



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Determinación de emisiones de metano y óxido nitroso generadas en plantaciones de arroz en Guanacaste, Costa Rica

Determination of emissions of methane and nitrous oxide in rice plantations in Guanacaste, Costa Rica

Jorge Herrera ^a, Víctor H. Beita ^b, David Solórzano ^c, Hazel Argüello ^d y Agustín Rodríguez ^e

^a Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr. ^b Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, victor.beita.guerrero@gmail.com. ^c Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, david.solorzano.arias@una.cr. ^d Investigadora del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, hazelrag@gmail.com. ^e Investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, agustineltin@gmail.com.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza
Enrique Leff, UNAM, México
Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica
Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica
Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica
Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Determinación de emisiones de metano y óxido nitroso generadas en plantaciones de arroz en Guanacaste, Costa Rica

Jorge Herrera, Víctor H. Beita, David Solórzano, Hazel Argüello y Agustín Rodríguez

J. Herrera (jorge.herrera.murillo@una.cr), V. Beita (victor.beita.guerrero@gmail.com), D. Solórzano (david.solorzano.arias@una.cr), H. Argüello (hazelrag@gmail.com) y A. Rodríguez (agustineltin@gmail.com) son investigadores en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (Costa Rica).

Resumen

Se midieron los flujos de emisión de metano y óxido nitroso en diez plantaciones de arroz ubicadas en el cantón de Liberia, Guanacaste, trabajando con al menos cuatro variedades de arroz y dos tipos de suelo, en el período comprendido de agosto 2012 a abril 2013. Para la determinación de los flujos se utilizó la técnica de la cámara estática, tomando cuatro muestras de gas del aire ubicado en el espacio superior de la cámara y usando una jeringa de plástico de 12 ml a 0, 10, 20 y 30 min después de la ubicación de la cámara. El análisis de las muestras se realizó con un cromatógrafo de gases equipado con detectores FID y ECD. Se registraron promedios de flujo de metano y óxido nitroso comprendidos entre 0,12 - 1,9 kg ha⁻¹d⁻¹ y 0,11 - 1,1 mg ha⁻¹d⁻¹, respectivamente, y no

Abstract

Methane and nitrous oxide emissions fluxes were measured in ten rice plantations located in Liberia, Guanacaste, working at least with four varieties of rice and two types of soil in the period August 2012 - April 2013. For the determination of flows static camera technique were used taking four air gas samples located in the headspace of the chamber using a plastic syringe of 12 ml at 0, 10, 20 and 30 min after camera location. The gas samples were analyzed with a gas chromatograph, equipped with FID and ECD. Averages of flow methane and nitrous oxide were recorded between 0,12 to 1,9 kg ha⁻¹d⁻¹ and 0,11 - 1,1 mg ha⁻¹d⁻¹, respectively, and no significant difference was found ($p < 0,05$) in the values

Introducción

El cultivo de arroz, utilizando la técnica de inundación de las plantaciones, es una importante fuente de emisión antropogénica de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), dos gases de efecto invernadero directos con potenciales de calentamiento global de 25 y 298 veces mayor que el dióxido de carbono (CO₂), en un horizonte temporal de 100 años (IPCC, 2007).

La concentración actual de metano en la atmósfera es de cerca de 1,84 ppmv (Datta et al., 2011) y se emiten alrededor de 592 Tg de CH₄ en el nivel mundial por año, de los cuales aproximadamente 550 Tg se pierden en varios sumideros (Forster et al., 2007). De estas emisiones totales, las actividades antropogénicas representan el 60 % del inventario global de CH₄, siendo el cultivo del arroz una fuente importante que contribuye entre el 5 y el 20 % a la emisión total de este compuesto (Insum y Wett, 2008).

El metano en las plantaciones de arroz inundadas se origina a partir del

se encontró una diferencia significativa ($p < 0,05$) en los valores entre las distintas variedades de arroz y los tipos de suelos objeto del diseño experimental.

Palabras clave: flujos de emisión de metano y óxido nitroso, cultivo de arroz, Guanacaste-Costa Rica.

between different rice varieties and soil types subject experimental design.

