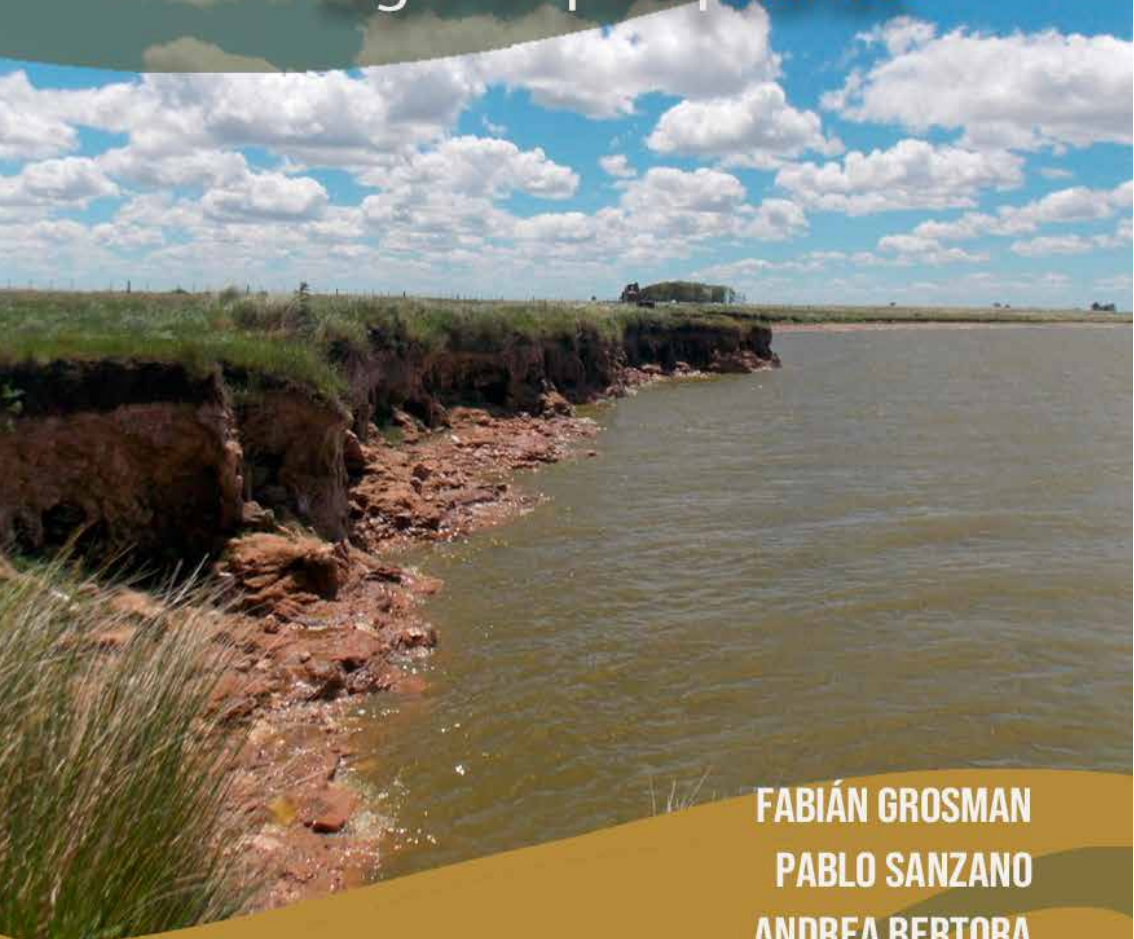


**Destino**



# La Barrancosa.

Una invitación a conocer  
lagunas pampeanas.



**FABIÁN GROSMAN  
PABLO SANZANO  
ANDREA BERTORA**

**2019**

**EDITORES**

**Destino:**

**La Barrancosa.**

**Una invitación a conocer  
lagunas pampeanas.**

**Grosman, Fabián**

**Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas / Fabián Grosman ; Pablo Sanzano ; Andrea Bertora; compilado por Fabián Grosman; Pablo Sanzano; Andrea Bertora. - 1a ed. - Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2019.**

**Libro digital, PDF**

**Archivo Digital: descarga y online**

**ISBN 978-950-658-495-5**

**1. Laguna. 2. Desarrollo Rural de la Región Pampeana. I. Grosman, Fabián, comp. II. Sanzano, Pablo, comp. III. Bertora, Andrea , comp. IV. Título. CDD 918.213**

## **Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas**

**Fabian Grosman, Pablo Sanzano y Andrea Bertora, (editores).**

### **Diseño**

**Maribel Macchione**

### **Fotografías de carátulas**

**Imágenes de lagunas pampeanas de Paula Mariluis, Florencia Castets y editores**

### **Primera edición**

**noviembre de 2019**

**ISBN 978-950-658-495-5**

**Como citar: Grosman, F., P. Sanzano y A. Bertora (eds.). 2019.**

**Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas.**

## Participantes

ALFONSO, MARÍA BELÉN.

BAIGÚN, CLAUDIO

BERASAIN, GUSTAVO EMILIO.

BERTORA, ANDREA.

BUSTINGORRY, JOSÉ.

CANZIANI, GRACIELA ANA.

CASTETS, FLORENCIA.

COLASURDO, VIVIANA.

COLAUTTI, DARÍO.

CORTELEZZI, AGUSTINA.

DEL FRESNO, PAMELA.

DEL PONTI, OMAR.

DIOVISALVI, NADIA.

ENTRAIGAS, ILDA.

ESCARAY, ROBERTO.

FERRATI, ROSANA.

FONTANARROSA, M. SOLEDAD.

FUSÉ, VICTORIA SUSANA.

GARCÍA DE SOUZA, JAVIER R.

GEREA, MARINA.

GIANSAnti SPLENDIANI, LORENA.

GLOK GALLI, MELISA.

GÓMEZ ROMERO, FACUNDO.

GROSMAN, FABIÁN.

GUZMÁN, SERGIO ALEJANDRO.

HERRERA, VICTORIA.

IZAGUIRRE, IRINA.

JULIARENA, MARÍA PAULA.

LAGOMARSINO, LEONARDO.

MAESTRI, MARÍA LAURA.

MANCINI, MIGUEL.

MARILUIS, PAULA.

MERLOS, CRISTINA SOLEDAD.

MESSINEO, PABLO.

MIR, FERNANDO CARLOS.

MIRANDA, LEANDRO.

PADÍN, DAMIÁN ALBERTO.

