

MOMENTO ÓPTIMO DEL DÍA PARA MUESTREAR ÓXIDO NITROSO EN EL TRÓPICO MUY HÚMEDO DE COSTA RICA

Francisco Arguedas-Acuña¹; Jorge Jiménez-Araya²; Sergio Abarca-Monge¹

RESUMEN

Momento óptimo del día para muestrear óxido nitroso en el trópico muy húmedo de Costa Rica.

El objetivo del estudio fue cuantificar el patrón diario de emisiones de óxido nitroso (N₂O) en una pastura de *Brachiaria* híbrido cv Cayman, en condiciones de pastoreo, en la Estación Experimental Los Diamantes (Guápiles, Costa Rica). Las mediciones se realizaron en setiembre del 2015 con 8 cámaras estáticas, durante 6 días, con muestreos repetitivos cada dos horas (7), distribuidos entre las 6 y las 18 horas. La emisión de N₂O presentó una distribución sesgada a la derecha con una media de $0,12 \pm 0,17$, equivalente a $10,62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y una mediana de $0,06 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. El patrón de emisión de N₂O a lo largo del día fue heterogéneo con valores entre 0,09 a $0,17 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2}$. La emisión de N₂O, se analizó mediante un modelo lineal mixto asumiendo una distribución Lognormal. Los promedios por hora mostraron un patrón no lineal, con un ligero descenso entre las 6 y 8 horas, seguido de una tendencia ascendente hasta las 16 horas, para volver a disminuir hasta las 18 horas. Las mayores emisiones por hora fueron de 0,06 (14 horas) y de 0,07 (16 horas) $\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; que difirieron significativamente ($p < 0,05$) con respecto a las horas de la mañana (de las 6 a las 10 horas). También hubo una variación significativa en los patrones de emisión en tiempo de diferentes días y cámaras. Se concluyó que para el sitio evaluado, no hay un tiempo único de mayor emisión de N₂O. Esto sugiere que, para fines prácticos, se puede usar un rango de medición de emisiones entre las 10 y las 16 horas.

Palabras clave: Gases Efecto Invernadero, Óxido Nitroso, Pastoreo Bovinos, Pastos, Trópico muy Húmedo.

La investigación, se enmarcó dentro del proyecto denominado “Desarrollando sistemas de producción ganaderos competitivos con bajas emisiones de gases de efecto invernadero en América Central”, financiado por FONTAGRO-Nueva Zelanda y liderado para Centroamérica por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) (CATIE 2015).

- 1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Edafólogo Investigador en Cambio Climático farguedas@inta.go.cr, Coordinador Cambio Climático sabarca@inta.go.cr.
- 2 Universidad Nacional, Escuela de Medicina Veterinaria. Estudiante de Posgrado Producción Animal. jmnzaraya@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la ganadería de carne representa el rubro económico más importante del sector agropecuario. Se considera una actividad estratégica por su condición de proveedora de alimentos básicos para la población. Además, ocupa una gran parte del recurso tierra, ya que el 69 % de las áreas de suelo agropecuario se encuentran bajo pasturas permanentes (Holmann *et al.* 2007).

Según datos del Censo Agropecuario Nacional (INEC 2015), en nuestro país se registran 1 278 817 millones de cabezas vacunos, de las cuales el 42,1 % están dedicadas a la producción de carne y 32,0 % al doble propósito. Asimismo, un 43,4 % del territorio nacional, corresponde a pasturas.

A nivel mundial, el sector pecuario representa una fuente significativa de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), al generar dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nítrico (N₂O) a lo largo del proceso productivo. El ganado contribuye con el cambio climático al emitir GEI, sea directamente, por ejemplo a través de la fermentación entérica o el estiércol; o indirectamente a través de las actividades desarrolladas para la producción de granos, necesarios para elaborar los piensos y la conversión de bosques en pastizales (Steinfeld *et al.* 2009).

El óxido nítrico es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 310 veces mayor al dióxido de carbono y su permanencia en la atmósfera es de 130 años (Di y Cameron 2006). En magnitud, el N₂O ocupa el tercer lugar en cuanto a emisión de los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera, provenientes de los procesos de producción animal (Abarca 2013).

Según Oenema *et al.* (2005), se estima que entre el 30 y 50 % de las emisiones de N₂O globales en agricultura, provienen de los desechos de la producción animal, que contribuyen aproximadamente con 1,5 Gt del gas emitido. De este total, un 41 % proviene de la orina y heces de animales en pastoreo, que no se utilizan o cuantifican como fertilizantes ni se tratan de manera alguna, sino que quedan depositados sobre las pasturas o campos naturales. Otro 27 % proviene de fuentes indirectas mediante la volatilización, que en parte entran a la

atmósfera en forma de amoníaco y óxidos de nitrógeno; y luego retorna a los suelos por deposición atmosférica, aumentando así la producción de óxido nítrico. Un 19 % proviene de residuos de animales en los establos y lugares de acumulación, otro 10 % por aplicación de los desechos animales a la tierra, y un 3 % por la combustión de las heces. Según el mismo estudio, en lo que se refiere a los animales, la ganadería bovina de carne aporta el 44 % de las emisiones, seguido por el ganado bovino lechero con el 16 %, ovinos con el 12 %; porcinos con 9 % y aves con el 6 %.

La producción de N₂O está influenciada por múltiples variables como la temperatura, la humedad, la disponibilidad de O₂ y el sustrato. Todos estos factores están regulados por el clima, la vegetación, las propiedades físicas y químicas del suelo (densidad aparente, Carbono orgánico, pH y contenido de arcilla), y las prácticas de manejo agrícola (Chen *et al.* 2008 y Matthews *et al.* 2010).

Estudios en Costa Rica, reportaron resultados variables de emisión de N₂O (Veldkamp *et al.* 1998 y Montenegro y Abarca 2001) en función del tipo de pastura y del manejo. Veldkamp *et al.* (1998), citan promedios anuales de 2,67 kg ha⁻¹ para pasturas tradicionales de ratana (*Ischaemun indicum*), 4,88 kg ha⁻¹ para pasturas combinadas de gramínea (*Brachiaria brizantha*) y leguminosa (*Arachis Pintoi*) y 25,82 kg.ha⁻¹ en pasturas de *Brachiaria decumbens* fertilizadas. Montenegro y Abarca (2001), también encontraron variaciones en la emisión de N₂O por año según el tipo de pasto, de 3,14 kg ha⁻¹ para pasto estrella africana (*Cynodon plecostachyus*), de 2,28 kg ha⁻¹ para el pasto ratana (*Ischaemun indicum*), de 6,80 kg ha⁻¹ para el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y 3,44 kg ha⁻¹ en pasturas de jaragua (*Hyparrhenia rufa*).

Veldkamp *et al.* (1998), mencionan que los factores ambientales son más determinantes que las formas de N del fertilizante en las emisiones de N₂O por las pasturas, por lo tanto, para estimar las emisiones en la agricultura tropical, la estratificación según el régimen de humedad del suelo es más útil que la estratificación de acuerdo a la composición del fertilizante.

