

CARACTERIZACIÓN DE DOS LAGUNAS COSTERAS DEL PACÍFICO TROPICAL MEXICANO EN RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE CARBONO Y LA CAPTURA Y EMISIÓN DE CH₄ Y CO₂

Manuel MENDOZA MOJICA¹, Amparo MARTÍNEZ ARROYO^{2*}, María de la Luz ESPINOSA FUENTES²,
Óscar PERALTA ROSALES² y Telma CASTRO ROMERO²

¹ Universidad Autónoma de Guerrero

² Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor responsable: amparo@atmosfera.unam.mx

(Recibido febrero 2012, aceptado marzo 2013)

Palabras clave: bióxido de carbono, captura, emisión, metano, Guerrero, México, fuente, sumidero

RESUMEN

El estudio de los gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), tiene una relevancia de carácter global y su acumulación en la atmósfera por actividades humanas afecta el balance radiativo de la Tierra. Las lagunas costeras se consideran reservorios importantes de carbono, pero no es claro si contribuyen como fuentes o sumideros. Este trabajo presenta una estimación de los flujos de CO₂ y CH₄ en agua-aire en las lagunas de Chautengo y Tres Palos en Guerrero, México, durante la época de secas y también analiza el papel de esos cuerpos de agua en la emisión o captura de carbono, según sus condiciones ambientales. En Chautengo el promedio de captura de CH₄ fue 8.7 mg/m²/día y la emisión 15.4 mg/m²/día. La captura de CO₂ fue 1001.7 mg/m²/día y la emisión 2241.5 mg/m²/día. En Tres Palos el promedio de captura de CH₄ fue 127.7 mg/m²/día y la emisión 1483.3 mg/m²/día. La captura de CO₂ presentó un valor promedio de 1475 mg/m²/día y la emisión 95 mg/m²/día. Chautengo presentó un equilibrio entre la captura y emisión de CH₄ y CO₂, así que podría considerarse un cuerpo de agua neutro en función de los flujos de gas superficial. La laguna de Tres Palos se puede considerar como fuente de CH₄ y sumidero de CO₂ durante el periodo de estudio. En agua de fondo, la laguna de Chautengo presentó 28 mg/L de carbono inorgánico (CI) promedio y 18 mg/L orgánico (CO). En Tres Palos, las concentraciones en fondo fueron 25 mg/L de CI y 28 mg/L de CO.

Key words: carbon dioxide capture, broadcast, methane, Guerrero, Mexico, source, sink

ABSTRACT

The study of greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), has a global relevance and their accumulation in the atmosphere by emissions from human activities affect the Earth's radiative balance. Coastal lagoons are considered important reservoirs of carbon, but it is unclear whether they contribute as sources or sinks. This paper presents an estimate of CO₂ and CH₄ water-air fluxes in Chautengo and Tres Palos lagoons in Guerrero, Mexico, during the dry season and also examines the role of those water reservoirs in the carbon emission-sequestration, according to environmental conditions. In Chautengo the average capture of CH₄ was 8.7 mg/m²/day and emission

15.4 mg/m²/day. CO₂ capture was 1001.7 mg/m²/day and emission 2241.5 mg/m²/day. In Tres Palos, the average capture of CH₄ was 127.7 mg/m²/day and the emission 1483.3 mg/m²/day. CO₂ capture presented a mean value of 1475 mg/m²/day and emission 95 mg/m²/day. Chautengo presented a balance between capture and emission of CH₄ and CO₂, so it could be considered as a neutral water body based on superficial gas flows. Tres Palos Lagoon can be considered as a source of CH₄ and CO₂ sink during the study period. In bottom water, Chautengo presented 28 mg/L of inorganic carbon (IC) and 18 mg/L of organic (CO). In Tres Palos, the bottom water has 25 mg/L of IC and 28 mg/L of CO.

INTRODUCCIÓN

El ciclo del carbono incluye de manera importante a gases de efecto invernadero como el bióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Estos gases tienen una relevancia de carácter global, ya que su acumulación en la atmósfera afecta el balance radiativo de la Tierra. Por su potencial de calentamiento de la atmósfera se toman como marco de referencia para medir otros gases de efecto invernadero, principalmente el CO₂. (Field *et al.* 2004).

Las zonas costeras son consideradas como áreas altamente productivas, con gran actividad biológica y bioquímica y presentan un fuerte intercambio de materia y energía con el océano (Contreras y Zabalegui 1988; Gattuso *et al.* 1998). Estas áreas tienen un papel importante en el ciclo global del carbono debido a las aportaciones de carbono orgánico e inorgánico que reciben tanto del continente como del mar, dando como consecuencia flujos de CO₂ más intensos (Borges *et al.* 2005).

