



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Determinación de emisiones de metano en tres embalses hidroeléctricos en Costa Rica

Determination of methane emissions in three hydroelectric dams in Costa Rica

Jorge Herrera ^a, José Félix Rojas ^b, Susana Rodríguez ^c, Antonieta Rojas ^d y Víctor H. Beita ^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 Químico e Investigador s investigador en dicho Laboratorio, jfrojas60@yahoo.com. ^c Investigadora de la Universidad de Costa Rica, susana.rodriguez@ucr.ac.cr. Investigadora en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, unaqm@yahoo.com. Investigador en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, victor.beita.guerrero@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 en tres embalses hidroeléctricos en Costa Rica

Jorge Herrera, José F. Rojas, Susana Rodríguez, Antonieta Rojas y Víctor H. Beita

J. Herrera (jorge.herrera.murillo@una.cr), J. Rojas (jfrojas60@yahoo.com), A. Rojas (unaqm@yahoo.com) y V. Beita (victor.beita.guerrero@gmail.com) son investigadores en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. S. Rodríguez (susana.rodriguez@ucr.ac.cr) es investigadora en la Universidad de Costa Rica.

Resumen

Se midieron los flujos de las emisiones de metano (CH_4) generados a través de la interfaz aire-agua en tres embalses hidroeléctricos en Costa Rica (Brasil, Nuestro Amo y Lago Cote), durante tres años (2009-2011), utilizando la técnica de la cámara estática flotante. Las muestras fueron tomadas durante una semana, tanto de día como de noche, a través de cuatro campañas cada año. Para la determinación de los flujos de metano, la superficie del agua de cada embalse se dividió en cuadrículas de 4 x 4 igualmente espaciadas. Durante este período, los flujos de emisión de CH_4 mostraron valores promedio que oscilaron así: entre 759 y 4282 en el embalse Brasil, entre 77 y 733 en el embalse Nuestro Amo

Abstract

The emission fluxes of methane (CH_4) across air-water interface were measured in three hydroelectric dams in Costa Rica (Brasil, Nuestro Amo and Cote Lake) during three years cycle (2009-2011), using the floating static chamber technique. Samples were taken during one week, both day and night time, through four campaigns per year. For the methane flux determination, the water surface was divided in a 4x4 grid equally spaced. During this period, CH_4 fluxes showed average values that ranged from 759 - 4282 (Brasil), 77 - 733 (Nuestro Amo) and 10,9 - 44,2 $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Cote Lake), respectively. The fluxes of CH_4 showed both strong seasonal and diurnal variations. CH_4

Introducción

En diferentes partes del mundo, se están realizando esfuerzos para establecer políticas orientadas al desarrollo de inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cada vez más precisos, para cada uno de sus sectores productivos, como base para determinar el potencial real de mitigación por sector y así poder priorizar de mejor forma el desarrollo de proyectos de reducción de emisiones (Bambace et al., 2007). El sector energético es uno de los más importantes, debido a la magnitud de sus emisiones (IPCC, 2010). En Costa Rica, el sistema eléctrico depende en gran parte de fuentes "limpias" renovables como la energía hidroeléctrica, lo cual deja el uso de combustibles fósiles para cubrir los picos horarios de mayor demanda y la época seca. El sistema eléctrico nacional a diciembre del 2011 tenía una capacidad instalada efectiva de 2590 MW, de los cuales un

y entre 10,9 y 44,2 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ en Lago Cote. Los flujos de CH₄ mostraron fuertes variaciones tanto estacionales como diurnas. Las tasas de emisión de CH₄ resultaron ser mayores durante la época seca, y las relaciones entre flujos nocturnos de metano con respecto a los diurnos aumentaron de 0,35 a 0,72 en Brasil y de 0,43 a 0,64 en Nuestro Amo, en esa temporada. Los flujos de emisión de CH₄ se correlacionaron positivamente con la temperatura del suelo, el nivel freático y las concentraciones de clorofila en el agua.