En el trópico, se cuenta con poca información precisa sobre gases de efecto invernadero. Este estudio tuvo como objetivo estudiar el patrón diario

de éstas emisiones y establecer el momento del día más propicio para obtener mediciones representativas del flujo promedio diario de la emisión de N_2O .

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de la investigación

El estudio se llevó a cabo en el área de ganadería de la Estación Experimental Los Diamantes (EELD), ubicada en Guápiles, cantón de Pococí, provincia Limón. Según clasificación de Holdridge (1978), la estación se ubica en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Tropical Basal, con una precipitación anual de 5585 mm y una temperatura diaria promedio de 25,0 °C. para el año 2015.

De acuerdo con Veldkamp (1993), el suelo del área de la investigación en la Estación Experimental Los Diamantes se denomina Eutric Hapludands, con características ándicas bien desarrolladas, buen drenaje y fertilidad, con un horizonte A de 25 a 45 cm de grosor y un horizonte B con textura franca o franco arenosa.

Mediciones de óxido nítrico

Las mediciones se realizaron en una pastura de *Brachiaria* híbrido cv Cayman de 5 hectáreas, con 21 apartos de 2720 m² cada uno. La pastura se estableció en el 2012 con semilla sexual certificada y manejada mediante pastoreo racional (Voisin), con 2 a 3 días de ocupación y 47 días de rebrote, utilizando una carga animal que osciló entre 2,0 y 3,0 UA.ha⁻¹.año⁻¹.

Para realizar las mediciones de N_2O , se utilizó la técnica de cámaras estáticas (unidades desarmables conformadas por una base o parte inferior que se introduce en el suelo y una tapa o parte superior que posee un termómetro y un punto para muestreo de los gases), de acuerdo con la metodología

descrita por Klein y Harvey (2012). Se utilizaron 8 cámaras cilíndricas confeccionadas en acero inoxidable, cuya parte superior tiene un diámetro de 40 cm y una altura de 38 cm, con una tapa acrílica transparente que permite observar la escala del hidrotérmetro, un punto central para el muestreo y carece de ventilación interna. La otra parte es una base de metal que consta de un anillo con 6 tornillos y una aleta o lámina de acero inoxidable circular de 10 cm de largo, soldada al anillo.

Para realizar el muestreo, 24 horas antes del primer día de medición, se introdujeron en el suelo de la pastura seleccionada, las bases o parte inferior de las cámaras estáticas al azar, a 10 cm de profundidad en el área de un aparto.

Se realizaron muestreos repetidos durante una hora tomando tres muestras por cada cámara en tres tiempos diferentes (0, 20 y 40 minutos). Una vez concluida la hora de muestreo, se retiró la parte superior de las cámaras (no así las bases) con el fin de liberar el gas acumulado, repitiendo el mismo procedimiento una hora después y así sucesivamente durante 6 días de muestreo (2 semanas no consecutivas, con 3 días seguidos por semana).

En el día 1 de las mediciones, se colocaron termómetros en el suelo a la par de las cámaras número 1 y 8, con el objetivo de medir la temperatura interna del suelo. Al momento de iniciar la medición (t_0), se colocó la parte superior de la cámara sobre el anillo y se atornilló rápidamente; mientras ocurría esto, se procedió a tomar la muestra ambiente con una jeringa plástica individual (testigo a t_0) y la muestra interna de gas al t_0 de la cámara número 1, después de mezclar el aire interno de la cámara

mediante la succión y expulsión hacia dentro de la cámara con la jeringa de 50 ml que está conectada al punto de muestreo. Este proceso se repite entre 6 y 7 veces, de tal forma que en la última absorción no se expulsa el aire, se conserva dentro de la jeringa y se cierra el conducto hacia la cámara. Parte de la muestra de gas extraído (20 a 30 ml), se pasa a un vial al vacío devolviendo a la cámara el gas remanente no utilizado en la jeringa. Los viales con gas se mantienen en un recipiente a temperatura controlada (10-15°C), los cuales posteriormente se llevan al laboratorio para su respectivo análisis.

Transcurridos de 2,0 a 2,5 minutos, se debe realizar el mismo proceso para la cámara número 2 y así sucesivamente hasta concluir en la cámara número 8, momento donde termina el primer periodo de muestreo (t_0); paralelamente se registró la hora exacta cuando se colocó la parte superior de la cámara sobre el anillo de cada una de las bases, con el fin de no superar los 20 minutos entre el muestreo de la cámara número 1 y la número 8.

EL segundo periodo de muestreo (t_{20}) inicia en la cámara número 1, a los 20 minutos exactos después de haber tapado esa cámara. Antes de que se cumpla el tiempo, se toma la muestra ambiente nuevamente (testigo a t_{20}) y tomamos también la muestra t_{20} de la cámara número 1, al tiempo justo. Se siguen tomando las muestras del t_{20} de las demás cámaras hasta la número 8, tratando de hacerlo a los 20 minutos exactos de la anterior muestra (t_0). Se procede igual para el tercer periodo muestreo a los 40 minutos (t_{40}), con todas las cámaras utilizadas (no olvidando tomar al inicio la muestra ambiente). El proceso se realizó por dos o más personas, para poder cumplir con los tiempos establecidos entre cada etapa o tiempo de muestreo.

Horas de medición

En el trópico la temperatura ambiente diaria, presenta el periodo más frío del día en la madrugada (entre las 3 y 4 horas) y el más caliente al iniciar la tarde (entre las 12 y 13 horas), reduciéndose paulatinamente durante el resto de la tarde y noche. Esta misma variación se espera en el suelo, aunque en menor magnitud; por lo tanto, se consideró que el periodo de mayor emisión de N_2O se presentaría entre las 6 y 18 horas.

Según la metodología de Klein y Harvey (2012), el modelo para el cálculo de la emisión de N_2O a partir de las mediciones de concentraciones es el siguiente:

$$g_{N_2O} - N = \frac{P \times V \times PM * ppm}{R \times T \times 1000000}$$

Donde:

g_{N_2O-N}	=	Emisión N_2O-N
P	=	Presión atmosférica, 100 kPa
V	=	Volumen de la cámara, en m^3
PM	=	Peso molecular del nitrógeno N_2 (28 $g \cdot mol^{-1}$)

$$mg \ N_2O \cdot m^2 \cdot h = \frac{(g_{t40} - g_{t20}) + (g_{t20} - g_{t10}) \times 1000}{m^2 \times h}$$

ppm	=	Concentración del cromatógrafo de gases ($mg \cdot g^{-1}$)
R	=	Constante de los gases ideales (8.3482 $mol \cdot kg^{-1}$)
T	=	Temperatura promedio en °K

El modelo anterior se implementó en los diferentes tiempos (0, 20 y 40 minutos) variando las ppm, obteniendo 3 estimados de emisión a partir de los cuales se calculó el flujo por hora mediante interpolación, de acuerdo con la siguiente fórmula (Klein y Harvey 2012):

Análisis estadístico

Se realizó un análisis exploratorio mediante estadística descriptiva obteniendo los valores de tendencia central y dispersión para cada variable por medio del programa estadístico SAS (SAS Institute 2009). Además se realizó un análisis de correlación entre la humedad relativa y las temperaturas (interna y externa) de las cámaras en los tiempos 0, 20 y 40 minutos con relación a la concentración del N.