Keywords: methane and nitrous oxide emission fluxes, rice plantation, Guanacaste-Costa Rica.

establecimiento de condiciones anaerobias en el sistema, en donde este gas se emite a través de las capas del suelo ya sea por ebullición, difusión a través de la capa de agua de inundación o mediante la aerénquima de las plantas (Aulakh et al., 2001). La mineralización completa de la materia orgánica en ambientes anaeróbicos, donde las concentraciones de sulfatos y nitratos son bajas, se produce a través de la fermentación metanogénica que origina CH_4 y CO_2 . Esta transformación requiere acciones sucesivas de cuatro poblaciones de microorganismos que degradan moléculas complejas en compuestos más simples:

- hidrólisis de polímeros biológicos en los monómeros (glúcidos, ácidos grasos, aminoácidos) por una microflora hidrolítica que puede ser aeróbica, o facultativamente, o estrictamente anaeróbica;
- acidogénesis a partir de compuestos monoméricos y compuestos intermedios formados durante la fermentación (producción de ácidos grasos volátiles, ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2) por una microflora fermentativa que puede ser facultativamente anaeróbica o estricta;
- acetogénesis de los metabolitos anteriores por una microflora microbiana o homoacetogénica, y
- metanogénesis a partir de los compuestos simples que pueden ser utilizados por los metanógenos (en particular, H_2



A. Baltodano. Arrozales, Guanacaste, Costa Rica.

+ CO₂ y acetato), que constituye el último paso de la fermentación metanogénica.

Las dos vías mayoritarias de formación de metano en ambientes donde la descomposición orgánica de material es importante son la acetotrófica o la reducción de CO₂ por acción del H₂.

A pesar del bajo número de especies metanogénicas que pueden utilizar el acetato como fuente de carbono (14 %), los acetotrofos generalmente se consideran responsables de alrededor de dos tercios del CH₄ producido (Yu et al., 2004).

Estudios recientes (Beaulieu et al., 2008; Cai et al., 1997; Dobbie y Smith, 2003; Khalil et al., 2002; Kroeze et al., 1999; Toyoda et al., 2011) han demostrado que se emiten cantidades importantes de N₂O desde las plantaciones de arroz, las cuales pueden atribuirse al efecto combinado de la fertilización con nitrógeno y a la gestión del agua en la plantación (Nishimura et al., 2004; Yu et al., 2004). El óxido nitroso es producido por bacterias quimiolitótrofas oxidantes de amonio a través del proceso de nitrificación-desnitrificación, así como por heterótrofos desnitrificantes, en presencia de amonio (NH₄⁺), nitrato (NO₃⁻), carbono orgánico biodegradable (C) y un suministro temporal de oxígeno restringido (Aulakh et al., 2001).

Las emisiones de metano y óxido nitroso en plantaciones de arroz muestran una gran variabilidad resultante de la influencia de un complejo conjunto de factores, tales como el transporte y la naturaleza de la materia orgánica, la morfología



A. Baltodano. Arrozales, Guanacaste, Costa Rica

del cultivo, el tipo de suelo, la naturaleza del fertilizante aplicado, la concentración atmosférica de fondo, la gestión del agua en la plantación (Zou et al., 2005; Liu et al., 2010), la topografía y geomorfología del terreno, entre otras (Gupta et al., 2009).

La utilización de fertilizantes afecta las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del suelo, ya sea por influir en el crecimiento de la planta de arroz (desarrollo de aerénquima y formación de raíz), lo cual propicia modificaciones en la comunidad microbiana del suelo (metanógenos y metanotrofos), o por cambios en las diferentes propiedades físico-químicas del suelo. La adición de fertilizantes nitrogenados al suelo aumenta la emisión de CH₄ en un 97 % y reduce la absorción de CH₄ en el suelo en un 34 %. Este tipo de fertilizante estimula la producción de CH₄ en suelos mientras que inhibe la oxidación de CH₄ en el suelo y ocasiona el descenso de su absorción (Bodilier, 2011).