PERILLO, GERARDO M. E.

PICCOLO, MARÍA CINTIA.

PRIANO, MARÍA EUGENIA.

QUIROGA, MARÍA VICTORIA.

REQUESENS, EDUARDO.

ROJAS MOLINA, FLORENCIA.

ROSSO, JUAN JOSÉ.

SALINAS, VÍCTOR.

SÁNCHEZ, MARÍA LAURA.

SANZANO, PABLO.

UNREIN, FERNANDO.

VELASCO, CLAUDIA ALEJANDRA.

VITALE, ALEJANDRO.





# ÍNDICE

## CAPÍTULO

1

**El Ángel de La Barrancosa** 15  
ILDA ENTRAIGAS

2

**Las poblaciones indígenas prehispánicas en las lagunas pampeanas. El caso de “La Barrancosa”** 18  
PABLO G. MESSINEO

3

**A la vera de la laguna Barrancosa había un fortín... Investigaciones arqueológicas en Fortín Otamendi (1858- 1869).** 32  
FACUNDO GÓMEZ ROMERO

4

**La vida de una laguna: un ensayo sobre la sucesión ecológica.** 48  
JUAN JOSÉ ROSSO

5

**Lagunas y agroecología. El valor de los cuerpos de agua como factor de agrobiodiversificación regional.** 67  
CRISTINA S. MERLOS Y EDUARDO REQUESENS

6

**Uso de Imágenes Satelitales para el Estudio de las Lagunas Pampeanas. El Caso de La Barrancosa.** 77  
GRACIELA CANZIANI, FLORENCIA CASTETS, MARÍA L. MAESTRI Y ROSANA FERRATI

7

**Utilidad del monitoreo lagunar ambiental con boyas multiparamétricas en la región pampeana: Laguna La Barrancosa** 100  
MARÍA B. ALFONSO, ALEJANDRO J. VITALE, GERARDO M. E. PERILLO Y MARÍA C. PICCOLO

8

**El “ADN” de la laguna La Barrancosa: su origen y características hidrogeoquímicas e isotópicas** 114  
MELISA GLOK GALLI Y VIVIANA COLASURDO

9

**¿Qué son “los nutrientes” en los ecosistemas acuáticos?** 126  
LEONARDO LAGOMARSINO, JOSÉ BUSTINGORRY Y ROBERTO ESCARAY

10

**Contribución natural de la Laguna La Barrancosa a los Gases de Efecto Invernadero: aspectos metodológicos y estudio de las emisiones de metano.** 131  
VICTORIA S. FUSÉ, M. EUGENIA PRIANO, M. PAULA JULIARENA Y SERGIO A. GUZMÁN

11

**Los organismos más diminutos de Laguna La Barrancosa: El picoplancton** 144  
MARINA GEREÁ, MARÍA V. QUIROGA Y FERNANDO UNREIN

**12**

**Estructura del Fitoplancton de la laguna La Barrancosa** 151  
IRINA IZAGUIRRE Y MARÍA L. SÁNCHEZ

**13**

**Animales abundantes y diminutos en la laguna:  
el zooplancton.** 164  
M. SOLEDAD FONTANARROSA, FLORENCIA ROJAS MOLINA, M. BELÉN ALFONSO,  
JAVIER R. GARCÍA DE SOUZA Y NADIA R. DIOVISALVI

**14**

**Invertebrados acuáticos del fondo  
de la laguna La Barrancosa** 174  
AGUSTINA CORTELEZZI

**15**

**Los peces de las lagunas de la ecorregión Pampeana** 180  
DARÍO COLAUTTI, JAVIER GARCÍA DE SOUZA Y CLAUDIO BAIGÚN

**16**

**Ni Nemo ni Dory, con ustedes: Los peces de la laguna  
La Barrancosa** 199  
ANDREA BERTORA, PABLO SANZANO Y FABIÁN GROSMAN

**17**

**Influencia de la temperatura del agua sobre la época de  
desove del pejerrey** 212  
LEANDRO A. MIRANDA Y PAMELA S. DEL FRESNO

**18**

**Experiencias de cultivo de pejerrey (*Odontesthes bonariensis*)  
en la Estación Hidrobiológica Chascomús** 224  
CLAUDIA A. VELASCO, GUSTAVO E. BERASAIN, DAMIÁN A. PADÍN Y FERNANDO C. MIR

**19**

**La pesca recreativa-deportiva del pejerrey: una actividad  
masiva y dinamizadora** 237  
FABIÁN GROSMAN, MIGUEL MANCINI, OMAR DEL PONTI,  
PABLO SANZANO Y VÍCTOR SALINAS

**20**

**Contexto, laguna y territorio. La pesca deportiva en  
La Barrancosa.** 255  
CRISTINA S. MERLOS Y FABIÁN GROSMAN

**21**

**Aves más notorias de laguna La Barrancosa** 265  
LORENA GIANSANTI SPLENDIANI Y VICTORIA HERRERA

**Proyecto Argentino de Monitoreo  
y Prospección de Ambientes Acuáticos  
(PAMPAA)** 284



# Contribución natural de la Laguna La Barrancosa a los Gases de Efecto Invernadero: aspectos metodológicos y estudio de las emisiones de metano.

Victoria S. Fusé, M. Eugenia Priano, M. Paula Juliarena y Sergio A. Guzmán

## Las lagunas como fuentes de metano: ¿Por qué estudiar una laguna pampeana?

Desde la era preindustrial (segunda mitad del siglo XVIII) hasta la actualidad, las concentraciones de metano ( $\text{CH}_4$ ) en la atmósfera han aumentado notablemente, con un incremento de alrededor del 148 %. Este gas es conocido como un Gas de Efecto Invernadero (GEI) por su capacidad de absorber la radiación infrarroja proveniente desde la superficie de la Tierra. El  $\text{CH}_4$  se ubica en segundo lugar en importancia respecto del calentamiento global después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), porque a pesar de encontrarse en concentraciones notablemente inferiores, su efecto es casi 30 veces mayor.

El incremento de las concentraciones ambientales de  $\text{CH}_4$  es de origen natural y antrópico aunque se asocia principalmente a actividades humanas relacionadas con el uso de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo.