Posteriormente, los datos de concentración de N₂O fueron analizados mediante un modelo lineal mixto generalizado, utilizando el procedimiento GLIMMIX del programa estadístico SAS (SAS Institute 2009).

El modelo ajustado fue el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 H + \beta_3 C + \beta_4 (D \times H) + \beta_5 (D \times C) + \beta_6 (C \times H) + \beta_7 H(D \times C) + \varepsilon$$

Donde:

Y	=	Variable de respuesta: emisiones de N ₂ O. Se exploró el ajuste de distintas distribuciones de probabilidad y se seleccionó la más adecuada.
β_0	=	Media general
D	=	Día (día 1 hasta día 3)
H	=	Hora (6 a 18 horas)
C	=	Cámara (C #1 hasta C #8, y testigo [muestra ambiente])
$D \times H$	=	Día x hora,
$D \times C$	=	Día x cámara,
$C \times H$	=	Cámara x hora,
$H(D \times C)$	=	Efecto aleatorio de hora anidado dentro de día y cámara. Se asumió una estructura de covarianza autoregresiva de primer orden entre las mediciones realizadas a lo largo de un mismo día en una misma cámara.
ε	=	Error residual aleatorio (NID, 0, 1).

Con base en el modelo anterior se obtuvieron estimados de ajuste del modelo y estimados de significancia estadística para todos los efectos evaluados. Para las diferentes categorías de los efectos fijos que se determinaron como significativos ($p < 0,05$), se realizaron pruebas de comparación de medias independientes (**Tukey-Duncan-Fisher-LSD**) y se conformaron grupos homogéneos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico descriptivo

Una vez realizada la recolección, edición y tabulación de datos, se contó con 16 variables (Cuadro 1). Según se observa, las temperaturas internas obtenidas tienden a ser superiores a las temperaturas externas en los diferentes tiempos de medición, con diferencias de +2,3, +3,7 y +4,1 °C para los tiempos 0, 20 y 40 minutos, respectivamente. Estas temperaturas corresponden a las cámaras número 1 y número 8. Se observa además, un ligero incremento del promedio para ambas temperaturas (externa e interna) entre los minutos 0 y 40, lo que refleja la tendencia normal al incremento de temperatura a lo largo del día hasta llegar al punto máximo.

Cuadro 1. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación estándar (DE), Valores Mínimos (Min), Máximos (Máx) e Intervalo de Confianza al 95%, para las variables obtenidas a partir del estudio. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Variable	n	\bar{X}	Me	DE	Mín	Máx	Intervalo de confianza 95%	
							Inf	Sup
Temp. Interna Cámara 0 min (°C)	81	31,2	30,3	4,09	24,0	41,5	30,3	32,1
Temp. Externa Cámara 0 min (°C)	81	28,9	29,0	2,91	21,9	35,1	28,3	29,6
Temp. Interna Cámara 20 min (°C)	81	32,7	32,3	4,81	24,9	48,0	31,7	33,8
Temp. Externa Cámara 20 min (°C)	81	29,0	28,8	3,09	21,7	37,2	28,4	29,7
Temp. Interna Cámara 40 min (°C)	81	33,4	32,9	5,16	25,1	53,2	32,2	34,5
Temp. Externa Cámara 40 min (°C)	81	29,3	28,6	3,22	22,1	38,3	28,6	30,0
Humedad Relativa 0 min (%)	79	86,5	90,0	13,6	50,0	99,0	83,4	89,5
Humedad Relativa 20 min (%)	79	92,6	95,0	7,6	73,0	99,0	90,9	94,3
Humedad Relativa 40 min (%)	79	94,5	99,0	6,5	72,0	99,0	93,5	96,4
Concentración N ₂ O 0 min (ppm)	369	0,53	0,38	0,32	0,00	1,44	0,50	0,56
Concentración N ₂ O 20 min (ppm)	369	0,61	0,41	0,36	0,03	1,68	0,58	0,65
Concentración N ₂ O 40 min (ppm)	369	0,71	0,45	0,42	0,29	2,09	0,66	0,75
Emisión N ₂ O (mg.m ⁻² .hora ⁻¹)	369	0,12	0,06	0,17	0,00	1,15	0,10	0,14

De acuerdo con los datos meteorológicos registrados para la zona, las temperaturas ambientales promedio de los días 2, 3 y 4 de setiembre (2015), correspondientes a la primera semana de medición, fueron respectivamente de 26,0, 26,4 y 26,5 °C. Mientras que, para los días 28, 29 y 30 de setiembre (2015), de la segunda semana de medición, se registraron temperaturas de 28,2, 28,3 y 28,3°C (CORBANA 2016).

En cuanto a la humedad relativa se observó una tendencia similar a la temperatura, con un aumento progresivo conforme al avance de los minutos dentro de cada hora. Por otra parte, la humedad ambiental promedio para el mes de setiembre 2015, fue de 88,9 % (CORBANA 2016).

Con respecto a la concentración del gas N₂O, también se observó una tendencia hacia el aumento a lo largo de los tres tiempos de muestreo, lo cual es de esperar debido a su acumulación durante el tiempo que se mantuvo la cámara sellada. La concentración del gas presentó una correlación positiva y significativa (0,14; $p < 0,05$), con la temperatura interna de la cámara, y una correlación negativa y significativa (-0,13; $p < 0,05$) con la temperatura externa de la cámara. Estas correlaciones, aunque significativas, fueron de baja magnitud. La

correlación con la humedad relativa fue muy baja (-0,03) y no significativa ($p = 0,68$).

En relación con la emisión de N₂O, el valor promedio fue de $0,12 \pm 0,17$ mg N₂O. m⁻² h⁻¹ (Cuadro 1), equivalente a 10,62 kg ha⁻¹ año⁻¹. Cabe notar además, que el valor de la media duplicó el valor de la mediana (Me=0,06). Esto se debe a que la distribución de probabilidad de esta variable es muy sesgada a la derecha, como se aprecia en el histograma de la Figura 1. El sesgo positivo de la variable emisión de N₂O ha sido previamente descrito por otros investigadores (Veldkamp *et al.* 1998; Venterea *et al.* 2012) y debe ser considerado a la hora del análisis estadístico. Aunque la gran mayoría de los valores de emisión observados durante el día son menores a 0,15 mg N₂O m⁻² h⁻¹, existe un amplio rango de valores superiores, hasta un máximo de 1,15 mg N₂O m⁻² h⁻¹, que ocurren esporádicamente. Por esta razón, es importante que para el estudio de esta variable se reporten ambas medidas de tendencia central (media y mediana). Por otra parte, la variable de emisión de N₂O no se ajustó a una distribución Normal, lo que tiene implicaciones para su análisis por medio de modelos lineales, según se describirá más adelante. La distribución que mejor se ajustó a esta variable fue la Log-Normal, según se muestra en la Figura 1.