Palabras clave: flujos de metano, embalses hidroeléctricos, Costa Rica.

emission rate was highest in dry season and there was a significant difference for CH₄ emissions between day and night, the ratios between nighttime to daytime methane flux increased from 0,35 to 0,72, 0,43 to 0,64 for Brasil and Nuestro Amo, respectively in this season. CH₄ emission was correlated positively with soil temperature, water table and chlorophyll in water concentrations.

Keywords: Methane Fluxes, Hydroelectric dams, Costa Rica.

65 % corresponde a plantas hidroeléctricas, un 21 % a plantas térmicas, un 8 % a plantas geotérmicas, un 5 % a plantas eólicas y un 1 % a biomasa (ICE, 2012).

Sin embargo, muchos autores han argumentado que los embalses hidroeléctricos, especialmente en las zonas tropicales, no son tan “limpios”, en materia de huella de carbono, como se consideraba anteriormente (Fearnside, 2002; St. Louis et al., 2000). Estudios recientes han demostrado que las emisiones de CH₄ de los embalses hidroeléctricos tropicales pueden comprender una fracción nada despreciable del metano generado antropogénicamente (Fearnside, 2004; Bambace et al., 2007).

El metano es uno de los principales gases traza atmosféricos, el cual contribuye de manera significativa (15 %) al calentamiento global, debido a su forzamiento radiativo positivo. En general, las emisiones de CH₄ de los embalses y humedales dependen de una amplia gama de factores geográficos, geofísicos, bioquímicos, entre otros (Duchemin et al., 2000; Melack et al., 2004; Whalen, 2005). El metano es producido por metanógenos, un grupo de bacterias anaerobias que requieren un potencial redox muy bajo, el uso de CO₂, H₂ o acetato, y se basan en un conjunto común de enzimas para la descomposición de materia orgánica. En los embalses tropicales, las principales fuentes de



Ana R. Ramírez. Lago Arenal.

materia orgánica son la vegetación original que se inunda, así como la materia orgánica alóctona y autóctona. La materia orgánica alóctona es aquella que se encuentra disuelta y particulada, barrida de las costas vecinas y cuencas de drenaje. La materia orgánica autóctona es la biomasa que crece dentro del propio depósito. La cantidad de carbono alóctona es significativamente mayor en los embalses que en los cuerpos de agua naturales, debido a su velocidad de flujo más grande (Bambace et al., 2007).

Los flujos de CH_4 en la superficie del embalse, especialmente a través de burbujeo, son más pequeños en aguas más profundas, ya que tienen una mayor probabilidad de ser oxidados antes de llegar a la interfaz agua-aire (Keller y Stallard, 1994; Joyce y Jewell, 2003). Los embalses tropicales grandes y profundos suelen presentar patrones de estratificación térmica, lo que evita que el agua se mezcle y difunda entre las aguas profundas y las poco profundas. Esta situación favorece un perfil de concentración de CH_4 que aumenta rápidamente con la profundidad hasta que se alcanza el nivel de saturación local. Los perfiles de concentración de metano pueden diferir de un depósito a otro, o incluso dentro del mismo depósito. Esta variabilidad depende de la cantidad de materia orgánica inundada, las entradas alóctonas y las condiciones redox del agua. Las concentraciones de CH_4 también fluctúan en el tiempo, de manera que se muestran correlaciones significativas con las variaciones en las variables climáticas y el tiempo, como la temperatura y la precipitación (Nozhevnikova et al., 1997; Lima, 2005).

El objetivo del presente trabajo es medir los flujos de las emisiones de metano, en tres embalses hidroeléctricos diferentes en Costa Rica, con el fin de analizar las variaciones espaciales y temporales, así como el posible efecto de la calidad de las aguas, que alimentan los embalses, sobre las emisiones de metano.