Las principales fuentes naturales de este gas son los humedales, con una participación entre el 6 a 16 % de las emisiones proveniente de lagos y lagunas. La emisión de  $\text{CH}_4$  desde estos cuerpos de agua es resultado del balance entre su producción (metanogénesis), su consumo u oxidación (metanotrofia) y de los diferentes mecanismos de transporte del gas desde los sedimentos hacia la atmósfera (Hernández, 2010). La producción de  $\text{CH}_4$  en humedales es resultado de la degradación de materia orgánica realizada por microorganismos estrictamente anaeróbicos presentes en agua o sedimentos anóxicos. En ellos también coexisten microorganismos aerobios y anaerobios que consumen entre el 30 y el 99 % del  $\text{CH}_4$  producido. La eficiencia de este consumo dependerá de los mecanismos de transporte del  $\text{CH}_4$  a través de la columna de agua: a) la ebullición (burbujas) que es un flujo directo de  $\text{CH}_4$  desde el sedimento a la atmósfera, con limitado impacto de la oxidación sobre el  $\text{CH}_4$ ; b) la difusión que es resultado del gradiente de concentraciones de  $\text{CH}_4$  entre el fondo de la laguna y la atmósfera, siendo el  $\text{CH}_4$  transportado por este mecanismo el más susceptible de oxidación; y c) la difusión pasiva a través de las plantas o ventilación por medio de la aerénquima (espacios vacíos que las hidrófitas poseen para transportar oxígeno de las hojas a la raíz).

Todos estos procesos son regulados por varios factores como la temperatura del agua y del sedimento, la disponibilidad de oxígeno, el contenido de materia orgánica, la profundidad del ambiente, entre otros. A su vez, estos parámetros son sensibles a las variaciones temporales de factores climáticos como temperatura del aire, viento y precipitaciones.

En muchos lugares del mundo se están estudiando las emisiones de  $\text{CH}_4$  en diversos tipos de sistemas acuáticos de diferentes regiones climáticas. En Argentina en cambio, donde existe una gran diversidad de humedales, son escasos los estudios acerca

de las emisiones de  $\text{CH}_4$  por parte de estos ecosistemas. En nuestro país la atención se ha centrado en las emisiones de  $\text{CH}_4$  debidas a actividades humanas, en particular al estudio del aumento de las concentraciones atmosféricas y su mitigación, procedente del sector agrícola-ganadero. Este interés ha sido motivado principalmente por la fuerte contribución en las emisiones totales de  $\text{CH}_4$  de origen agropecuario (60 %), especialmente por la fermentación entérica del ganado bovino (Inventario de GEI, República Argentina, 2015).

En la Región Pampeana la actividad agropecuaria presenta un importante desarrollo. A su vez, se localizan grandes centros urbanos conectados a la red de gas natural que por sí mismos actúan como fuentes de  $\text{CH}_4$  (Sánchez et al., 2018). Considerando estos escenarios, y ante la necesidad de contar con valores netos de las emisiones de  $\text{CH}_4$  por sectores, hay que analizar cómo repercutirán a nivel regional las emisiones de  $\text{CH}_4$  provenientes de lagunas.

La alternancia de períodos lluviosos y secos que caracteriza la región repercute significativamente en las diferentes condiciones hidrológicas de los cuerpos de agua y por lo tanto, en la magnitud de sus flujos de  $\text{CH}_4$ . Bajo determinadas situaciones climáticas, se han contabilizado más de 300.000 lagunas de diversos tamaños que abarcan una superficie cercana a 100.000  $\text{km}^2$  (Quirós, 2005). En este escenario es de esperar que el impacto de las emisiones de  $\text{CH}_4$  desde estos cuerpos de agua sea muy significativo comparado con las emisiones originadas en los sectores agropecuario y energético.

### ¿Cómo estudiamos el metano en la laguna La Barrancosa?

La Barrancosa fue seleccionada como laguna típica y representativa de estos ambientes acuáticos. Se realizaron campañas estacionales durante 4 períodos anuales: abril 2011 - marzo 2012 (período 1), abril 2012 - marzo 2013 (período 2), abril 2013 - marzo 2014 (período 3) y abril 2014 - marzo 2015 (período 4). En cada campaña se midieron los flujos difusivos de  $\text{CH}_4$  y las concentraciones disueltas de este gas. Los resultados presentados en el presente capítulo son parte del análisis realizado por Fusé et al. (2016) en el cual muestran la influencia de la variación temporal de la temperatura del aire y de las precipitaciones sobre la variación de algunos parámetros fisicoquímicos del agua y de los flujos difusivos de  $\text{CH}_4$ .

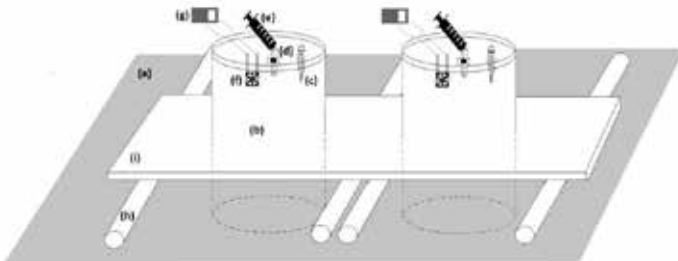


FIGURA 1. CÁMARAS ESTÁTICAS PARA MEDICIÓN DE FLUJO DE  $\text{CH}_4$  EN INTERFAZ AGUA – AIRE. A) SUPERFICIE DEL AGUA, B) CILINDRO DE PVC, C) SENSOR DE TEMPERATURA, D) VÁLVULA PARA EL MUESTREO DE AIRE, E) JERINGA DE POLIETILENO DE 25 ML DE VOLUMEN CON VÁLVULA DE TRES VÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE AIRE, F) VENTILADOR PARA HOMOGENEIZACIÓN INTERNA DENTRO DE LAS CÁMARAS, G) BATERÍA EXTERNA, H) CILINDROS DE ESPUMA DE POLIETILENO PARA FLOTACIÓN DE LAS CÁMARAS, I) MADERA PARA LA COLOCACIÓN DE DOS CÁMARAS.

a) La medición de los flujos difusivos de  $\text{CH}_4$  (FM) en la interfaz agua - atmósfera se llevó a cabo mediante la realización de dos cámaras estáticas (Lambert y Fréchette, 2005) en simultáneo (Figura 1). Para ello, se analizó la variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  en una cámara de PVC abierta en su parte inferior, cuyo piso es la superficie del agua y cerrada en su parte superior, con una tapa removible. Por cada cámara, se recolectaron 4 muestras de aire sucesivas con intervalos de 10 a 20 minutos a partir de la colocación de la tapa (Figura 2.a). La concentración de  $\text{CH}_4$  en cada una de las muestras se determinó por cromatografía gaseosa (GC Agilent 7890 A). Los flujos de  $\text{CH}_4$  se expresan en unidades másicas por unidad de superficie y por unidad de tiempo, siendo las unidades elegidas en este capítulo miligramos (mg), metros cuadrados ( $\text{m}^2$ ) y hora (h), respectivamente.