Estudios previos realizados en pasturas tradicionales bajo pastoreo extensivo, mencionan rangos de emisión de N_2O entre 0 y 2 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$, mientras que en pasturas fertilizadas con manejo intensivo, los rangos de emisión superan los 10 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ (Dalal *et al.* 2003).

En Costa Rica, estudios realizados han reportado resultados variables de emisión de N_2O , principalmente en función del tipo de pastura y del manejo (Veldkamp *et al.* 1998; Montenegro y Abarca 2001). Se han reportado promedios anuales de emisión de N_2O de 2,67 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ para pasturas tradicionales

de pasto Ratana (*Ischaemun indicum*), 4,88 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ para pasturas combinadas de gramínea (*Brachiaria brizantha*) y leguminosa (*Arachis pintoii*) y 25,82 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en pasturas bajo programas de fertilización (*Brachiaria decumbens*), por parte de Veldkamp *et al.* 1998. En otro estudio realizado por Montenegro y Abarca (2001) se reportaron valores de emisión de 3,14 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ para el pasto Estrella africana (*Cynodon plectostachyus*), 2,28 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ para pasto Ratana (*Ischaemun indicum*), 6,8 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ para el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y 3,44 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en pasturas de jaragua (*Hyparrhenia rufa*).

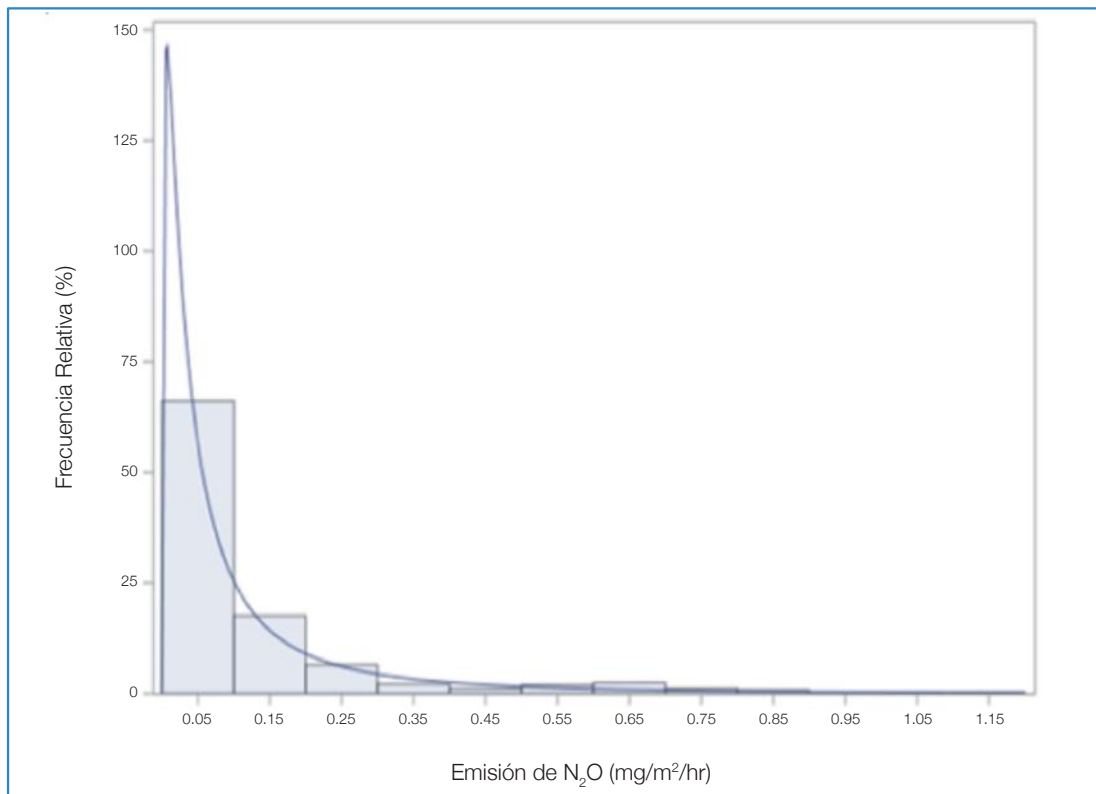


Figura 1. Histograma de frecuencias relativas de la variable emisión de N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) con ajuste por distribución LOG-normal (Theta= 0, sigma= 1,41, zeta= -2,9). Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

El valor encontrado en el presente estudio es mayor a otros valores reportados con pasturas no fertilizadas. Un factor que pudo causar los altos niveles de emisión de N_2O observados en el presente estudio, fue el pastoreo con una carga animal relativamente alta (2,5- 3,0 UA/ha) y el tipo de suelo de la estación (Eutric Hapludands), un suelo con tendencia ándica, fértil, de buen drenaje y con horizontes profundos (Veldkamp 1993). En la primera semana (días 1, 2 y 3), las mediciones iniciaron 3 días después de que los animales dejaron

el potrero, mientras que en la segunda semana (días 4, 5 y 6) las mediciones se realizaron el día posterior al pastoreo de los animales. Se han reportado emisiones de 9,64 $kg\ N\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en asociaciones de gramínea/leguminosa bajo pastoreo, mientras que en las zonas no pastoreadas, la emisión fue de 1,97 $kg\ N\ ha^{-1}\ año^{-1}$; esto por Sagar *et al.* 2003. El pastoreo redundaba en una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo, producto del material que excretan y orinan los animales. Esto es influenciado además por la interacción natural de las condiciones

ambientales propias de la zona, como altas temperaturas y humedad, que también presentaron condiciones apropiadas para la producción de N_2O . De acuerdo con Montenegro y Abarca (2001), el N_2O que proviene de las excretas líquidas y sólidas de los animales puede ser mayor que el que proviene del nitrógeno del fertilizante. En el presente estudio, los valores de emisión observados tienden a ser mayores a los reportados en pasturas con manejo extensivo, pero menores a los reportados en pasturas fertilizadas con manejo intensivo.