Materiales y métodos

Muestreo de campo

Se seleccionaron tres embalses hidroeléctricos de acuerdo con su naturaleza, patrón de uso de suelo en las áreas cercanas al embalse, tipo y calidad química del cuerpo de agua que alimenta el embalse, entre otros. A continuación se detallan los embalses estudiados:

- Embalse hidroeléctrico Brasil ($9^{\circ}56'46,06$ "N, $84^{\circ}13'22,68$ " W): se ubica en la localidad de Brasil de Santa Ana, San José. Cuenta con un volumen útil de $540\ 000\ \text{m}^3$, para un caudal de diseño de $38\ \text{m}^3/\text{s}$.
- Embalse hidroeléctrico Nuestro Amo ($9^{\circ}56'21,20$ "N, $84^{\circ}15'58,30$ " W): utiliza las aguas del río Ciruelas ($1\ \text{m}^3/\text{s}$), las cuales desvía al río Segundo (ambos ríos urbanos con altos niveles de contaminación), a través de dos canales y dos túneles, con una longitud total de conducción de 2,7 km. La planta tiene un flujo máximo, a través de sus turbinas de $5,5\ \text{m}^3/\text{s}$ y una capacidad instalada de 7,5 MW.
- Embalse hidroeléctrico Lago Cote ($10^{\circ}34'57,91$ "N, $84^{\circ}54'24,34$ " W): depósito de agua natural situado en la provincia de Alajuela, cantón 15 Guatuso, distrito 03 Cote y en la provincia de Guanacaste, cantón 08 Tilarán, distrito 07 Arenal. El proyecto aprovecha las aguas del lago de Cote. La potencia en bornes del generador es 6 300 KW, para una caída neta media de 89,5 m y un caudal nominal de $8,00\ \text{m}^3/\text{s}$. La generación anual promedio se estima en 13,17 GWh.

Estos embalses fueron muestreados de enero de 2009 a mayo de 2011, tanto durante la estación seca (de diciembre a abril) como en la estación lluviosa (de mayo a noviembre) de cada

año. Las muestras fueron tomadas durante el día y la noche por una semana, al menos cuatro veces al año. Para la medición de los flujos de metano, la superficie del agua se dividió en cuadrículas de 4 m x 4 m igualmente espaciadas. Los flujos de metano se determinaron utilizando la técnica de la cámara estática flotante. Las cámaras se construyeron usando 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 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 para tomar las muestras.

Usando una jeringa de plástico de 12 ml a 0, 10, 20 y 30 min, se tomaron cuatro muestras del aire acumulado en el interior de la cámara y se colocaron en un tubo de vidrio al vacío de 10 ml. Durante cada toma de muestra se midió la temperatura del aire dentro de la cámara y se registró tanto la temperatura del agua como la presión barométrica. Todas las muestras fueron transportadas al laboratorio en una hielera y guardadas en el refrigerador para ser analizadas al día siguiente a más tardar. Los flujos de metano J ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) se determinaron empleando la siguiente ecuación:

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

Donde dc/dt (mol h^{-1}) es la tasa de cambio de la concentración; M (mg mol^{-1}) es la masa molar del CH_4 ; P (Pa) es la presión atmosférica en el sitio de muestreo; T (K) son la temperatura absoluta registrada durante el tiempo de muestreo; V_0 (m^3), P_0 (Pa), T_0 (K) es el volumen molar, la presión atmosférica y la temperatura absoluta a condiciones estándar, respectivamente; H (m) es la altura de cámara sobre la superficie del agua.

Análisis químico

Las muestras se analizaron usando un cromatógrafo de gases Agilent 7890A equipado con un puerto de inyección, un detector de ionización de llama (FID) operado a 200 °C y una columna capilar tipo PLOTQ. La temperatura del horno de la columna fue mantenida a 55 °C y se utilizó N_2 como gas portador a una velocidad de flujo de 30 ml min^{-1} .

Para la cuantificación de las muestras se empleó una curva de calibración, utilizando cilindros de gas de concentraciones estándar certificados (marca Scott) de metano (0,5, 1, 4, 10 y 15 mmol/mol). El límite de detección para el metano fue de 1 mg/m^3 . La tasa de aumento de CH_4 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.

Toma de muestras de agua y análisis químicos

En los tres embalses hidroeléctricos, se tomaron muestras de agua compuestas en el tiempo a volumen constante. Una submuestra de 500 ml se filtró al vacío, utilizando un filtro de fibra de vidrio de 47 mm marca GF/C Whatman, especial para el análisis de clorofila. Los filtros fueron refrigerados a -20 °C hasta su extracción con acetona al 90 %, durante 24 horas. El extracto obtenido se analizó con un espectrofotómetro UV-Visible (Marker et al., 1980). Las temperaturas del aire y el agua se midieron con un termómetro digital. El oxígeno disuelto, el pH, la demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno también fueron analizados en muestras de agua.