El objetivo del presente artículo es mostrar los resultados de la medición de flujos de metano

Tabla 1. Características de las áreas de plantación de arroz donde se efectuaron las mediciones de flujos de metano y óxido nitroso. Época lluviosa de 2012

Lote	Área (Ha)	Área sembrada durante el invierno 2012 (Ha)	Variedad de arroz plantado	Tipo de suelo
Tres lagunas	140	140	Inta Puita	Iceptisol
Zapal	68	68	Palmar 18	Iceptisol
Algodones # 1	60	60	CL Guri/Puita	Iceptisol
Playitas	83	68	Inta Puita	Iceptisol
Presas	115	115	Inta Puita	Iceptisol/Vertisol
Pasquiel	70	60	Inta Puita	Vertisol
Bancales Arriba	48	48	XI 723+XP744+Inov ST	Iceptisol
Enaguas	83	83	CL-745+Inov	Iceptisol
Río Seco #1 Norte	114	114	Inta Puita	Iceptisol
Río Seco #3 Norte	102	102	Inta Puita	Iceptisol

y óxido nitroso en plantaciones de arroz ubicadas en una región de la provincia de Guanacaste –Costa Rica–, bajo la influencia de distintas variables (diferentes variedades de arroz y variaciones en el tipo de suelo), con el fin de realizar una contribución preliminar a la construcción de una métrica nacional para el cálculo de emisiones en este tipo de actividades.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

Las mediciones de flujos de metano y óxido nitroso se ejecutaron en diez lotes de plantación de arroz ubicados

en el cantón de Liberia, Guanacaste, durante el período lluvioso de 2012 (julio-noviembre) y en la época seca de 2013 (enero-abril), de acuerdo con las características indicadas en la tabla 1. En cada uno de los lotes se seleccionó un área de una hectárea para realizar la campaña de toma de muestras. El programa de fer-

tilización aplicado durante la siembra fue uniforme en todos los lotes y se puede observar en la tabla 2.

Medición de flujos de metano y óxido nitroso

Los flujos de metano y óxido nitroso se determinaron utilizando la técnica de la cámara estática. Las cámaras se construyeron empleando un tubo de cloruro de polivinilo cilíndrico opaco con un diámetro medio de 36 cm y una altura efectiva de 50 cm. Cada cámara estaba equipada con un ventilador

Tabla 2. Programa de fertilización aplicado durante la siembra de las plantaciones de arroz donde se efectuaron las mediciones de flujos de metano y óxido nitroso

Tipo de fertilización	Días después de germinación	Fórmula aplicada	kg/ha
Fertilización I	1	8-40-12 o 10-50-0 (NPK)	300
	1	KCl	200
Fertilización II	22	Urea	300
Fertilización III	65	26-0-26 (NPK)	200

Tabla 3. Ajuste de las condiciones para el análisis cromatográfico de CH₄ y N₂O

Condición	Metano	Óxido nítrico
Temperatura del puerto de inyección (°C)	200	200
Temperatura de la columna (°C)	35	35
Detector	Ionización de llama (FID)	Captura de electrones (ECD)
Temperatura del detector (°C)	300	250
Flujo de gas de arrastre (ml/min)	12	6
Columna	PLOTQ	Porapak Q

accionado por una batería seca ubicada en la parte superior de la cámara para asegurar una mezcla adecuada del aire dentro de la cámara, y un pequeño puerto de muestreo lateral utilizado para tomar las muestras. En cada lote, las cámaras se colocaron de forma que la parte inferior de la cámara se encontrara siempre bajo el nivel de agua del arrozal para asegurar un sellado hermético a los gases. Las mediciones de flujo se llevaron a cabo por duplicado en un mismo sitio de muestreo. Los flujos de CH₄ y N₂O se midieron con una frecuencia semanal desde el inicio de la siembra y se finalizaron una semana antes de la cosecha. Dos colinas (es decir, seis plantas) fueron cubiertas por cada cámara, en promedio, durante los muestreos. Las cámaras se colocaron en el sitio de muestreo por períodos no superiores a 40 minutos, con el fin de no generar microclimas dentro de ellas. Los muestreos se realizaron siempre en horas de la mañana.