En la Cuadro 2, se observa la tendencia de los promedios de emisión de N_2O en relación con el paso de los días de medición. En la semana 1 (días 1, 2 y 3) la emisión promedio fue de $0,17 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, más del doble de la semana 2 (días 3, 4 y 5), que presentó una emisión promedio de $0,07 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esta diferencia puede deberse a que las condiciones ambientales variaron considerablemente entre ambas semanas. Por ejemplo, observamos que los días 1, 2 y 3 de la primera semana de muestreo contaron con una precipitación variable de 0,4, 49,4 y 23,8 mm respectivamente, para un promedio de 23,7 mm; mientras que los días 4, 5 y 6 correspondientes a la segunda semana, presentaron precipitaciones de 0, 20,4 y 2,3 mm respectivamente, para un promedio de 7,57 mm (CORBANA 2016).

Otros estudios han reportado emisiones de N_2O altamente fluctuantes en función de la hora, el día, la época, la temperatura, el sitio, el tipo de suelo o el manejo (Veldkamp *et al.* 1998, Sagar *et al.*, 2003 y Rowlings *et al.* 2010). Se menciona que los picos de emisión de N_2O son altamente episódicos y tienden a coincidir con eventos de altas precipitaciones seguidas por alto contenido de humedad en el suelo (Veldkamp *et al.* 1998 y Sagar *et al.* 2003). El contenido de agua en los poros del suelo determina la disponibilidad de O_2 , el cual a su vez favorece la tasa de nitrificación y desfavorece la tasa de desnitrificación. Cuando el espacio poroso es ocupado por agua (water-filled pore space -WFPS) entre un 30 y 60 %, se maximiza la producción de N_2O mediante la nitrificación, mientras que cuando supera el 60 % se favorece la producción de N_2O mediante la desnitrificación (Veldkamp *et al.* 1998).

Cuadro 2. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N_2O ($\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) en función de los días de muestreo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Semana	Día	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95 %	
						Inferior	Superior
1	1	63	0,27	0,16	0,28	0,20	0,34
1	2	62	0,13	0,11	0,10	0,10	0,15
1	3	62	0,10	0,05	0,12	0,07	0,13
2	4	60	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05
2	5	59	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05
2	6	63	0,14	0,05	0,19	0,09	0,19

En la Cuadro 3, se observa la tendencia en promedio de la emisión de N_2O durante las horas del día. La emisión se mantuvo estable en las primeras horas del día (entre las 6 y 12 horas) con valores de 0,09 mg, posteriormente aumentó aproximadamente un 95 % hasta un máximo de 0,19 mg en las horas de la tarde (entre las 14 y 15 horas) y finalmente disminuyó de nuevo a 0,13 mg a las 18 horas.

Estas variaciones pueden estar ligadas a las condiciones de temperaturas normales presentes durante el día en la zona de medición, ya que la temperatura aumentó a partir de las 8 horas hasta encontrar un máximo entre las 12 y las 16 horas; para posteriormente presentar una disminución hasta el siguiente día.

La temperatura al igual que otros procesos biológicos, aumentan las tasas de nitrificación y desnitrificación dentro de un rango preciso. A mayor temperatura se favorece una mayor proporción de N_2O de la nitrificación. La temperatura de los suelos aumenta la emisión de N_2O , al menos hasta $37 \text{ }^\circ\text{C}$, pero la proporción de N_2O disminuye con temperaturas cada vez mayores, por encima de $37 \text{ }^\circ\text{C}$ (Dalal *et al.* 2003).

Cuadro 3. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación Estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) en función de las horas del día. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Hora	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95%	
					Inferior	Superior
6	52	0,09	0,06	0,10	0,06	0,11
8	53	0,09	0,04	0,16	0,05	0,14
10	52	0,09	0,05	0,12	0,06	0,12
12	54	0,09	0,05	0,18	0,04	0,14
14	51	0,17	0,11	0,20	0,11	0,23
16	53	0,19	0,08	0,25	0,12	0,26
18	54	0,13	0,07	0,15	0,09	0,17

En el cuadro 4, se observa la emisión promedio de N_2O en las distintas cámaras del muestreo. Se observan diferencias considerables entre algunas de las cámaras, desde 0,09 hasta 0,19 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$, todas superiores al testigo (0,05), como era de esperar. Las variaciones entre cámaras, exceptuando al testigo, pueden estar ligadas a múltiples factores, entre ellos factores microambientales tales como: la cantidad de excretas y orina en los potreros después del pastoreo, zonas de encharcamiento por lluvias, efecto de la humedad ambiental en el momento de la medición ó la variación en temperaturas debido a los puntos donde se encuentren colocadas las cámaras en el potrero de medición; dado que puede haber un efecto de sombra o una total exposición a la radiación solar (Montenegro y Abarca 2001).

En general, la tasa de desnitrificación se eleva con el aumento del contenido de NO_3 en el suelo, cuando hay condiciones adecuadas para la desnitrificación (por ejemplo, alta humedad) y cuando factores como la temperatura y el carbono orgánico disponible no son limitantes (Dalal *et al.* 2003). En la mayoría de los casos, cuando hay presencia de reducción de Nitratos (en N_2), la misma se produce como resultado de una relación N_2O/ N_2 más alta a contenidos similares de humedad y oxígeno.

Cuadro 4. Promedio (\bar{X}), Mediana (Me), Desviación Estándar (DE), valores Mínimos (Min) y Máximos (Máx) y Límites de Confianza 95 % para la variable emisión N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) en función de las cámaras. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Número Cámara	n	\bar{X}	Me	DE	Límites de Confianza 95 %	
					Inferior	Superior
1	41	0,13	0,06	0,17	0,07	0,18
2	42	0,19	0,12	0,22	0,12	0,26
3	41	0,13	0,08	0,15	0,08	0,18
4	41	0,18	0,08	0,25	0,10	0,25
5	42	0,12	0,05	0,18	0,06	0,18
6	42	0,10	0,08	0,09	0,07	0,13
7	41	0,11	0,06	0,16	0,05	0,16
8	40	0,09	0,05	0,13	0,05	0,13
Testigo	39	0,05	0,01	0,13	0,00	0,09

Análisis por modelo mixto lineal

Debido a la distribución marcadamente sesgada de la emisión de N_2O (Figura 1), se consideró más apropiado el empleo de una distribución Log-Normal como base para el modelo lineal. El modelo convergió de manera satisfactoria, observándose un efecto altamente significativo y significativo de los factores analizados, con excepción de la interacción cámara \times hora (P: 0,95).

Cuadro 5. Valores de significancia para efectos incluidos en el modelo estadístico de regresión. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

Efecto	Pr > F
Día	<0,0001
Hora	<0,01
Cámara	<0,0001
Día \times hora	<0,0001
Día \times cámara	<0,0001
Cámara \times hora	0,95

Las medias marginales de la emisión de N_2O en escala logarítmica (Figura 2), muestran una tendencia decreciente entre los días 1 y 3 de la primera semana, mientras que durante los días 4 al 6 de la segunda semana se observa un crecimiento. Las medias de los días (1, 2) difieren significativamente ($p < 0,05$) con respecto a las medias de los días (3, 6) y (4, 5). El rango de emisión en la escala original ($mg N_2O m^{-2} h^{-1}$) osciló entre 0,02 [$2,7183^{(-3.926)}$] y 0,15 [$2,7183^{(-1.909)}$]. Según se mencionó previamente, en los días de muestreo de la primera semana se presentaron mayores temperaturas, humedad y precipitaciones, lo que pudo influir en estos resultados. La combinación de un suelo con textura fina, alta humedad, altas temperaturas y disponibilidad de N; fácilmente contribuye a que se produzcan emisiones de N_2O sustanciales, en el sistema de pasturas y leguminosas tropicales, como lo menciona Rowlings *et al.* (2010).