Los datos meteorológicos fueron recolectados *in situ*, simultáneamente con las mediciones de flujo. La temperatura del aire dentro de las cámaras se midió con un termómetro introducido en las

cámaras. Las temperaturas del sedimento a los 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm y 40 cm (por debajo de la superficie del sedimento) se determinaron con cuatro termómetros terrestres insertados en las profundidades correspondientes. La temperatura del agua se determinó mediante un termómetro de tabla utilizando una regla adyacente a cada cámara (Nakano et al., 2000; Zhu y Sun, 2005).

Análisis estadístico

El valor de los flujos de CH_4 , la temperatura del suelo, clorofila a, DQO, DBO, OD y pH para cada zona se calcularon 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 CH_4 entre microzonas. 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 tanto en los flujos de CH_4 como en los factores ambientales. Se utilizó el análisis de correlación de Spearman Rho, con el fin de evaluar si existen correlaciones significativas entre los flujos instantáneos de CH_4 , los factores ambientales y las características tanto del suelo como del agua de cada embalse hidroeléctrico. Adicionalmente, se utilizaron los análisis de regresión lineal y regresión lineal multivariado para cada embalse hidroeléctrico, con el objetivo de poder determinar los flujos de emisión de metano en términos de ciertas variables ambientales, tratadas como variables independientes. El efecto de una cierta variable se consideró significativo para $p < 0,05$ y extremadamente significativo para $p < 0,01$.

Resultados y discusión

Los valores de los flujos de metano (media \pm desviación estándar), medidos en cada una de las campañas de muestreo ejecutadas en los tres embalses hidroeléctricos, se muestran en la tabla

1. Los flujos de CH_4 mostraron valores promedio que oscilaron entre 759-4282, 77-733 y 10,9-44,2 $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para los embalses Brasil, Nuestro Amo y Lago Cote, respectivamente. Durante el período de estudio, el flujo de emisión de metano registrado para el embalse de Lago Cote (media: $28,6 \pm 0,5$) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fue significativamente menor que los registrados para los embalses de Brasil (media: $2\ 570 \pm 195$) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $p = 0,005$) y Nuestro Amo (media: 371 ± 32) $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $p = 0,005$). Lo anterior puede obedecer, entre otras variables, a la calidad química y los niveles de contaminación de las aguas de los ríos que abastecen dichos embalses. Al comparar los resultados obtenidos con los valores de flujos de emisión reportados para otros embalses hidroeléctricos, localizados en zonas tropicales (tabla 2), se puede observar que los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud para los embalses de Nuestro Amo y Lago Cote. En el caso del embalse Brasil, las emisiones obtenidas fueron mayores a las registradas, lo que puede deberse a la alta carga de materia orgánica contenida en las aguas superficiales que abastecen dicha planta hidroeléctrica.

Durante las campañas de muestreo realizadas, se observaron variaciones estacionales similares en los flujos de CH_4 medidos para los embalses de Brasil, Nuestro Amo y Lago Cote. Los flujos de CH_4 aumentaron durante la época seca y alcanzaron su valor máximo en temporada de marzo-abril para luego disminuir conforme avanzaba la época lluviosa. Por ejemplo, los flujos de CH_4 variaron de 3729 a 1411 $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para el embalse de Brasil, de la época seca a la lluviosa (tabla 1). La variación estacional de los flujos de CH_4 en este estudio fue controlada tanto por la tasa de cambio de la tabla de agua de los embalses como por la temperatura del suelo. Los flujos de metano mostraron correlaciones positivas significativas con todas las temperaturas del suelo, a excepción de la temperatura del suelo para la

Tabla 1. Valores promedios, máximos y mínimos para los flujos de metano ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) generados en tres embalses hidroeléctricos de Costa Rica (2009-2010)