b) Para la determinación de la concentración de  $\text{CH}_4$  disuelto (MD) se recolectaron muestras de 25 ml de agua en los primeros 30 centímetros de profundidad y en el fondo de la laguna. Para ello, se utilizaron frascos de vidrio de 50 ml cerrados con septums de goma y precintos de aluminio (Figura 2.b). Estos frascos habían sido limpiados previamente con  $\text{N}_2$  de alta pureza y llenados con dicho gas hasta presión atmosférica. Las muestras de agua se conservaron con una solución 4M de  $\text{ZnCl}_2$  y en hielo hasta su procesamiento en el laboratorio (Fonseca et al., 2004). La MD en las muestras de agua se calculó por Ley de Henry de acuerdo a la metodología recomendada por la EPA a partir de la medición de la concentración de  $\text{CH}_4$  en la fase gaseosa del frasco (U.S. EPA Region 1, 2002).



FIGURA 2. a) TOMA DE MUESTRAS DE AIRE DURANTE LA CÁMARA ESTÁTICA, b) MUESTRAS DE AGUA PARA LA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{CH}_4$  DISUELTO, c) ECOSONDA PORTABLE PARA LA MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA LAGUNA (FOTOGRAFÍA C: SCOUTS DE LA CIENCIA, 2015).

### ¿Cómo definimos el sitio de muestreo?

La técnica de cámara estática permite la evaluación localizada del flujo de  $\text{CH}_4$ ; sin embargo, pueden surgir muchos errores si intentamos extrapolar los resultados a todo el cuerpo de agua (Grinham et al., 2011). Para salvar esto es importante saber qué tan representativo es el punto de muestreo elegido. Para ello, se realizó una batimetría de la laguna y el análisis de la variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  disuelto y otros parámetros fisicoquímicos del agua sobre el ancho de la misma.

a) Batimetría: Se midió la profundidad de la laguna (NA: Nivel del Agua) cada 50 m a lo largo de 4 transectas (3 en dirección NO-SE y 1 en dirección SO-NE) (Figura 3a). La escala de NA va desde 0 o valor de referencia al momento de la batimetría a valores negativos que representan la profundidad. Los resultados se presentan en la Figura 3b.

b) Transecta: la Figura 3b muestra que la transecta 4 (T4) delimita dos áreas de la laguna de volúmenes aproximadamente iguales. Considerando este dato y la variación del NA a lo largo de esta transecta, se supuso que la realización de los muestreos sobre la mitad de T4 podría ser una buena opción para representar las condiciones medias del cuerpo de agua. Para comprobar esto, se analizó la variación de las concentraciones de CH<sub>4</sub> disuelto y de algunos parámetros fisicoquímicos del agua en 4 puntos de muestreo sobre el ancho de la laguna (Tabla 1): 1) cercano a la barranca, 2) medio de la laguna, 3) cercano al borde de laguna y 4) sobre la orilla.

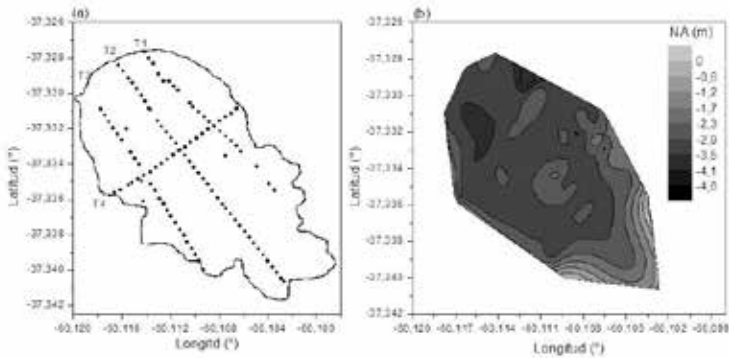


FIGURA 3. A) MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA LAGUNA (NA: NIVEL DEL AGUA) A LO LARGO DE CUATRO TRANSECTAS (T), B) VARIACIÓN ESPACIAL DE NA EN LA LAGUNA.

Tabla 1. Nivel del Agua (NA); Distancia al Borde SO-SE (DB); Temperatura del agua (T); Oxígeno Disuelto (OD); Conductividad Eléctrica (CE); Demanda Química de Oxígeno (DQO); concentración de Metano (CH<sub>4</sub>) Disuelto superficial (MDs) en cada Punto (P) de muestreo. (Valores promedios  $\pm$  Desvío Estándar, DE).

Parámetro	P1	P2	P3	P4
NA (m)	-2,8	-3,4	-3,3	-2,0
DB (m)	1180	550	210	70
T (°C)	20,37 $\pm$ 0,02	20,56 $\pm$ 0,02	20,69 $\pm$ 0,02	20,92 $\pm$ 0,04
OD (%)	102,5 $\pm$ 1,6	102,1 $\pm$ 1,1	98,87 $\pm$ 0,94	114,3 $\pm$ 2,3
CE ( $\mu$ S/cm)	2347,0 $\pm$ 2,7	2354,4 $\pm$ 19,8	2341 $\pm$ 2,68	2356,1 $\pm$ 23,0
DQO (mg/L)	182,9 $\pm$ 1,0	166,7 $\pm$ 1,0	184,5 $\pm$ 1,0	167,7 $\pm$ 1,0
MDs (mg/L)	0,62 $\pm$ 0,03	0,51 $\pm$ 0,03	0,53 $\pm$ 0,03	0,36 $\pm$ 0,06

Los parámetros fisicoquímicos del agua presentaron pequeñas diferencias de un punto de muestreo a otro. La variación de la intensidad del viento durante la realización de la transecta promovió diferentes porcentajes de oxígeno disuelto (OD). Los fuertes vientos pueden favorecer mayor mezcla del agua y por lo tanto, una mayor oxigenación.