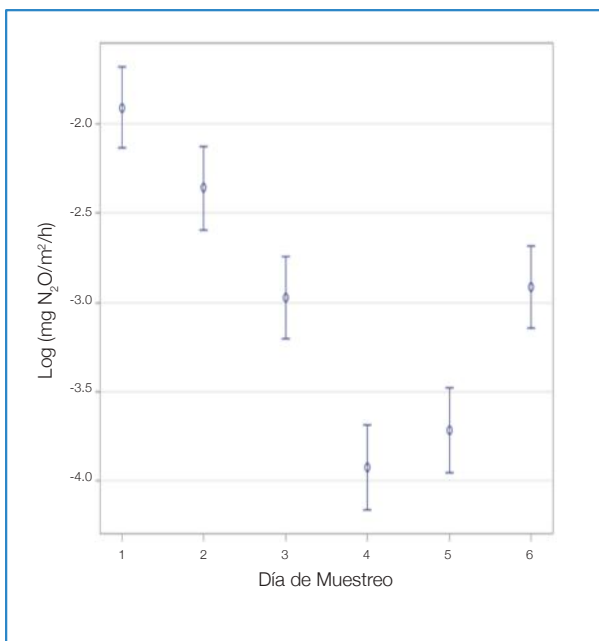


Figura 2. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N_2O , [$\log (mg N_2O m^{-2} h^{-1})$], en función de los días muestreados. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

La Figura 3, muestra las medias marginales de emisión de N_2O en función de la hora del día. Las emisiones muestran un patrón no lineal, con un pequeño descenso en el valor entre las 6 y las 8 horas del día, para luego mostrar una tendencia

creciente hasta las 16 horas; donde se observa el pico de mayor valor de emisión, coincidente con las horas de mayor temperatura, para descender el valor nuevamente a las 18 horas. Las mayores medias marginales (0,06 y 0,07 $mg N_2O$) se registraron a las 14 y 16 horas del día respectivamente, ellas difieren significativamente ($p < 0,05$) de las medias obtenidas entre las 6 y 10 horas.

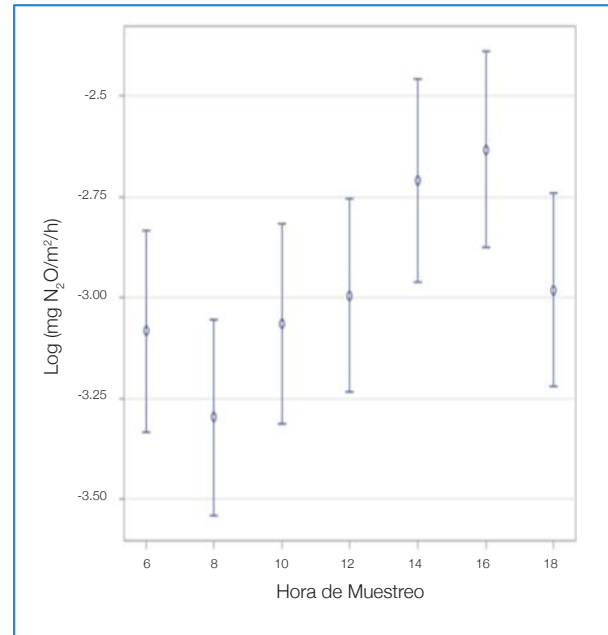


Figura 3. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N_2O , [$\log (mg N_2O.m^{-2}.h^{-1})$], en función de las horas del día. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 4, se visualizan las medias marginales de emisión por cámara. Como era de esperar el testigo se mantiene con mediciones significativamente inferiores ($p < 0,05$) a las demás cámaras. Las mediciones de las cámaras son bastantes similares entre sí, aunque algunas difieren significativamente entre sí. Como por ejemplo, las cámaras 2 y 6 que difieren ($p < 0,05$), con respecto a las cámaras 5 y 8. Estas variaciones, pueden estar asociadas a fluctuaciones en las condiciones específicas de las cámaras dentro del potrero, tales como la humedad, el tipo de suelo y la temperatura (Montenegro y Abarca 2001).

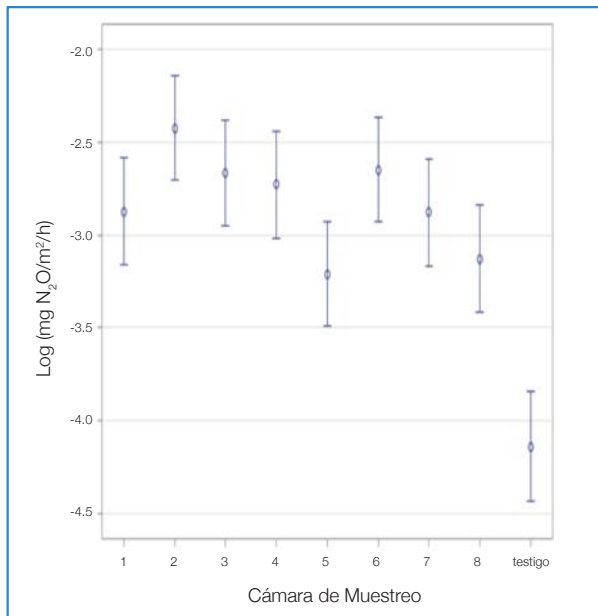


Figura 4. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O, [$\log(\text{mg N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$], en función de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

La Figura 5, muestra las medias marginales de emisión de N₂O en función de la hora, para cada una de las cámaras y el testigo. Se observa que las tendencias a lo largo de las horas no difieren significativamente ($p>0,05$) entre cámaras, según se reportó en la Cuadro 1. Los patrones observados son fluctuantes, aunque la mayoría de las cámaras tiende a mostrar un comportamiento no lineal, descrito anteriormente, con aumentos de emisión hacia las 14 y 16 horas. Además, como era de esperar, la línea del testigo está siempre por debajo de las demás, tal y como se observó en la Figura 4. Se puede observar que la emisión mantiene una constante en la producción de óxido nitroso durante un periodo comprendido entre las 10 y las 16 horas.