Embalse	Brasil						Nuestro Año						Lago Cote					
	Secca 2009	Lluvia 2009	Secca 2010	Lluvia 2010	Secca 2011	Lluvia 2011	Secca 2009	Lluvia 2009	Secca 2010	Lluvia 2010	Secca 2011	Lluvia 2011	Secca 2009	Lluvia 2009	Secca 2010	Lluvia 2010	Secca 2011	Lluvia 2011
N	37	49	55	51	50	55	73	70	77	64	68	71	125	132	117	125	138	135
Promedio	2811	759	4282	1208	4095	2265	733	94,8	542	77,3	659	121,4	36,9	10,9	44,2	26,7	33,4	19,6
Máximo	4709	2970	5216	2895	6717	4883	1436	171,0	987	95,0	1027	204,5	82,0	18,0	103	182,0	96,0	46,0
Mínimo	976	117	3218	670	2932	324	98	18,0	218	43,0	229	59,9	9,0	5,0	5,1	3,0	1,0	11,0
Desviación estándar	725	824	1005	1207	1374	3604	671	64,7	127	32,5	83,5	42,1	22,6	5,1	22,9	44,7	31,9	16,2

Tabla 2. Flujos de metano registrados para algunos embalses hidroeléctricos localizados en zonas tropicales

Embalse	Flujo $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	Referencias
Miranda (Brasil)	240	Dos Santos et al., 2005
Tucurui (Brasil)	192	Dos Santos et al., 2006
Nam Leuk (Laos)	40	Abril et al., 2005
Lago Cote (Costa Rica)	29	Este estudio
Nuestro Año (Costa Rica)	371	Este estudio
Brasil (Costa Rica)	2 570	Este estudio

Tabla 3. Ecuaciones de regresión significativa ($p < 0,05$) para predecir los flujos de metano generados en los embalses hidroeléctricos muestreados

Flujos de metano	Chl a (x)	Temperatura del agua (x)	Temperatura del sedimento	Profundidad de la tabla de agua
CH_4 (y)	$y = 0,724 \ln x + 0,265$ ($R^2 = 0,846$, $p = 0,044$)	$y = 0,035^{0,241} x$ ($R^2 = 0,595$, $p = 0,03$)	$y = 0,0491^{0,108} x$ ($R^2 = 0,679$, $p = 0,006$)	$y = 0,071^{0,325} x$ ($R^2 = 0,714$, $p = 0,018$)

capa de superficie (tabla 3). El flujo de metano y la temperatura del suelo se correlacionaron positivamente en todas las represas hidroeléctricas con un patrón de orden exponencial. Estos resultados pueden reflejar el control de los procesos microbianos sobre los flujos de emisión de CH_4 , ya que, durante la época seca, las tablas de agua se encontraban más cerca de la superficie del suelo la mayor parte del tiempo, lo cual creó probablemente un entorno bueno para la ocurrencia de los procesos de reducción. Las mayores temperaturas del suelo, debajo de la tabla media del agua, durante la época seca, pueden haber promovido una mayor actividad metanógena, fenómeno que fue reportado por Wagner et al. (2007), y, por lo tanto, aceleraron las emisiones de CH_4 .

Los flujos de metano en los embalses Brasil y Lago Cote mostraron una clara variación diurna (figura 1). Asimismo, registraron un incremento sostenido desde tempranas horas de la mañana y alcanzaron un pico cerca del mediodía para disminuir por la tarde. Tales flujos de metano en estos dos embalses mostraron marcadas variaciones durante el día, en comparación con los valores registrados en horas de la noche; así, por ejemplo, durante la noche se obtuvieron valores de alrededor de 52 % de los registrados bajo condiciones de luz para Brasil y aproximadamente un 21 % para el Lago Cote. En ambos casos, los flujos de emisión de CH_4 más altos coincidieron con picos similares en la temperatura tanto del aire como del agua (tabla 3), y los

flujos registraron variaciones consistentes con los cambios en la tabla de agua, lo que indica que las temperaturas altas y las tablas de agua profundas propician el incremento en los flujos de metano.

Durante la época lluviosa, las variaciones registradas entre los flujos nocturnos y diurnos fueron menores, mostraron valores de 72 y 70 % para los embalses Brasil y Nuestro Amo, respectivamente. Durante la época seca, las relaciones entre dichos flujos (nocturnos/diurnos) disminuyeron de 72 hasta 35 % y de 70 a 46 % para los embalses Brasil y Nuestro Amo, respectivamente.