Durante la medición del flujo se colectaron cuatro muestras de gas del aire ubicado en el espacio superior de la cámara usando una jeringa de plástico de 12 ml a 0, 10, 20 y 30 min después de la ubicación de la cámara. Se tomaron 11 ml del aire dentro de la cámara y se colocaron en un tubo de vidrio al vacío, de 10 ml. La jeringa se insertó varias veces para mezclar el aire dentro de la cámara antes de sacar la muestra. Todas las muestras fueron transportadas al laboratorio y guardadas en el refrigerador para ser analizadas al día siguiente, a más tardar. Los flujos de metano J (mg CH₄ m⁻² h⁻¹) se determinaron utilizando la siguiente ecuación:

$$J = \frac{dc}{dt} \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H_1 \quad (1)$$

Donde dc/dt (mol h⁻¹) es la tasa de cambio de la concentración; M (mg mol⁻¹) es la masa molar del CH₄ o N₂O, según corresponda; P (Pa) es la presión atmosférica en el sitio de muestreo; T (K) es la temperatura absoluta registrada durante el tiempo de muestreo; V_0 (m³), P_0 (Pa), T_0 (k) son el volumen molar, la presión atmosférica y la temperatura absoluta a condiciones estándar, respectivamente; H (m) es la altura de la cámara sobre la superficie del agua.

Análisis químico

Las muestras se analizaron usando un cromatógrafo de gases Agilent 7890A, de acuerdo con las condiciones indicadas en la tabla 3.

Con ambos gases se utilizó una curva de calibración para la cuantificación de las muestras, utilizando cilindros de gas de concentraciones estándar certificados (marca Scott) de 0,5, 1, 4, 10 y 15 mmol/mol. El límite de detección es de 1 y 0,2 mg/m²d para metano y óxido nítrico, respectivamente. La tasa de aumento de CH₄ y N₂O en el aire dentro de la cámara se calculó a partir de una regresión lineal con el cambio de la concentración de gas dentro de la cámara, en función del tiempo. Se hicieron correcciones para la temperatura y la presión.

Tabla 4. Flujos de emisión de CH₄ y N₂O obtenidos para cada uno de los lotes de plantaciones de arroz evaluados en el 2012-2013

Lote	Número de muestras	CH ₄ (kg/ha*día)	N ₂ O (mg/ha*día)	Variedad de arroz plantado	Tipo de suelo
Tres lagunas	31	1,9 ± 0,6	0,4 ± 0,2	Inta Puita	Iceptisol
Zapal	30	0,9 ± 0,5	0,7 ± 0,4	Palmar 18	Iceptisol
Algodones # 1	28	0,12 ± 0,08	0,6 ± 0,3	CL Guri/Puita	Iceptisol
Playitas	30	1,1 ± 0,5	1,0 ± 0,4	Inta Puita	Iceptisol
Presas	30	0,14 ± 0,09	1,1 ± 0,5	Inta Puita	Iceptisol/Vertisol
Pasquiel	25	0,4 ± 0,2	0,11 ± 0,06	Inta Puita	Vertisol
Bancales Arriba	30	0,8 ± 0,5	0,5 ± 0,3	Xl 723+XP744+Inov ST	Iceptisol
Enaguas	26	0,2 ± 0,1	0,7 ± 0,4	CL-745+Inov	Iceptisol
Río Seco #1 Norte	31	0,5 ± 0,3	0,6 ± 0,3	Inta Puita	Iceptisol
Río Seco #3 Norte	31	0,7 ± 0,3	0,4 ± 0,2	Inta Puita	Iceptisol

[*] El dato expresado como “±” corresponde a la desviación estándar del factor.

En forma adicional a la toma de muestras de flujos de gases, se monitoreó la altura de la planta, la cual se midió en centímetros, desde el suelo hasta el ápice de la panícula del tallo más alto.

