dura que probablemente reduce de manera significativa la salida de este gas de las excretas al ambiente, condición observada y reportada por Mori y Hojito (2015). En consecuencia, ello se refleja en los bajos valores de emisión determinados.

También hay que considerar que posiblemente y dada la calidad de los forrajes del trópico con respecto a los de otros climas, parte del nitrógeno excretado esté ligado a taninos y paredes celulares, lo cual lo hace indigerible y poco disponible para ser mineralizado por los microorganismos. Esto reduce considerablemente la posibilidad de formación y liberación del óxido nitroso.

Los factores de emisión del N₂O-N determinados (0,02 a 0,59%) fueron similares a los reportados para Nueva Zelanda (van der Weerde *et al.* 2011) y Brasil (Sordi *et al.* 2014; Mazzeto 2014), así como en Colombia (Byrnes *et al.* 2017), Kenia (Pelster *et al.* 2016) y en Europa (Krol *et al.* 2016; Bell *et al.* 2015), y mostraron la misma tendencia: menores al valor sugerido por el IPCC (2006).

Una consideración importante a tener en cuenta cuando se desarrolla un factor de emisión en el trópico, es el de incluir en la evaluación las variables climáticas, especialmente la lluvia que presenta condiciones contrastantes a lo largo del año. Diferente nivel de emisión, relacionado con la humedad del suelo, como lo determinado en las cuatro épocas climáticas que se presentan en Costa Rica demuestran no solo la importancia de considerarlas, sino también que es posible reducir con ello la incertidumbre asociada cuando se estima la emisión anual.

Lo anterior es apoyado por Davidson *et al.* (2000) quien señaló que en el trópico la humedad del suelo, más que la temperatura, es el factor determinante para la generación y emisión de este gas, ya que según Eckard *et al.* (2003) y Gao *et al.* (2014), cuando la EPA es menor de 40% se desfavorece la formación del N_2O-N .

Esto se pudo observar claramente en la transición de la época seca a la lluviosa, ya que con el inicio de las lluvias se incrementó la emisión de N_2O-N debido a que el aumento de agua en el suelo no solo redujo el oxígeno disponible, sino que también estimuló la actividad microbial del mismo. La precipitación después de largos períodos secos causa el efecto pulsante o Birch (Birch 1958) en el cual las emisiones se incrementan después del inicio de la precipitación y vuelven a niveles bajos en pocos días (Sponseller 2007). Esto es impulsado por la mineralización renovada y la disponibilidad de N fácilmente descomponible (Borken y Matzner 2009). Este efecto disminuye cuando se regulan las lluvias y se presentan frecuencias de período corto de ciclos secos y húmedos (Borken y Matzner 2009).

Esto se encuentra directamente relacionado con el contenido de humedad del suelo (EPA) el cual ha sido catalogado como uno de los principales factores de la emisión de este gas (Davidson *et al.* 2000). De esta forma se explican las menores emisiones detectadas en la época seca cuando el suelo contiene mínima cantidad de agua. Sin embargo, cuando el EPA se aproxima o supera el 60%, la emisión también disminuyó probablemente porque las condiciones de suelo no favorecen la denitrificación y con ello disminuye la generación de este gas nitrogenado.

Emisión de metano

El patrón de emisión para el CH_4-C mostró que los flujos variaron tanto con el tipo de excreta como con la época climática. En el caso de las excretas sólidas, el patrón fue similar para todas las épocas dado que la emisión se presentó durante la primera semana de evaluación, aunque

los mayores valores se registraron durante la época lluviosa y de transición a la seca (Figura 4).

En el caso de la evaluación realizada durante el período seco (Figura 4A), una fracción del tiempo mostró tener valores negativos lo cual es un indicador de que durante ese tiempo el suelo fue sumidero de CH_4-C . Similar condición también se determinó durante las evaluaciones realizadas en las épocas de transición (Figuras 4B y 4D).

En cuanto a la emisión proveniente de la orina, esta fue menor que la de las excretas sólidas, con valores cercanos a cero (Figuras 4E, G, H), con la excepción de la determinada con el inicio de las lluvias en el período de transición (Figura 4F y Figura 2B) cuando se observó un incremento importante de la emisión.

Este efecto no se observó con las excretas sólidas, probablemente la temperatura ambiente promedio ($27,2^{\circ}C$) contribuyó a que se secara rápidamente y formara una capa exterior dura y sólida que impidió filtración de gas y consecuentemente la emisión fue baja (Figura 4B).