Las diferencias entre los valores de flujo de metano registrados en los tres embalses hidroeléctricos pueden ser resultado de una combinación de diferentes variables que incluyen, entre otras, la composición química del agua superficial que alimenta cada embalse. Por ejemplo, el análisis del agua, realizado en forma simultánea al muestreo de flujos de metano, reveló que las



Ana R. Ramírez. Lago Arenal

Figura 1. Variación diurna en los flujos de metano ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) medidos en los embalses Brasil y Lago Cote

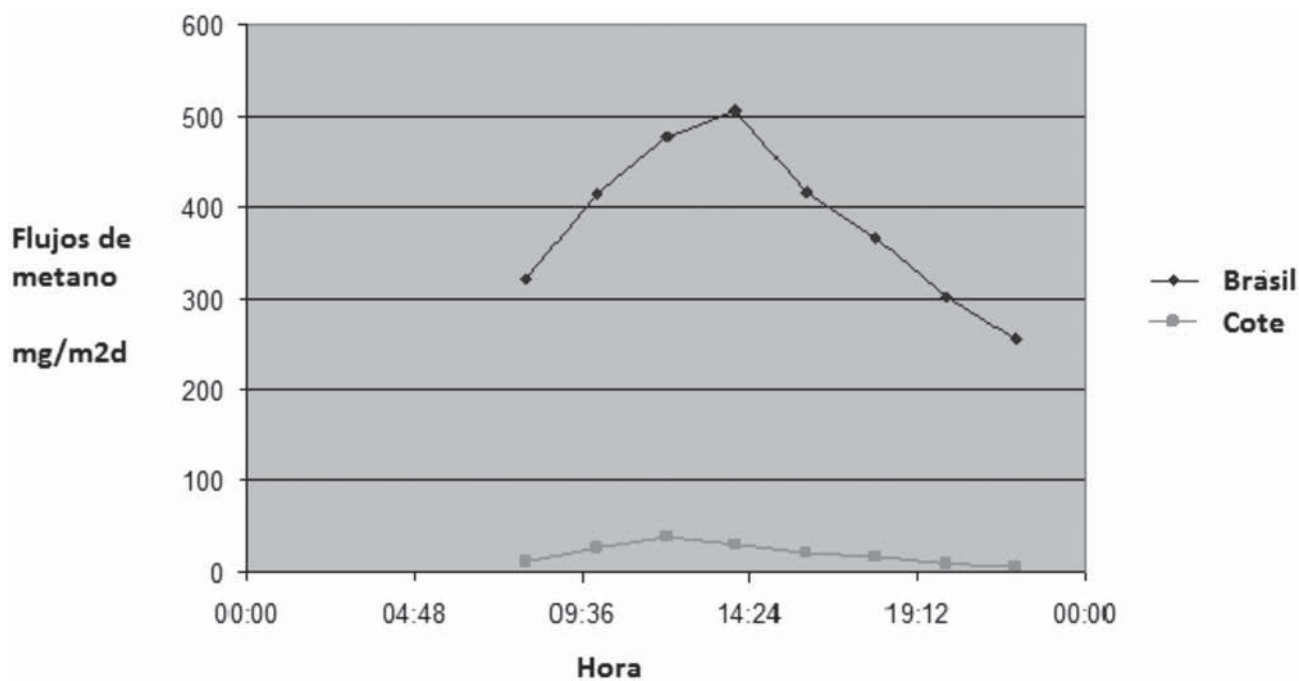
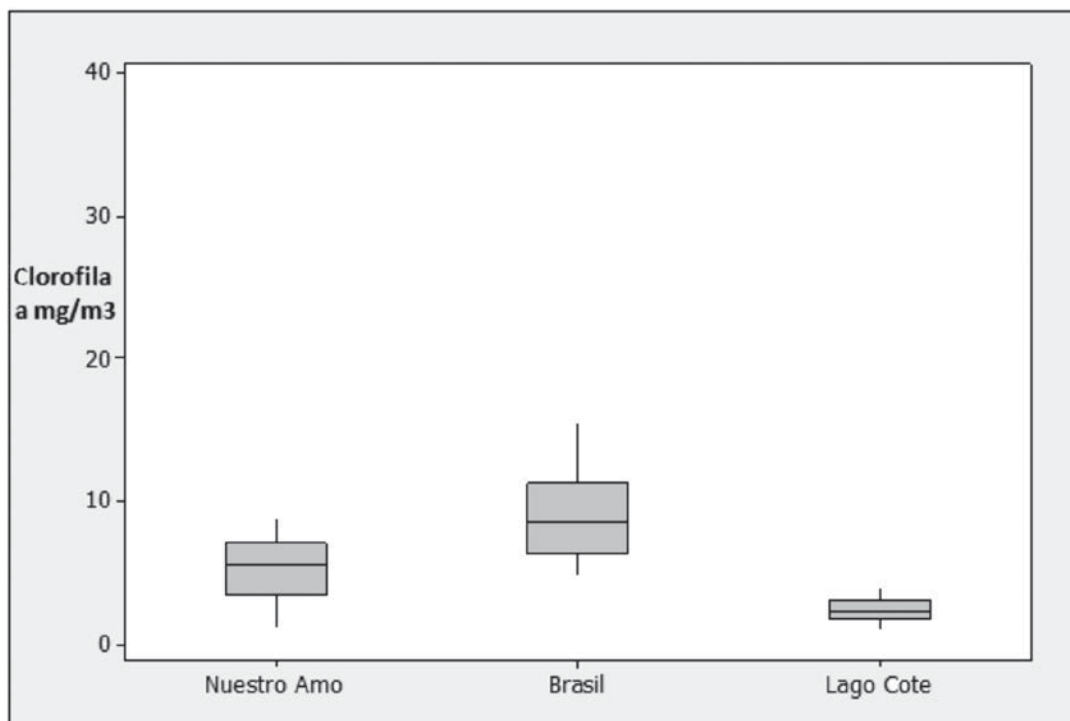