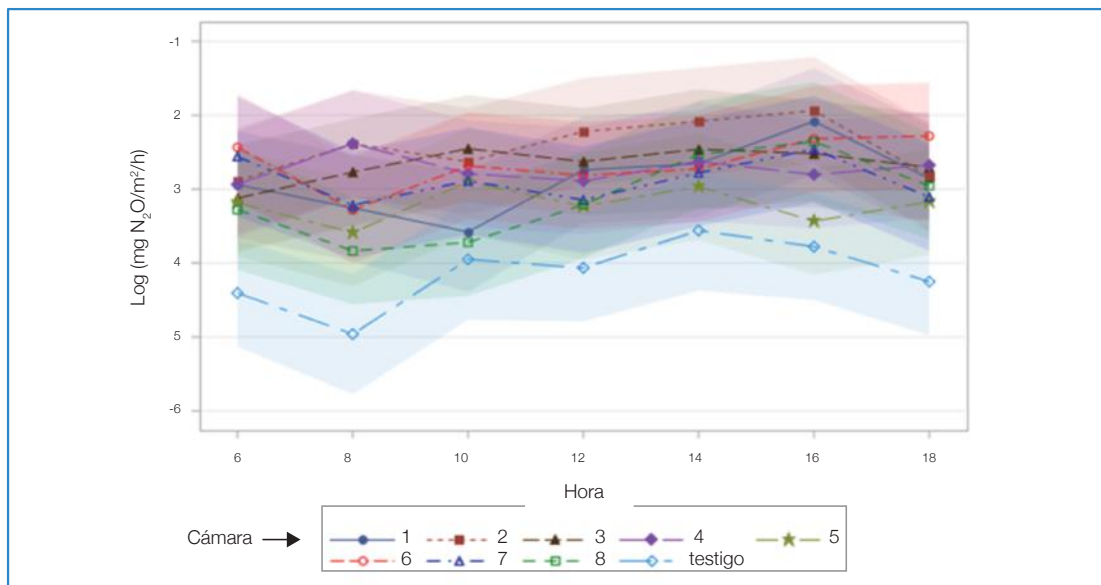


Figura 5. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O, [$\log(\text{mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1})$], en función de la hora para cada una de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 6, se muestran las medias marginales de emisión de N₂O por cámara en función de los días de muestreo. Como se esperaba, la línea del testigo se mantiene casi siempre por debajo de las demás. La mayoría de las cámaras mostraron un patrón no lineal similar al descrito en la Figura 2, con mediciones más altas en los primeros 3 días, marcada reducción en los días 4 y 5 y un ligero incremento en el día 6. Dos de las cámaras

(4 y 6) muestran una medición inusual en el día 4, presentando valores menores que el testigo, lo cual nos indica que el ciclo del nitrógeno presenta cierta disminución en la emisión, en parte de su proceso, para posteriormente retomar la producción de N₂O con tendencia hacia el alza. Asimismo, la cámara 6 fue la que presentó mediciones más uniformes a lo largo de todos los días evaluados.

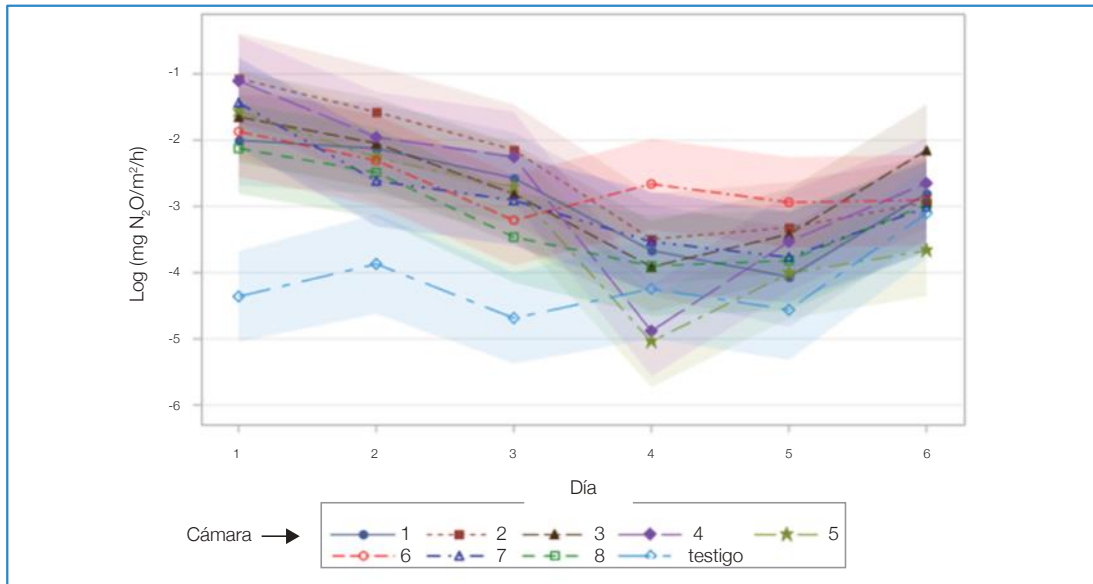


Figura 6. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O [log (mg N₂O.m⁻².h⁻¹)], en función de los días para cada una de las cámaras y el testigo. Pococí, Limón; Costa Rica. 2015.

En la Figura 7, se muestran las medias marginales de la emisión de N₂O según el día y la hora. La tendencia general descrita en la Figura 3, no se cumple para todos los días. En el día 1, el pico de emisión se observó a las 16 horas, mientras que en los días 2, 5 y 6 ocurrió a las 14 horas y los días 3 y 4 a las 18 y 12 horas, respectivamente.

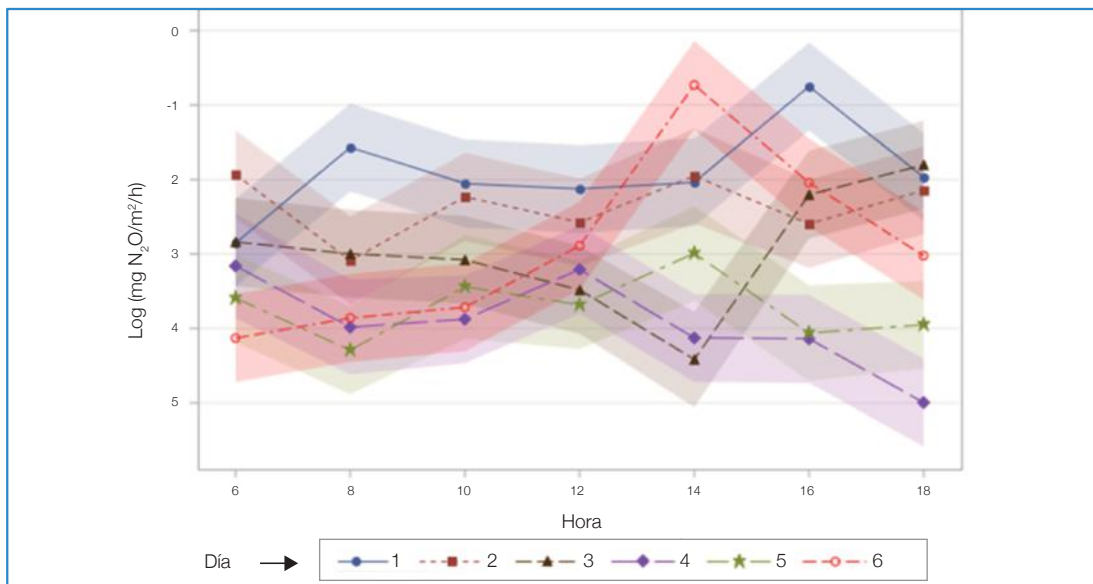


Figura 7. Medias Marginales e Intervalo de Confianza al 95 % para la variable emisión de N₂O [log (mg N₂O.m⁻².h⁻¹)], en función de las horas para cada uno de los días. Pococí, Limón; 2015.