En P1 se midieron las mayores concentraciones de CH<sub>4</sub> disuelto superficial (MDs) y el segundo valor más alto de DQO. La presencia de la barranca podría favorecer una mayor acumulación de materia orgánica en los sedimentos al dificultar el mezclamiento. Los puntos 2 y 3 registraron concentraciones de MDs intermedias y similares a la concentración promedio de los cuatro puntos de muestreo (0,504 mg/L).

Si bien los puntos de muestreo son escasos, es de esperar que los valores de MDs medidos en el centro de la transecta y por lo tanto, los flujos de  $\text{CH}_4$ , se aproximen a los resultados medios sobre el ancho de la laguna. En tal punto se realizaron entonces todas las mediciones de flujo de  $\text{CH}_4$  con cámara estática y se obtuvieron las muestras para la determinación del  $\text{CH}_4$  disuelto.

### ¿Fuente o sumidero de metano?

Se observó cómo la concentración de  $\text{CH}_4$  disuelto medido en la superficie del agua (MDs) varió a lo largo del ancho de la laguna. Ahora vamos a detenernos en el análisis de su variación en profundidad y en cómo estas variaciones pueden significar cambios en los flujos de  $\text{CH}_4$ . Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

Las diferencias entre la concentración de  $\text{CH}_4$  disuelto en el fondo de la laguna (MDp) y la MDs variaron entre 0,008 y 1,950 mg/L, siendo éstas estadísticamente significativas en 7 de 9 campañas. Estas diferencias dan como resultado un gradiente de concentraciones que determina los flujos de  $\text{CH}_4$  por difusión en la interfaz agua-atmósfera. Tal como se ha registrado en otras lagunas de profundidades similares a La Barrancosa, a mayores gradientes de MD, mayores serán los flujos de  $\text{CH}_4$  (Bastviken et al., 2004).

Tabla 2. Variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  en agua en los primeros centímetros de profundidad (MDs) y en el fondo de la laguna (MDp) por campaña (mes/año de campaña) (las letras en subíndices muestran los resultados del Test ANOVA, LSD Fisher, a un nivel de significancia  $p < 0,05$ ).

Campaña	MDs (mg/L)	MDp (mg/L)
10/2012	0,009 ± 0,002 (n=7) <sup>a</sup>	0,026 ± 0,010 (n=5) <sup>b</sup>
12/2012	0,044 ± 0,004 (n=7) <sup>a</sup>	0,229 ± 0,048 (n=5) <sup>b</sup>
04/2013	0,041 ± 0,006 (n=6) <sup>a</sup>	0,049 ± 0,006 (n=4) <sup>a</sup>
10/2013	0,234 ± 0,046 (n=5) <sup>a</sup>	0,367 ± 0,041 (n=3) <sup>b</sup>
12/2013	0,359 ± 0,046 (n=6) <sup>a</sup>	0,948 ± 0,038 (n=4) <sup>b</sup>
07/2014	0,039 ± 0,002 (n=5) <sup>a</sup>	0,048 ± 0,006 (n=3) <sup>b</sup>
11/2014	0,272 ± 0,008 (n=4) <sup>a</sup>	0,322 ± 0,049 (n=4) <sup>a</sup>
12/2014	0,247 ± 0,049 (n=5) <sup>a</sup>	0,899 ± 0,113 (n=4) <sup>b</sup>
01/2015	0,221 ± 0,055 (n=4) <sup>a</sup>	2,171 ± 0,174 (n=4) <sup>b</sup>

Si bien aún no hemos precisado si la laguna estudiada es fuente de  $\text{CH}_4$ , todo parece indicar que sí. La comparación entre MDs y la concentración de  $\text{CH}_4$  disuelto esperable por dilución del  $\text{CH}_4$  presente en la atmósfera (MDe) ( $\text{CH}_4$  disuelto en agua en equilibrio con la atmósfera) brinda una primera noción de si el cuerpo de agua se comporta como fuente o sumidero de  $\text{CH}_4$  (Bange, 2006). Una MDs menor a MDe indica la disolución del  $\text{CH}_4$  atmosférico en la fase acuosa (sumidero), mientras que una MDs mayor a MDe (sobresaturación) sugiere la emisión de  $\text{CH}_4$  desde la fase de agua a la atmósfera (fuente).

Las mayores diferencias entre MDs y MDe se registraron durante los meses más cálidos de los períodos 1, 3 y 4, mientras que durante el período 2 (Abril 2012 - Marzo 2013), los valores de MDs registrados fueron menor o aproximadamente igual a MDe (Figura 4.a). En concordancia con estas observaciones, los Flujos difusivos de Metano (FM) resultaron relativamente bajos o nulos tanto durante el período 2 (bajos valores de MDs y FM durante todo el período) como en las campañas invernales de

los demás períodos con notables aumentos de estos flujos para los meses de verano (Figura 4.b).

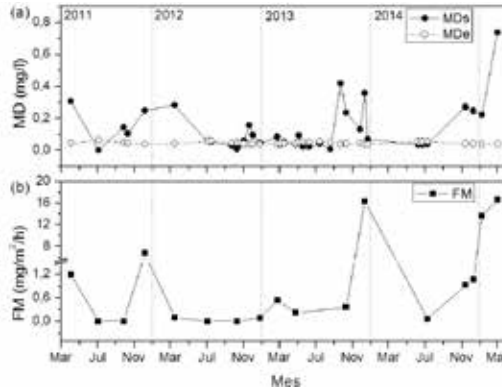


FIGURA 4. A) CONCENTRACIONES DE  $\text{CH}_4$  DISUELTO SUPERFICIAL (MDs) Y CONCENTRACIONES DE  $\text{CH}_4$  EN AGUA EN EQUILIBRIO CON LA ATMÓSFERA (MDe) Y B) FLUJOS DE  $\text{CH}_4$  (FM) MEDIDOS A LO LARGO DE TODO EL PERIODO DE ESTUDIO.

La similitud en los comportamientos temporales de MDs y FM se vió reflejado en una buena correlación, estadísticamente significativa, entre ambos parámetros (Correlación de Pearson,  $R^2 = 0,5094$ ,  $p = 0,0012$ ,  $n = 17$ ). A su vez, los mayores FM se registraron en las campañas en las que se midieron las mayores diferencias entre MDs y MDP ( $\Delta_{\text{MW}}$ ) (Tabla 2) con una buena correlación, estadísticamente significativa entre FM y  $\Delta_{\text{MW}}$  ( $R^2 = 0,53$ ,  $p = 0,0259$ ,  $n = 9$ ).