Figura 2. Concentraciones de clorofila a obtenidas para los embalses hidroeléctricos muestreados





A. Baltodano. Planta hidroeléctrica Brasil

muestras tomadas en el embalse Brasil contienen la mayor concentración de Chl a ($10,4 \text{ mg/m}^3$) (figura 2). Se registraron relaciones positivas significativas entre los flujos de emisión de CH_4 y las concentraciones de Chl a en todos los embalses estudiados, lo que indica que la alta producción de algas puede contribuir al incremento en los flujos de emisión de CH_4 , y que la materia orgánica autóctona recién producida puede servir de sustrato para la metanogénesis (Huttunen et al., 2002). Estos resultados concuerdan con estudios previos realizados en lagos y embalses, especialmente en aguas poco profundas y altamente productivas (Huttunen et al., 2002).

Las concentraciones de clorofila a y DBO registradas en los embalses variaron drásticamente durante el año, de $3,6$ a $17,3 \text{ mg l}^{-1}$ para clorofila a y de 32 a $105 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ para la DBO, de la época seca a la lluviosa, respectivamente, en el embalse Brasil. El análisis de correlación mostró que no existía

ninguna relación significativa entre las emisiones de CH_4 y el pH del agua ($r = 0,556$, $p > 0,05$) o la DBO y DQO ($R = 0,213$, $0,197$, $p > 0,05$), lo que indica que estas variables afectan muy débilmente la variación de las emisiones. Por otra parte, los flujos de metano mostraron una correlación significativa con las concentraciones de sólidos totales (tabla 3). Algunos estudios han demostrado que los sedimentos superficiales en los depósitos de agua, a menudo se resuspenden y se mezclan en el agua, debido a las corrientes y olas inducidas por el viento, lo que conduce a

un transporte por impulsos de compuestos reducidos, nutrientes y, muy probablemente, también de metano, a la columna de agua (Spagnoli y Bergamini, 1997; Bussmann, 2005). La resuspensión de sedimentos aumenta fuertemente el consumo de oxígeno a través de la oxidación de compuestos reducidos en suspensión (Laima et al., 1998), lo cual limita en gran medida la velocidad de oxidación de CH_4 (Bussmann, 2005).