Análisis estadístico

El valor de los flujos de CH₄ y N₂O para cada zona se calculó promediando las seis repeticiones para cada día de muestreo. El test de Mann-Whitney U fue utilizado para determinar si existían diferencias en los flujos instantáneos de CH₄ entre zonas. Los análisis de varianza (ANOVA), en los que cada campaña de muestreo se trató como una variable independiente, se utilizaron para probar si existen diferencias significativas en los flujos de CH₄ y N₂O entre lotes.

Resultados y discusión

Los promedios de flujo de metano y óxido nitroso obtenidos para las mediciones en los diferentes lotes de arroz, con su respectiva desviación

estándar, se presentan en la tabla 4. Al analizar los resultados se puede inferir que no existe una diferencia significativa ($p < 0,05$) en los valores de flujos de metano y óxido nitroso entre las distintas variedades de arroz y los tipos de suelos objeto del diseño experimental.

Durante las primeras etapas de crecimiento del cultivo (plántulas con alturas promedio inferiores a 30 cm), los flujos de emisión de CH₄ se registraron en el rango de 0,01 a 0,30 kg ha⁻¹ d⁻¹ (figura 1). Dichos valores son significativamente ($p < 0,05$) más bajos que los registrados al final de la etapa de producción, justo antes de la cosecha, donde se alcanzaron valores de 2,89 a 4,42 kg ha⁻¹ d⁻¹. Lo anterior puede deberse a la baja tasa de producción de metano en el suelo, la mala conductividad del CH₄ en este medio y al escaso desarrollo de la estructura interna de la aerénquima de la planta en las primeras etapas (Parlanti et al., 2011).

Trabajos de investigación similares han establecido que aproximadamente el 90 % de las emisiones de CH₄ en las plantaciones de arroz son

conducidas a la atmósfera mediante el transporte a través de la aerénquima de la planta (Aulakh et al., 2002). En el presente estudio, si se realiza una correlación entre los flujos de emisión en las plantaciones de arroz versus la altura de la planta, se encuentran coeficientes de Spearman comprendidos en el rango entre 0,789 y 0,885, lo que evidencia el importante aporte del desarrollo de estructuras fisiológicas internas en la planta en el rol de las emisiones de este gas.

La emisión de CH₄ acumulada registrada en época lluviosa resultó significativamente ($p < 0,05$) más alta que en el período seco (tabla 5). Corton et al. (2000) y Epule et al. (2011) también han registrado emisiones significativamente mayores durante la estación húmeda en plantaciones de arroz. Lo anterior puede deberse a que, mientras mayor sea el espesor de la capa de agua colocada sobre el suelo en las plantaciones, más grandes serán los potenciales de reducción en el nivel del suelo.

Corton et al. (2000) han reportado que durante la época lluviosa se tiende a observar incrementos de hasta un 10 % en el contenido de carbono orgánico del suelo, en comparación con la época seca, en plantaciones de arroz. Una condición de potencial mayor de reducción en el suelo, sumada a un incremento en los contenidos de carbono orgánico durante el período de lluvias, puede haber facilitado la actividad de los organismos metanogénicos lo cual desencadenó una mayor producción de CH₄ en las plantaciones.

Al analizar el comportamiento de los datos durante todo el período de siembra, se encontró que los flujos de emisión de CH₄ aumentaban

Tabla 5. Variación de los flujos de emisión de CH₄ obtenidos en época lluviosa respecto de los correspondientes al período seco

Lote	Factor de emisión CH ₄ (kg/ha*día)	
	Lluviosa	Seca
Tres lagunas	2,03	1,79
Zapal	0,99	0,66
Algodones #1	0,15	0,10
Playitas	1,84	0,72
Presas	0,11	0,19
Pasquiel	0,64	0,35
Bancales Arriba	0,95	0,73
Enaguas	0,32	0,14
Río Seco #1 Norte	0,31	0,77
Río Seco #3 Norte	1,08	0,61

significativamente en los períodos posteriores al tratamiento de los lotes con fertilizantes nitrogenados. En la mayoría de los casos se reportaron aumentos comprendidos entre el 10 y 22 %, con respecto a los valores registrados en la semana anterior, hecho que muestra una tasa de cambio mayor a la acumulada en el tiempo. La aplicación de fertilizantes nitrogenados disminuye el valor de la relación C/N y aumenta la actividad microbiana del suelo, lo que conduce a una mayor producción de CH₄ en la mayor parte del suelo (Liang et al., 2011).