Emisión acumulada y factor de emisión

La emisión de CH_4-C mostró diferencias ($P<0,0031$) entre el tipo de excreta y época climática. Los mayores valores fueron detectados en las excretas sólidas durante la transición a la época seca (Cuadro 4); los menores y similares valores en las restantes épocas.

En el caso de la orina no hubo diferencias en los niveles de emisión entre épocas climáticas, sin embargo presentó tendencia a mostrar menores valores en la época seca y mayores durante la transición a la época (Cuadro 4).

Con respecto al factor de emisión (FE), este fue diferente ($P<0,0171$) entre excretas, siendo mayor para las sólidas (Cuadro 4). El FE anual para ambas excretas fue de $306,4\pm 35,6$ g de CH_4-C por animal por año, el cual es inferior al sugerido por el IPCC.

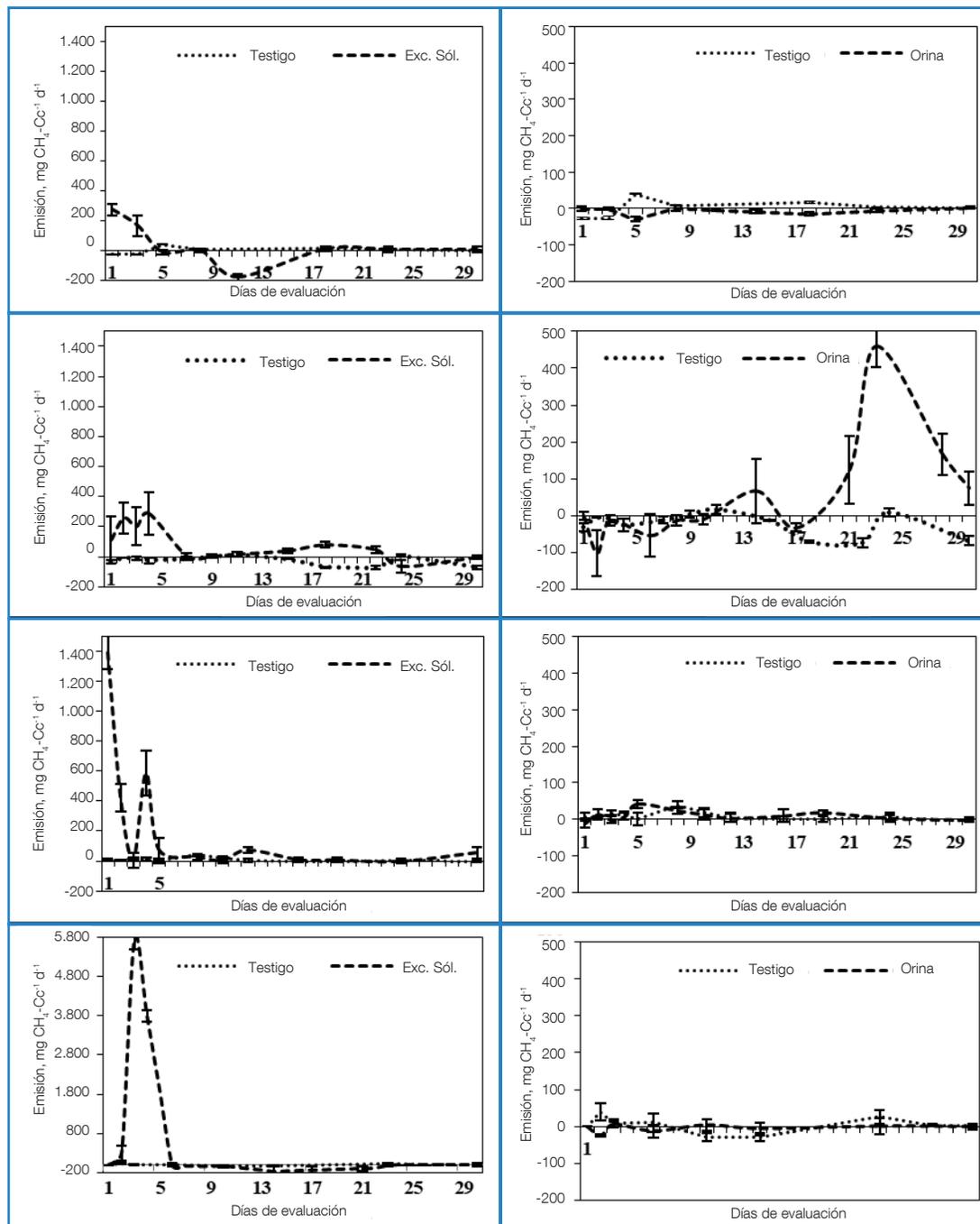


Figura 4. Flujo diario de $\text{CH}_4\text{-C}$ proveniente de excretas sólidas y orina de bovinos según época climática. Atenas, Costa Rica, 2018.