Conclusiones

De los resultados se puede concluir que varios parámetros ambientales, tanto químicos como físicos, pueden afectar los flujos de emisiones de metano de embalses hidroeléctricos. De esta forma, la temperatura del suelo, el nivel de la tabla de aguas, la concentración de la clorofila a y los sólidos totales muestran altas correlaciones positivas con los flujos de metano medidos en los embalses de Costa Rica.

También, estos parámetros tienen un comportamiento estacional similar a los flujos de metano; por ejemplo, en la estación seca, tanto dichos parámetros como los flujos son más altos que en época de lluvias. Estos resultados deben tenerse en cuenta al considerar el uso de embalses hidroeléctricos como una opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que los flujos de metano pueden ser muy significativos en función de la calidad del agua que ingresa al embalse.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, por el apoyo logístico y financiero para la realización de las actividades de muestreo en los embalses hidroeléctricos seleccionados.

Referencias

- Abril, G., Guerin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C. y Gosse, P. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochem Cycles* 19, GB4007.
- Bambace, L. A. W., Ramos, F. M., Lima, I. B. T. y Rosa, R. R. (2007). Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. *Energy* 32, 1038-1046.
- Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Bruhwiler, L., Masarie, K. A., Lang, P. M., Miller, J. B. y Tans, P. P. (2003). Atmospheric methane levels off: temporary pause or a new steady-state? *Geophysical Research Letters* 30 (19), 1992.
- dos Santos, M. A., Matvienko, B., Rosa, L. P., Sikar, E. y dos Santos, E. O. (2005). *Gross greenhouse gas emissions from Brazilian hydro reservoirs*. Berlin: Springer Verlag; 2005. p. 267-91.
- dos Santos, M. A., Rosa, L. P., Sikar, B., Sikar, E., dos Santos, E. O. (2006). Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy* 34, 481-488.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Queiroz, A. G., Canuel, R., DaSilva, H. C. P. y Almeida, D. C. (2000). Greenhouse gases emissions from a 21 years old tropical hydroelectric reservoir, representativity for large scale and long term estimation. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 27, 1391.
- Fearnside, P. M. (2002). Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133, 69-96.
- Fearnside, P. M. (2004). Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source. *Climatic Change* 66, 1-8.
- Huttunen, J. T., Vaisanen, T. S., Hellsten, S. K., Heikkinen, M., Nykanen, H., Jungner, H., Niskanen, A., Virtanen, M. O., Lindqvist, O. S., Nenonen, O. S. y Martikainen, P.J. (2002). Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1-17.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2002). Plan de expansión de generación eléctrica periodo 2012-2024. Centro Nacional de Planificación Eléctrica, San José, Costa Rica, p. 23.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). En: Houghton *et al.* (Ed.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p.881). New York: Cambridge Univ. Press.
- Joyce, J. A. y Jewell, P. W. (2003). Physical controls of methane ebullition from reservoirs and lakes. *Environmental Engineering Geosciences* 9, 77-88.
- Keller, M. y Stallard, R. F. (1994). Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. *Journal of Geophysical Research* 99, 8307-8319.
- Lima, I. B. T. (2005). Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydro reservoirs. *Chemosphere* 59, 1697-1702.
- Marker, A. F. H., Crowther, C. A. y Gunn, R. J. M. (1980). Methanol and acetone as solvents for estimating chlorophyll a and pheopigments by spectrophotometry. *Archives für Hydrobiologie* 14 (1), 52-69.
- Melack, J. M., Hess, L. L., Gastil, M., Forsberg, B. R., Hamilton, S.K. y Lima, I.B.T. (2004). Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. *Global Change Biology* 10, 530-544.
- Nozhevnikova, A. N., Holliger, C., Ammann, A. y Zehnder, A. J. B. (1997). Methanogenesis in sediments from deep lakes at different temperatures (2-70 °C). *Water Science Technology* 36 (6-7), 57-64.
- St. Louis, V. L., Kelly, C. A., Duchemin, E., Rudd, J. W. M. y Rosenberg, D. M. (2000). Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 50, 766-775.
- Whalen, S. C. (2005). Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Sciences* 22, 73-94.