En general, durante todo el período de estudio, la laguna se comportó mayoritariamente como fuente de  $\text{CH}_4$  con una emisión media de  $3,40 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ , aunque con notables variaciones tanto intra como inter-anales durante todo el período:

**Variabilidad intra-anual:** La variabilidad intra-anual de los FM fue relativamente alta (CV: 124 - 181 %) asociada principalmente a notables variaciones estacionales. Los mayores FM se registraron durante el verano, con un valor medio de  $7,85 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ , mientras que durante el invierno los FM no superaron los  $0,065 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ .

**Variabilidad interanual:** Los valores promedios para cada estación variaron notablemente de un año a otro (CV: 92 a 125 %). Se registraron valores medios de FM de  $1,609$ ,  $0,166$ ,  $5,641$  y  $6,444 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$  para los períodos 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El FM máximo fue de  $0,544$  y  $16,628 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{h}$  durante los períodos con emisiones de  $\text{CH}_4$  más bajas (período 2) y más altas (período 4), respectivamente.

### También burbujea metano

En este trabajo se midieron sólo los flujos de  $\text{CH}_4$  por difusión y si bien, algunos autores sugieren que los sitios de agua más profundos y con baja densidad de macrófitas están dominados por flujos difusivos de  $\text{CH}_4$  (Grinham et al., 2011), es importante plantearse si éste será el único mecanismo de emisión de  $\text{CH}_4$  presente. Para responder a esta cuestión, sería necesario utilizar otras técnicas de muestreo para evaluar la contribución de la ventilación y la ebullición a la emisión de  $\text{CH}_4$  total de la laguna.

Sin embargo, los resultados obtenidos en las cámaras estáticas pueden darnos algunos indicios de la presencia o ausencia de burbujas de  $\text{CH}_4$ .

La ebullición se hace aparente sólo en aquellos casos en los que la concentración de  $\text{CH}_4$  de alguna de las muestras obtenidas durante el desarrollo de la cámara estática se aparta de la linealidad en la variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  en función del tiempo. Esto ocurrió en, al menos, una de las cámaras estáticas de 7 de las 17 campañas realizadas. Ejemplos de los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5 en la que se puede observar cómo la pendiente del ajuste lineal de la variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  dentro de la cámara en función del tiempo aumenta notablemente cuando se consideran todas las muestras obtenidas durante el desarrollo de la cámara respecto del ajuste sin considerar el salto en la concentración atribuido a la burbuja de  $\text{CH}_4$ . Considerando el total de variaciones de la concentración de  $\text{CH}_4$  de un tiempo a otro de todas las cámaras estáticas realizadas (por ejemplo, 4 muestras por cámara, 3 variaciones de un tiempo a otro - de 0 a 20 min, de 20 a 40 min y de 40 a 60 min) pudimos calcular una probabilidad de ocurrencia de las burbujas de  $\text{CH}_4$  cercana al 15 %.

Los aumentos de  $\text{CH}_4$  registrados en las cámaras resultado de la ebullición se traducirán en aumentos del flujo de  $\text{CH}_4$  en la interfaz agua - atmósfera y pueden representar entonces, una mayor emisión de  $\text{CH}_4$  a nivel laguna. En los casos que aparecieron burbujas, el aumento de la concentración de  $\text{CH}_4$  entre dos muestras sucesivas en la cámara no fue el mismo para todos ellos. Estas diferencias representarán finalmente diferentes magnitudes de los flujos de  $\text{CH}_4$  por ebullición desde la laguna. En función de ello, las emisiones de  $\text{CH}_4$  de la laguna en estudio fueron clasificadas en: Baja (gradientes de concentración de  $\text{CH}_4$  menor a 15 ppm) (Figura 5, a y b), Media (gradiente de concentración de  $\text{CH}_4$  entre 15 ppm a 55 ppm) (Figura 5, c y d) y Alta (gradiente de concentración de  $\text{CH}_4$  mayor a 55 ppm) (Figura 5, e y f)

La aparición de burbujas durante el desarrollo de la cámara podría dificultar la estimación del flujo de  $\text{CH}_4$  por difusión o peor aún, tener que descartar la cámara completa (son necesarias, al menos tres medidas consecutivas de la concentración de  $\text{CH}_4$  en función del tiempo). Entonces, ¿Cómo se hace para calcular los flujos de  $\text{CH}_4$  cuando se detectan burbujas en la cámara? Tuvo que descartarse la cámara en el caso que se observaron diferentes tasas de aumento de la concentración de  $\text{CH}_4$  de un intervalo de tiempo a otro durante los tiempos intermedios (por ejemplo, Figura 5.c, cámara 1), mientras que en otros casos, se descartaron los puntos sólo cuando los apartamientos de la linealidad fueron en la primera o última medida (por ejemplo, Figura 5.d, cámara 2). En casos como éste último, los FM se estimaron a partir de la pendiente de la variación de la concentración de  $\text{CH}_4$  en función del tiempo previa o posterior a la perturbación por burbujas, tal como se sugiere en Matthews et al. (2003).

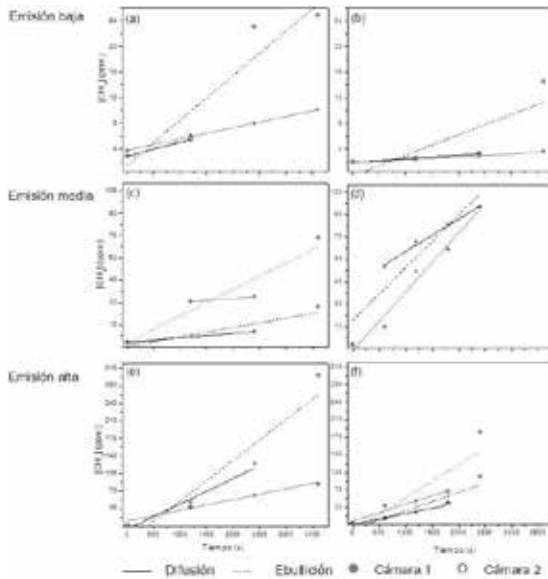


FIGURA 5. EJEMPLOS DEL AJUSTE LINEAL DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{CH}_4$  DENTRO DE LAS CÁMARA ESTÁTICAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MEDIDA PARA DIFERENTES FLUJOS MEDIDOS EN PRESENCIA (LÍNEA PUNTEADA) O AUSENCIA (LÍNEA RECTA) DE BURBUJAS.