La cantidad de metano determinada en esta investigación mostró ser similar a lo informado por diversos investigadores en diferentes partes del mundo: Brasil (Mazzetto 2014), Kenia (Pelster *et al.* 2016), México (González-Avalos 2001), quienes de manera conjunta coinciden en el hecho de que la emisión de metano proveniente de las excretas bovinas es inferior al valor sugerido por el IPCC (2006).

Cuadro 4. Emisión neta acumulada de CH₄-C, mg⁻¹ cámara, proveniente de excretas sólidas y orina de bovinos según época climática. Atenas, Costa Rica, 2018.

Época climática	Emisión en 30 días, mg cámara ⁻¹	
	Excretas sólidas	Orina
Seca	-0,36±0,66 ^b	-0,41±0,15 ^b
Transición seca/lluvia	1,95±0,33 ^b	3,33±1,85 ^b
Lluviosa	2,55±0,98 ^b	0,42±0,27 ^b
Transición lluvia/seca	12,49±4,77 ^a	0,47±0,48 ^b
FE, anual g	270,5±62,2^A	35,9±16,6^B

Uno de los factores que está directamente relacionado con estos resultados es la temperatura ambiental. La formación de una corteza superficial dura a medida que se seca la excreta como resultado de la temperatura tanto del suelo como ambiente, ocurre rápidamente y reduce las condiciones para que se libere el gas, resultando en menores valores de metano (Nichols *et al.* 2016).

Por lo anterior, es que la emisión se presenta básicamente durante la primera semana de evaluación para posteriormente situarse en valores basales y cercanos a cero (Yamulki *et al.* 1999).

Factores ambientales como la lluvia contribuyen a la emisión de metano, tal y como se detectó durante la época de transición donde se observó que luego de eventos lluviosos (Figura 2B) se presentan picos de emisión (Figura 4B) probablemente debido a la humedad (Mori y Hojito 2015) que además de incrementar la actividad microbiana, también provocó algún tipo de rotura en la capa externa que hizo posible la liberación del gas.

Por otra parte, se observaron consumos de metano durante la época seca y de transición a lluvias (Figuras 4A y 4E) cuando los valores de EPA eran menores al 20%, lo cual ha sido reportado también por otros investigadores (Nichols *et al.* 2016).

Diferencias en la emisión de metano entre épocas climáticas se relacionan más con la humedad, lluvia en este caso, que con la temperatura la cual fue similar y bastante alta en todas las épocas evaluadas (de 25 a 29°C).

En general, en el caso de las excretas sólidas la emisión de metano se presentó durante la

primera semana en todas las épocas climáticas. Un aspecto interesante es que con la excepción de la emisión observada en el día 1 en la época lluviosa, esta se presenta después de un evento lluvioso importante. Ello se aprecia claramente en esta misma época con la emisión que se presentó en el día cuatro de evaluación (Figura 4 C) que ocurrió luego de un evento de lluvia de más de 15 mm (Figura 2 C).

De igual forma sucedió en la época de transición a la condición seca, donde previo al pico de emisión de metano observado (Figura 4 D) se presentó un evento lluvioso de más de 20 mm (Figura 2 D).

Los dos días previos a esta emisión también había llovido un total de 27 mm, lo cual probablemente favoreció condiciones de gran humedad y anoxia en la excreta y ello contribuyó a la formación y posterior liberación del gas, algo que también ha sido previamente reportado en el trópico por Mazzetto (2014). La influencia de las lluvias en la generación de este gas de la orina no fue significativa.

Esta investigación demuestra que el desarrollo de factores de emisión nacional es de suma importancia ya que permite calcular la emisión de gases con efecto invernadero que se derivan de las excretas de bovinos de acuerdo con las condiciones de nutrición de estos y del manejo de las pasturas. Se evidencia que las condiciones climáticas ejercen influencia significativa en la emisión, y por lo tanto, deben ser consideradas para evitar la sobre o subestimación del factor de emisión dependiendo de cuando se realicen las evaluaciones en el campo.