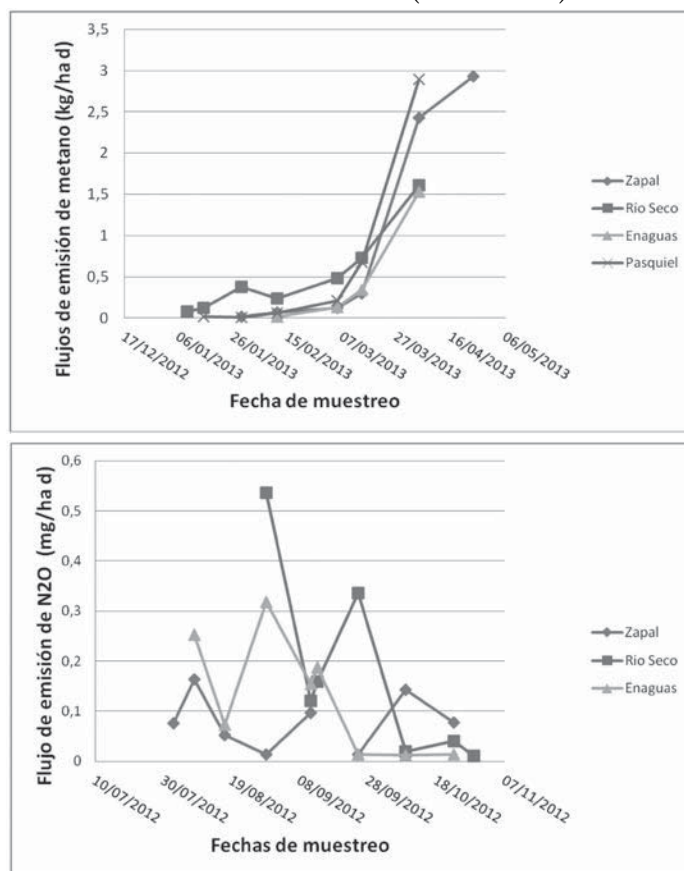
En forma adicional, el hecho de que el fertilizante aplicado contuviera P y K podría haber causado un incremento en la emisión de CH₄, ya que la limitación de estos dos elementos en el suelo provoca condición de estrés fisiológico en la planta. La liberación de los ácidos orgánicos a la rizosfera, como exudados de las raíces bajo condiciones de P o K deficientes, pueden aumentar la producción de CH₄ en la rizosfera de las plantas. Dicho incremento en las emisiones de metano, generado después de la aplicación de fertilizantes N-P-K, resultó ser menor en época lluviosa (15-18 %) que en la temporada seca (8-12 %), situación

que se puede atribuir a una mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo, la cual indiscutiblemente afecta el valor de la relación C/N.

Si se analiza el comportamiento de las emisiones de N_2O durante todo el proceso de cultivo, se puede observar que este gas presenta un comportamiento inverso al caso del metano, ya que los flujos de emisión más altos se registran al inicio del cultivo y van disminuyendo paulatinamente conforme avanza el período de cosecha (figura 1). El incremento de las emisiones de N_2O en el período de crecimiento inicial observado, en el presente estudio, puede atribuirse probablemente al aumento del contenido de carbono orgánico en el suelo. La disponibilidad de carbono orgánico se considera un factor importante que influye en los procesos de nitrificación y las reacciones de desnitrificación que ocurren simultáneamente en los micrositios aeróbicos y anaeróbicos del suelo. Los picos de emisión que se observan en el gráfico corresponden con los períodos de fertilización, que facilitan una mayor disponibilidad de sustratos para reacciones de nitrificación y desnitrificación. Diversos estudios han demostrado que se genera un incremento en los niveles de N_2O , posterior a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Aulakh et al., 2001), e inclusive dichos valores pueden permanecer altos durante varias semanas, antes de regresar a los niveles de fondo después de la fertilización.