### ¿Cómo se afectan los flujos de metano de la laguna por la alta variabilidad en las precipitaciones?

Durante todo el período de estudio en la laguna Barrancosa, la precipitación mostró una sucesión de años secos y húmedos (Fusé et al., 2016). Las mayores precipitaciones se registraron durante el período 2 (abril 2012 – marzo 2013), revelando condiciones de ligeramente a moderadamente húmedas. Luego de las intensas precipitaciones ocurridas sobre la laguna (hasta 310,5 mm durante agosto de 2012) se observaron notables variaciones de su profundidad y del área inundada. Estos cambios pueden apreciarse en las siguientes fotografías, obtenidas previo y posteriormente al período más lluvioso (Figuras 6. a y b). La profundidad de la laguna presentó un valor medio de 1,3 m durante el período 1 mientras que alcanzó un valor medio de 2,9 m en el período 2 (Fusé et al., 2016).

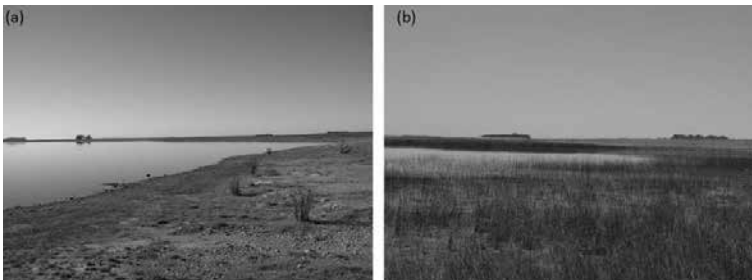


FIGURA 6. FOTOGRAFÍAS DE LA LAGUNA A) MARZO 2012, B) DICIEMBRE 2012.



La influencia de las precipitaciones sobre la laguna en estudio promovió también notables variaciones de los parámetros fisicoquímicos del agua. Las menores MD y los menores FM desde la laguna se registraron durante el período más lluvioso, en el que se midieron valores relativamente menores de contenidos de materia orgánica disuelta, de conductividad eléctrica del agua, de turbidez del agua y un aumento significativo de las concentraciones de oxígeno disuelto en comparación con el período previo (Fusé et al., 2016).

En general, el flujo neto de  $\text{CH}_4$  desde estos cuerpos de agua es resultado de distintos parámetros biológicos, fisicoquímicos y morfológicos que influyen, de una manera compleja, en su producción, consumo y transporte (Torres-Alvarado et al., 2005), entre los que se destacan: a) Un menor contenido de materia orgánica biodegradable promueve una menor producción de  $\text{CH}_4$  al incrementar la competencia entre la metanogénesis y otros procesos anaeróbicos (Valentine et al., 1994). b) Un aumento del porcentaje de oxígeno disuelto, como consecuencia del ingreso de altos volúmenes de agua altamente oxigenada, puede inhibir la actividad de los microorganismos metanogénicos (estrictamente anaerobios) y a su vez, favorecer una mayor oxidación del  $\text{CH}_4$  (Borrel et al., 2011). c) Una mayor profundidad del cuerpo de agua, junto a altos niveles de oxígeno, aumenta la probabilidad de oxidación del  $\text{CH}_4$  producido en los sedimentos ya que la columna de agua rica en oxígeno es más larga (Bastviken et al., 2004).

### ¿Cómo esto se reflejaría en todo el humedal pampeano?

La extrapolación de los resultados aquí obtenidos a todo el humedal plantea la necesidad de ampliar los estudios a otras lagunas de la región y evaluar sus distintas tipologías. Sin embargo, las variaciones de FM que se registraron en la laguna La Barrancosa se considera que fueron resultado del comportamiento típico de este tipo de sistemas pampeanos. Notables variaciones de área y profundidad de las lagunas y de los parámetros fisicoquímicos del agua ya han sido reportadas en otros ambientes del humedal (Grosman y Sanzano, 2008). Es de esperar entonces que en estas lagunas también ocurran importantes variaciones temporales en sus emisiones de  $\text{CH}_4$ .

Es posible mediante un cálculo simplificado, estimar la contribución esperable de todo el humedal a las concentraciones atmosféricas de  $\text{CH}_4$  globales en la región. Para ello necesitamos conocer cómo cambiaría el área ocupada por el humedal pampeano como consecuencia de la variación de las precipitaciones. Dukatz (2008) estimó que en una zona de muestreo cercana a 5000 km<sup>2</sup> que integra parte de la cuenca del Salado y otra del Sudeste bonaerense, el área ocupada por las lagunas alcanzó el 19 % de la superficie total, aunque en épocas de sequía fue de sólo el 3 %. Entonces, consideremos un cambio de esta entidad que afecte a todo el humedal pampeano (extensión de alrededor de 100.000 km<sup>2</sup>) y tomemos los valores medios de FM registrados para La Barrancosa para los períodos 1 y 2 (antes y después de las intensas precipitaciones). Este cálculo manifiesta que existiría una disminución de 0,49 Tg de  $\text{CH}_4$  /año (490.000.000.000 g equivalente a 490.000 toneladas) como resultado de la influencia de las altas precipitaciones sobre las lagunas del humedal. Esto se produciría porque pese a conformarse una mayor área inundada, el flujo de  $\text{CH}_4$  esperable por m<sup>2</sup> de laguna es menor. Para dimensionar el significado de esta emisión natural podemos relativizarlo a las emisiones antrópicas de  $\text{CH}_4$  calculadas para nuestro país. Una reducción de  $\text{CH}_4$  en dicha cantidad equivale a un 20,8 % de las emisiones totales de  $\text{CH}_4$  desde el sector agrícola - ganadero.

## A modo de cierre

Este trabajo se ubica entre los primeros estudios en Argentina sobre flujos de  $\text{CH}_4$  en la interfaz agua - atmósfera en una laguna de la región pampeana. La Barrancosa se comportó netamente como fuente de  $\text{CH}_4$ . Sin embargo, se registraron importantes variaciones estacionales e interanuales de los flujos de  $\text{CH}_4$  medidos atribuidas principalmente a la alternancia entre ciclos de altas y bajas precipitaciones y a los cambios que éstos promueven en los cuerpos de agua.