Por otra parte, es evidente que la utilización del valor sugerido por el IPCC conduce a sobreestimar las emisiones provenientes de las excretas bovinas en Costa Rica, y estos resultados sugieren que, deben ser revisados los cálculos que se efectúan utilizando las directrices del IPCC.

Finalmente, se requiere continuar con este tipo de investigación para corroborar y generar factores de emisión de estas fuentes tanto para el sistema de producción de leche especializado, como también para el doble propósito, ya que además de diferentes manejos se ubican en ambientes y condiciones climáticas diferentes.

LITERATURA CITADA

- Barneze, A; Mazzetto, A; Zani C; Misselbrook, T; Cerri, C. 2014. Nitrous oxide emissions from soil due to urine deposition by grazing cattle in Brazil. *Atmospheric Environment* 92:394-397.
- Bell, M; Rees, R; Cloy, J; Topp, C; Bagnall, A; Chadwick, R. 2015. Nitrous oxide emissions from cattle excreta applied to a Scottish grassland: Effects of soil and climatic conditions and a nitrification inhibitor. *Science of the Total Environment* 508:343-353.
- Barneze, A; Mazzetto, A; Fernandes, C; Siqueira, M; Cerri, C. 2014. N₂O emission from urine in the soil in the beef production in Southeast Brazil: soil moisture content and temperature effects. *Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-15098*.
- Birch, H. 1959. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil* 10:9-31.
- Borken, W; Matzner, E. 2009. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology* 15(4):808-824.
- Byrnes, R; Núñez, J; Arenas, L; Rao, I; Trujillo, C; Alvarez, C; Arango, J; Rasche, F; Chirinda, N. 2017. Biological nitrification inhibition by *Brachiaria* grasses mitigates soil nitrous oxide emissions from bovine urine patches. *Soil Biology & Biochemistry* 107:156-163.
- Davidson, E; Verchot, L; Cattanio, J; Ackerman, I. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48(1):53-69.
- de Klein, C; Barton, L; Sherlock, R; Li, Z; Littlejohn, R. 2003. Estimating a nitrous oxide emission factor for animal urine from some New Zealand pastoral soils. *Australian Journal of Soil Research* 41:381-399.
- Department of Climate Change and Energy Efficiency, Australia. 2014. *Australian National Greenhouse Accounts: National Inventory Report 2012*. 39 p.
- Di, H; Cameron, K; Podolyan, A; Robinson, A. 2014. Effect of soil moisture status and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, on ammonia oxidizer and denitrifier growth and nitrous oxide emissions in a grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry* 73:59-68.
- Di, H; Cameron, K. 2002. The use of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), to decrease nitrate leaching and nitrous oxide emissions in a simulated grazed and irrigated grassland. *Soil Use and Management* 18:395-403.
- Dijkstra, J; Oenema, O; Bannink, A. 2011. Dietary strategies to reducing N excretion from cattle: Implications for methane emissions. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3:414-422.
- DiRienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. 2018. *InfoStat versión 2018*, Grupo InfoStat, FCA. Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba.
- Eckard, R; Chen, D; White, R; Chapman, D. 2003. Gaseous nitrogen loss from temperate grass and clover dairy pastures in south eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 54(6):561-570.
- Gao, B; Ju, X; Su, F; Meng, Q; Oenema, O; Christie, P; Chen, X; Zhang, F. 2014. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of the Total Environment* 472:112-124.
- González-Avalos, E; Ruiz-Suárez, L. 2001. Methane emission factors from cattle manure in Mexico. *Bioresource Technology* 80:63-71.
- Haynes, R; Williams, P. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy* 49:119-199.
- Hoefl, I; Steude, K; Wrage, N; Veldkamp, E. 2012. Response of nitrogen oxide emissions to grazer species and plant species composition in temperate agricultural grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 151:34-43.
- IPCC. 2006. *Guías metodológicas para la preparación de Inventarios Nacionales de gases con efecto invernadero*. 265 p.