Tal como sería de esperar, los valores de flujos de emisión de N_2O obtenidos en época seca resultaron ser mayores a los correspondientes al período lluvioso (tabla 6). Durante la temporada de lluvias, se incrementa el contenido de carbono orgánico en el suelo. En muchos casos, ese incremento se puede atribuir a la exudación radicular resultante del aumento de la biomasa de raíces del cultivo. Con el aumento de la descomposición de residuos de la planta en el suelo, el carbono orgánico disuelto en el suelo tiende a aumentar y genera reducciones significativas en las emisiones de N_2O (Huang et al., 2004).

Figura 1. Variación temporal de los flujos de emisión de metano y óxido nítrico en las plantaciones de arroz evaluadas (2012-2013)



Conclusiones

Como parte del alcance del presente trabajo se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- Existe una relación directa entre el crecimiento de las plantas de arroz y las emisiones de metano generadas en este cultivo, la cual se puede deber al desarrollo fisiológico de estructuras como la aerénquima.
- Las emisiones de metano registradas en época lluviosa resultaron ser mayores a los valores reportados para el período seco, lo que evidencia una posible influencia del contenido de carbono en el suelo y de la altura de



A. Baltodano. Arrozales, Guanacaste, Costa Rica

la capa de agua presente en la plantación, las cuales favorecen las condiciones de reducción en el suelo. Este comportamiento es inverso al registrado para el caso del óxido nítrico, donde el aumento de la descomposición de residuos de la planta en el suelo y el carbono orgánico disuelto en el suelo tienden a aumentar en época lluviosa y genera reducciones significativas en las emisiones de este gas.

- La inexistencia de diferencias significativas entre los flujos de CH_4 y N_2O registrados para diferentes variedades de arroz y tipos de suelo debe ser tomada con cautela, ya que el trabajo realizado corresponde a lotes ubicados en un mismo lugar geográfico, en donde la posibilidad de que se presenten gradientes importantes de concentración en especies químicas como el hierro es menor.
- En el caso del metano, el factor de emisión obtenido resulta ser menor al reportado por el Instituto Meteorológico Nacional y al correspondiente al IPCC; sin embargo, se debe realizar estudios en otras áreas geográficas para lograr una mayor representatividad que permita avanzar al desarrollo de un verdadero factor nacional de emisión.

Referencias

- Aulakh, M. S., Wassmann, R. y Rennenberg, H. (2001). Methane emissions from rice fields quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. *Advances in Agronomy* 70, 193-260.
- Aulakh, M. S., Wassmann, R. y Rennenberg, H. (2002). Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice-growing countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 91, 59-77.
- Bodilier, P. L. E. (2011). Interaction between nitrogenous fertilizers and methane cycling in wetland and upland soils. *Current opinion in environmental sustainability* 3 (5), 379-388.
- Cai, Z., Xing, G., Yan, X., Xu, H., Tsuruta, H., Yagi, K. y Minami, K. (1997). Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant Soil* 196, 7-14.
- Cheng, W. G., Yagi, K., Sakai, H. y Kobayashi, K. (2006). Effects of elevated atmospheric CO_2 concentrations on CH_4 and N_2O emission from rice soil: an experiment in controlled environment chambers. *Biogeochemistry* 77, 351-373.
- Corton, T. M., Bajita, J. B., Grospe, F. S., Pamplona, R. R., Asis, C. A., Wassmann, R., Lantin, R. S. y Buendia, L. V. (2000). Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 37-53.
- Crutzen, P. J. y Lelieveld, J. (2001). Human impacts on atmospheric chemistry. *Annual review of earth and planetary sciences* 29, 17-45.
- Datta, A., Santra, S. C. y Adhya, T. K. (2011). Relationship between CH_4 and N_2O flux from soil and their ambient mixing ratio in a riparian rice-based agroecosystem of