Periodos húmedos y periodos secos muestran un comportamiento diferenciado que permiten abordar estudios para establecer y caracterizar mejor los flujos de  $\text{CH}_4$  del humedal. Dada la complejidad de los sistemas naturales, son muchos los parámetros ambientales que influyen en los procesos microbiológicos de producción y consumo de  $\text{CH}_4$  en un cuerpo de agua y en el transporte del  $\text{CH}_4$  producido desde los sedimentos hacia la atmósfera. Estos pueden cambiar indistintamente de un período a otro; mientras que algunos cambios pueden favorecer la producción de  $\text{CH}_4$  incrementando las emisiones, otros pueden inhibir la actividad de los microorganismos metanogénicos disminuyendo así los flujos netos de  $\text{CH}_4$  desde la laguna. Dentro de estos periodos, además de la colecta de datos in situ mediante las metodologías aquí descritas, las variaciones del área ocupada por el humedal, la concentración de materia orgánica contenida y la turbidez son condiciones medibles o detectables de manera remota (Ozemesi y Bauer, 2002; Dukatz et al., 2005) que pueden darnos un perfil de las emisiones esperadas a escala regional o mayor aún.

La alta variabilidad de las lagunas pampeanas determina la importancia de estos ecosistemas en el momento de considerar cómo repercute en las concentraciones de  $\text{CH}_4$  en la atmósfera no sólo por la magnitud sino por los cambios que promueven en las emisiones de este gas. Algunos autores han reportado que los humedales, entre ellos las lagunas, ejercen una influencia dominante sobre la variabilidad interanual de las concentraciones atmosféricas de  $\text{CH}_4$  (Bousquet et al., 2006).

Finalmente, es fundamental el estudio de fuentes naturales como las lagunas de la región pampeana, cuyas emisiones se superponen y son comparables a las concentraciones atmosféricas de  $\text{CH}_4$  atribuibles a fuentes antropogénicas de los sectores agropecuarios y energéticos. El conocimiento de los procesos individuales, genera información que se podrá utilizar para la evaluación de cada fuente en particular, y que permitirá a futuro el uso de los monitoreos a gran escala empleando datos de origen satelital.

## Bibliografía

- Bange, H. W. 2006. Nitrous oxide and methane in European coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70: 361-374.
- Bastviken, D., Cole, J., Pace, M., Tranvik, L. 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB4009.
- Borrel, G., Jézéquel, D., Biderre-Petit, C., Morel-Desrosiers, N., Morel, J. P., Peyret, P., Fonty, G., y Lehours, A. C. 2011. Production and consumption of methane in freshwater lake ecosystems. *Research in Microbiology*, 162(9): 832-847.
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E. G., Carouge, C., Langen-

felds, R. L., Lathière, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C. y White, J. 2006. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, 443(7110): 439-443.

Dangavs, N. 2005. Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. XVI Congreso Geológico Argentino. Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires, La Plata, 219-235.

Dukat, F., Ferrati, R. y Canziani, G. 2005. Clasificación de lagos someros pampeanos mediante imágenes Landsat TM. *Biología Acuática*, 22: 95-101.

Dukat, F. 2008. Nuestros ojos en el cielo: Los satélites de aplicación científica. En: F. Grosman (ed.) *Espejos en la llanura. Nuestras lagunas de la región pampeana*. Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil. 119-127.

Fusé, V. S., Priano, M. E., Williams, K. E., Gere, J. I., Guzmán, S. A., Gratton, R., y Juliarena, M. P. 2016. Temporal variation in methane emissions in a shallow lake at a southern mid latitude during high and low rainfall periods. *Environmental monitoring and assessment*, 188(10): 590.

Fonseca, A. L. S., Minello, M., Marinho, C. C. y Esteves, F. A. 2004. Methane Concentration in Water Column and in Pore Water of a Coastal Lagoon (Cabiúnas Lagoon, Macaé, RJ, Brazil). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47(2): 301-308.

Grinham, A., Dunbabin, M., Gale, D. y Udy, J. 2011. Quantification of ebullitive and diffusive methane release to atmosphere from a water storage. *Atmospheric Environment*, 45(39): 7166-7173.

Grosman, F. y Sanzano, P. 2008. Cada laguna con su propia historia. Variaciones espacio-temporales. En: F. Grosman (ed.) *Espejos en la llanura. Nuestras lagunas de la región pampeana*. Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil. 67-76.

Hernández, M. E. 2010. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra latinoamericana*, 28(2): 139-147.

INDEC. 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Provincia de Buenos Aires. Hogares por tipo de vivienda, según combustible utilizado principalmente para cocinar.

Lambert, M. y Fréchet, J. L. 2005. Analytical techniques for measuring fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. En: A. Tremblay, L., Varfalvy, C., Roehm y M. Garneau (eds.) *Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. Springer Press. Berlin. 37-60.

Matthews, C. J., St. Louis, V. L. y Hesslein, R. H. 2003. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces. *Environmental science & technology*, 37(4): 772-780.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J. F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. y Zhang, H. 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York. 659-740.

Ortiz-Llorente, M. J. y Alvarez-Cobelas, M. 2012. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands. *Atmospheric Environment*, 59: 328-337.

Ozesmi, S. L. y Bauer, M. E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 10: 381-402.

Quirós, R. 2005. La ecología de las lagunas de las Pampas. *Investigación y Ciencia*, 1:1-13.

Quirós, R. y Drago, E. 1999. The environmental state of Argentinean lakes: An overview. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 4: 55-64.

República Argentina. 2015. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático". Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Reay, D. S., Smith, P., Christensen, T. R., James, R. H. y Clark, H. 2018. Methane and Global Environmental Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 43: 165-192.

Sánchez, M. L., Lagomarsino, L., Allende, L., y Izaguirre, I. 2015. Changes in the phytoplankton structure in a Pampean shallow lake in the transition from a clear to a turbid regime. *Hydrobiologia*: 65-76.

Sanchez, N. P., Zheng, C., Ye, W., Czader, B., Cohan, D. S., Tittel, F. K. y Griffin, R. J. 2018. Exploratory study of atmospheric methane enhancements derived from natural gas use in the Houston urban area. *Atmospheric Environment*, 176: 261-273.

Torres-Alvarado, R., Ramírez-Vives, F. y Fernández, F. J. 2005. Methanogenesis and methane oxidation in wetlands. Implications in the global carbon cycle. *Metanogénesis y metano-oxidación en humedales. Implicaciones en el ciclo del carbono global. Hidrobiológica*, 15(3): 327-349

Valentine, D. L. 2002. Biogeochemistry and microbial ecology of methane oxidation in anoxic environments: a review. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(1-4): 271-282.