- Kelliher, F; Cox, N; van der Weerden, T; de Klein, C; Luo, J; Cameron, K; Di, H; Giltrap, D; Rys, G. 2014. Statistical analysis of nitrous oxide emissions factors from pastoral agricultural field trials conducted in New Zealand. *Environmental Pollution Journal* 186:63-66.
- Krol, D; Carolan, R; Minet, E; McGeough, K; Watson, C; Forrester, P; Lanigan, G; Richards, K. 2016. Improving and disaggregating N₂O emission factors for ruminant excreta on temperate pasture soils. *Science of the Total Environment* 568:327-338.
- Luo, J; Hoogendoorn, C; van der Weerden, T; Saggar, S; de Klein, C; Giltrap, D; Rollo, M; Ry, G. 2013. Nitrous oxide emissions from grazed hill land in New Zealand. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181:58-68.
- Luo, J; van der Weerden, T; Hoogendoorn, C; de Klein, C. 2011. Determination of the N₂O emission factor for animal dung applied in spring in three regions of New Zealand. MAF Technical Paper No: 2011/30.
- Mazzeto, A. 2014. Emissao de gases do efeito estufa provenientes da producao de carne no Brasil: de datos experimentais a modelagem matemático. Tesis Ph.D. Sao Paulo, Brasil. University of Sao Paulo. 95 p.
- Mori, A; Hojito, M. 2015. Methane and nitrous oxide emissions due to excreta returns from grazing cattle in Nasu, Japan. *Grassland Science* 61(2):109-120.
- Nichols K; Del Grosso S; Derner J; Follett R; Archibeque S; Stewart C; Paustian H. 2016. Nitrous oxide and methane fluxes from cattle excrement on C3 pasture and C4-dominated shortgrass steppe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 225:104-115.
- NOAA. 2018. <http://www.noaa.gov/climate>
- New Zealand. 2012. New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2010. Ministry for the Environment, Wellington, Nueva Zelanda. 408 p.
- Oenema, O; Wrage, N; Velthof, G; van Groenigen, J; Dolfing, J; Kuikman, P. 2005. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(1):51-65.
- Oenema, O; Velthof, G; Yamulki, S; Jarvis S. 1997. Nitrous oxide emissions from grazed grassland. *Soil Use Management* 13:288-295.
- Orwin, K; Bertram, J; Clough, T; Condon, L; Sherlock, R; O'Callaghan, M; Ray, J; Baird, D. 2010. Impact of bovine urine deposition on soil microbial activity, biomass, and community structure. *Applied Soil Ecology* 44:89-100.
- Pelster, D; Gisore, B; Koske, J; Goopy, J; Korir, D; Rufino, M; Butterbach-Bahl, K. 2016. Methane and nitrous oxide emissions from cattle excreta on an East African grassland. *Journal of Environmental Quality* 45(5):1531-1539.
- Rochette, P; Chantigny, M; Ziadi, N; Angers, D; Bélanger, G; Charbonneau, É; Pellerin, D; Liang, C; Bertrand, N. 2014. Soil nitrous oxide emissions after deposition of dairy cow excreta in eastern Canada. *Journal of Environmental Quality* 43:829-841.
- Rotz, C. 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science* 82(E-Suppl):E119-E137.
- Saggar, S; Jha, N; Deslippe, J; Bolan, N; Luo, J; Giltrap, D; Kim, D; Zaman, M; Tillman, R. 2013. Denitrification and N₂O:N₂ production in temperate grasslands: processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of the Total Environment* 465:173-195.
- Saggar, S; Luo, J; Kim, D; Jha, N. 2011. Intensification in pastoral farming: impacts on soil attributes and gaseous emissions. *In Soil Health and Climate Change. Soil Biology* (29, 2011, Heidelberg, Alemania). Singh B, Cowie A; Chan K (eds.) Berlin, Alemania. pp. 252-261.
- Schlecht, E; Hiernaux, P; Kadaouré, I; Hülsebusch, C; Mahler, F. 2006. A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behavior of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113:226-242.
- Sordi, A; Dieckow, J; Bayer, C; Amaral, M; Thiago, J; Acordi, J; Moraes, A. 2014. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190:94-103.

Sponseller, R. 2007. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology* 13:426-436.

van der Weerden, T; Luo, J; de Klein, C; Hoogendoorn, C; Littlejohn, R; Rys, G. 2011. Disaggregating nitrous oxide emission factors for ruminant urine and dung deposited onto pastoral soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141:426-436.

Williams, P; Haynes, R. 2000. Transformations and plant uptake of urine N and S in long and short-term pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56:109-116.

Yamulki, S; Jarvis, S; Owen P. 1999. Methane emission and uptake from soils as influenced by excreta deposition from grazing animals. *Journal of Environmental Quality* 28:676-682.