Esta variabilidad sugiere, que no es posible determinar una única hora óptima que represente el promedio de emisión. El rango de variación en temperatura a lo largo del día, es bajo a nivel local, en comparación con otras regiones del mundo. Por lo anterior, lo ideal es realizar las mediciones entre las 10 y las 16 horas; a diferencia de otras partes del mundo, donde se define más claramente el punto máximo de emisión.

En general, el promedio de emisión de N₂O obtenido (0,12±0,17 mg N₂O m⁻² h⁻¹, equivalente a 10,62 kg ha⁻¹ año⁻¹), es superior a otros valores reportados previamente (2,28 - 3,14 - 3,44 - 6,80 kg ha⁻¹ año⁻¹, para ratana, estrella africana, jaragua y kikuyo respectivamente; Montenegro y Abarca 2001) en sistemas de pastoreo bajo modalidades de manejo extensivas.

La investigación nos muestra que la posible combinación de distintos factores como tipo de pastoreo, carga animal, tipo de suelo y condiciones climáticas de la zona, son los causantes de las variaciones en la emisión de N₂O obtenidas. El suelo podría ser el mayor precursor en la emisión, debido a

que las condiciones lluviosas alternadas con etapas cortas de escasa precipitación, características de la zona Caribe y que pueden beneficiar a las bacterias desnitrificadoras, que están en una constante reactivación cuando bajan los encharcamientos (en horas), creando picos de emisión durante lapsos cortos de tiempo.

El estudio demostró que existe variación significativa en la emisión de N₂O en función de las variables: día, hora y cámara. Las diferencias entre días parecen estar ligadas mayormente a diferencias en precipitación y humedad del suelo. Las diferencias entre horas se ligan mayormente a cambios en el patrón de temperatura. La diferencia entre cámaras se asocia principalmente a las diferencias en microclima entre diferentes sitios dentro de la pastura.

La mayor emisión se presenta a partir del tercer día de haber abandonado los animales el potrero, producto de una acumulación de excretas y lixiviados de origen animal, los cuales en conjunto con la interacción de factores ambientales provocan un pico de emisión de N₂O como parte del proceso de desnitrificación.

LITERATURA CITADA

- Abarca, MS. 2013. Cambio climático y mitigación en fincas lecheras. *Revista Universidad Técnica Nacional*. (63):28-31.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2015. Medición de óxido nitroso en Costa Rica (en línea). Turrialba, Costa Rica. 2 p. Consultado 10 nov. 2015. Disponible en <http://www.catie.ac.cr/es/catie-noticias/943-miden-oxido-nitroso-en-pasturas-de-costa-rica>
- Chen, D; Li, Y; Grace, P; Mosier, AR. 2008. N₂O emissions from agricultural lands: a synthesis of simulation approaches. *Plant and Soil* 309(1-2):169–189.
- Dalal, R; Wagan, W; Robertson, P; Parton, W. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research* 41:165-195.
- Di, HJ; Cameron, KC. 2006. Nitrous oxide emissions from two dairy pasture soils as affected by different rates of a fine particle suspension nitrification inhibitor, dicyandiamide. *Biology and Fertility of Soils*. 42(6): 472–480.
- Holdridge, L. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica. 216 p.
- Holmann, F; Rivas, L; Pérez, E; Castro, C; Schuetz, P; Rodríguez, J. 2007. *La cadena bovina en Costa Rica: identificación de temas críticos para impulsar su modernización, eficiencia y competitividad*. CIAT, Cali, Colombia. 70 p.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2016. *Temperatura y humedad promedio zona atlántica* (en línea). San José, Costa Rica. 2 p. Consultado 20 ago. 2016. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>

- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2015. Censo Agropecuario Nacional (en línea). San José, Costa Rica. 179 p. Consultado 11 nov. 2015. Disponible en <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Klein, C; Harvey, M. 2012. Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. New Zealand. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (en línea). Wellington, Nueva Zelanda. 146 p. Consultado 11 nov. 2015. Disponible en http://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2015/11/Chamber_Methodology_Guidelines_Final-V1.1-2015.pdf
- Matthews, R.D., Chadwick, D.R., Retter, A.L., Blackwell, M.S.A., Yamulki, B. 2010. Nitrous oxide emissions from small scale farmland features of UK livestock farming systems. *Agric. Eco. & Env.* 136:192-198.
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería); IMN (Instituto Meteorológico Nacional). San José, Costa Rica. 138 p.
- Oenema, O; Wrage, N; Velthof, G.L; Van Groenigen, J.W; Dolfing, J; Kuikman, P.J. 2005. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72(1): 51-65.
- Rowlings D; Grace, P; Kiese, R; Scheer, C. 2010. Quantifying N₂O and CO₂ emissions from a subtropical pasture. *In* World Congress on Soil Science. Soils solution for a changing world (19, 2010, Brisbane, Australia).Memoria. p. 199-201.
- SAS Institute. 2009. The SAS system for Windows. Release 9.4. SAS Inst. Cary, North Carolina, Estados Unidos de América. 5121 p.
- Saggar, S; Andrew, RM; Tate, KR; Hedley, CB; Rodda, NJ; Townsend, JA. 2004. Modelling nitrous oxide emissions from dairy-grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68(3):243-255.
- Steinfeld, HP; Gerber, T; Wassenaar, V; Castel, M; Rosales, F; de Haan, C. 2009. La larga sombra del ganado – problemas ambientales y opciones. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), Roma, Italia. 464 p.
- Veldkamp, E. 1993. Soil Organic Carbon Dynamics in Pastures Established After Deforestation in the Humid Tropics of Costa Rica. Tesis Ph.D. Wageningen, Holand. Wageningen University. 35 p.
- Veldkamp, E; Keller, M; Núñez, M. 1998. Effect of management on N₂O and NO emissions from soils in the humid tropics of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles* 12(1): 71-79.
- Venterea, RT; Parkin, TB; Cárdenas, L; Petersen, SO; Pedersen, AR. 2012. Data analysis considerations. *In*: de Klein, C; Harvey, M, (eds.). Nitrous oxide chamber methodology guidelines. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. Wellington, New Zealand. p. 95-121.