- tropical region. *Journal of Environmental Monitoring* 13 (12), 3469-3474.
- Dobbie, K. E. y Smith, K. A. (2003). Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* 9, 204-218.
- Epule, T. E., Peng, C. y Mafany, M. N. (2011). Methane emissions from paddy rice fields: strategies towards achieving a win-win sustainability scenario between rice production and methane emission reduction. *Journal of Sustainable Development* 4 (6), 188-196.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. y Van Dorland, R. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. En: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. y Miller, H. L. (Eds.) *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- Liang, B., Yang, X., He, X. y Zhou, J. (2011). Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. *Biology and Fertility of Soil* 47, 121-128.
- Liu, L. L. y Greaver, T. L. (2009). A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission. *Ecology Letters* 12, 1103-1117.
- Gupta, P. K., Gupta, V., Sharma, C., Das, S. N., Purkait, N., Adhya, T. K., Pathak, H., Ramesh, R., Baruah, K. K., Venkatratnam, L., Singh, G. y Iyar, C. S. P. (2009). Development of methane emission factor for Indian paddy fields and estimation of national methane budget. *Chemosphere* 74, 590-598.
- Huang, Y., Zou, J., Zheng, X., Wang, Y. y Xu, X. (2004). Nitrous oxide emission as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 973-981.
- Insum, H. y Wett, B. (2008). Control of GHG emission at the microbial community level. *Waste Management* 28 (4), 699-706.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007) *Working Group I. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Disponible en <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- Jagadamma, S., Lal, R., Hoefl, R. G., Nafiger, E. D. y Adey, E. A. (2007). Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil properties and their relationship to crop yield in the central Corn belt, USA. *Soil and Tillage Research* 95, 348-356.
- Kammann, C., Müller, C., Grünhage, L. y Jäger, H.-J. (2008). Elevated CO₂ stimulates N₂O emissions in permanent grassland. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 2194-2205.
- Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A. y Shearer, M. J. (2002). Atmospheric nitrous oxide: patterns of global change during recent decades and centuries. *Chemosphere* 47, 807-821.
- Kroeze, C., Mosier, A. y Bouwman, L. (1999). Closing the global N₂O budget: a retrospective analysis 1500-1994. *Global Biogeochemical Cycles* 13, 1-8.
- Ma, J., Ma, E., Xu, H., Yagi, K. y Cai, Z. (2009). Wheat straw management affect CH₄ and N₂O emissions from rice fields. *Soil Biology & Biochemistry* 41 (5), 1022-1028.
- Nishimura, S., Sawamoto, T., Akiyama, H., Sudo, S. y Yagi, K. (2004). Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles* 18, 1-10.
- Parlanti, S., Kudahettige, N. P., Lombardi, L., Sodi, M. A., Alpi, A., Pireta, P. y Puciarreallo, C. (2011). Distinct mechanisms for aerenchyma formation in leaf sheaths of rice genotypes displaying a quiescence or escape strategy for flooding tolerance. *Annals of Botany* 107 (8), 1335-1343.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. y Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 247-266.
- Toyoda, S., Yano, M., Nishimura, S., Akiyama, H., Hayakawa, A., Koba, K., Sudo, S., Yagi, K., Makabe, A. y Tobari, Y. (2011). Characterization and production and consumption processes of N₂O emitted from temperate agricultural soils determined via isotopomer ratio analysis. *Global Biogeochemical Cycles* 25, GB2008. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1029/2009GB003769>.
- Wrage, N., Velthof, G. L., van Beusichem, M. L. y Oenema, O. (2001). Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 1723-1732.
- Yu, K. W., Chen, G. X. y Patrick, W. H. (2004). Reduction of global warming potential contribution from a rice field by irrigation, organic matter, and fertilizer management. *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB3018.
- Zou, J. W., Huang, Y., Jiang, J. Y., Zheng, X. H. y Sass, R. L. (2005). A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles* 19, 1-9.