Las lagunas costeras, son consideradas como contribuyentes importantes de carbono, además de otros nutrientes, hacia los ecosistemas adyacentes (Young *et al.* 2005). Una de las características más importantes de estos ambientes en las zonas tropicales es la vegetación asociada, como los manglares que se pueden constituir en “depósitos de carbono”, al incorporar el CO₂ atmosférico a su metabolismo junto con el carbono inorgánico y residuos orgánicos, los cuales posteriormente quedarán retenidos en los sedimentos (Hedges *et al.* 1997, Young *et al.* 2005), actuando como sumideros.

Por otra parte, existen trabajos, como el de St. Louis *et al.* (2000) en los que se reporta que los embalses costeros emiten grandes cantidades de CO₂ y CH₄ a la atmósfera, por lo que pueden funcionar también como fuentes. Las emisiones mundiales de CO₂ de estos cuerpos de agua se han estimado en aproximadamente 0.8 Pg C/año (Tranvik *et al.* 2009).

Si bien el conocimiento del balance global del

carbono ha ido en aumento, a la fecha existe poca información sobre el intercambio de CO₂ y CH₄ entre las lagunas costeras tropicales y la atmósfera, por lo que hoy en día es de suma importancia realizar estudios que permitan evaluar el comportamiento de estos cuerpos de agua y conocer su potencial para mitigar el calentamiento global. Esta situación hace mayor el interés por realizar investigaciones sobre el ciclo de carbono en los ecosistemas costeros a fin de conocer su comportamiento espacial y temporal, así como las condiciones ambientales que determinan su dinámica.

El objetivo de este trabajo es estimar los flujos de bióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) en dos lagunas costeras del estado de Guerrero, a fin de evaluar la contribución de estos cuerpos de agua a la emisión o captura de carbono en ambos sistemas, así como el contenido de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende dos ecosistemas costeros del estado de Guerrero, México, que son las lagunas costeras de Chautengo y de Tres Palos. El clima de la costa de Guerrero se define en la clasificación de Köppen modificada como tropical subhúmedo, Aw₁, con una temporada de lluvias en verano y un invierno seco (García 2004). La temperatura ambiente presenta una media anual de 27.5 °C. Los meses más calurosos son julio y agosto con temperaturas medias de 28.7 °C y los más fríos son enero y febrero con temperaturas alrededor de 26.5 °C. La precipitación media mensual es de 1360 mm y la anual es de 1187 mm. El régimen de lluvias comienza a mediados de junio y termina en septiembre.

El área de la laguna de Tres Palos (LTP) presentó en el periodo comprendido entre 1971 y 2000, una temperatura máxima anual de 31.2 °C y una mínima de 22.6 °C y la precipitación media anual fue

de 1138 mm. Y el área de la laguna de Chautengo (LCH) tuvo una temperatura máxima anual de 32.2 °C, una mínima de 19.8 °C, y una precipitación promedio de 1414 mm (SMN 2011).

Laguna de Tres Palos

La laguna se localiza en la región de la Costa Chica de Guerrero, a 25 km al Este del puerto de Acapulco, entre 99°39' y 99°47' de longitud Oeste y 16°47' y 16°49' de latitud Norte (**Fig. 1A**). Tiene una superficie aproximada de 5500 ha, sus dimensiones son 16 km de longitud y 6 km de ancho (Gil 1991, Contreras 1993). En época de lluvias los vientos predominantes son del SE y durante los meses de secas son del NE. La evaporación media anual es de 1900 a 2000 mm (Estación Meteorológica del Aeropuerto de Acapulco No. 12-001). Es un cuerpo de agua que se ha ido aislando del contacto con el mar. Se conecta estacionalmente con éste a través de un canal, por lo cual su salinidad es muy baja durante todo el año.

La laguna de Tres Palos es considerada como una laguna somera y de fondo plano, con una profundidad promedio de 3.43 m (Alcocer y Escobar 1993), de acuerdo con De La Lanza *et al.* (2008) es hipereutrófica y predominantemente oligohalina por su

aislamiento del mar y por el aporte del río la Sabana, su salinidad está en el rango de 2.2 a 3.7 ups. El tipo de sedimento es limo y limo arenoso. La vegetación circundante es principalmente mangle, géneros: *Laguncularia* y *Avicennia*; palmera de coco, carrizos (*Arundo sp*) y tule (*Typha sp*).

La principal actividad de la población que vive en las orillas de la LTP es el turismo y la pesca.

Laguna de Chautengo

Situada en la región de la Costa Chica de Guerrero a 100 km al sureste del puerto de Acapulco, se localiza entre 99°3' y 99°8' de longitud Oeste y 16°36' y 16°38' de latitud Norte (**Fig. 1B**). Se comunica con el Océano Pacífico mediante una boca con aperturas cíclicas anuales con una duración promedio de 8 meses (julio-febrero) (Contreras 1993). Tiene aproximadamente una longitud de 10 km, un ancho de 5 km y una extensión de 3400 ha, y una profundidad media de 1.5 m. En esta laguna desembocan los ríos Nexpa y Copala, el tipo de sedimento es arena-limo-arcilla, limo-arcilla-limo. Está rodeada en su mayoría por comunidades de mangle de las especies *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*.

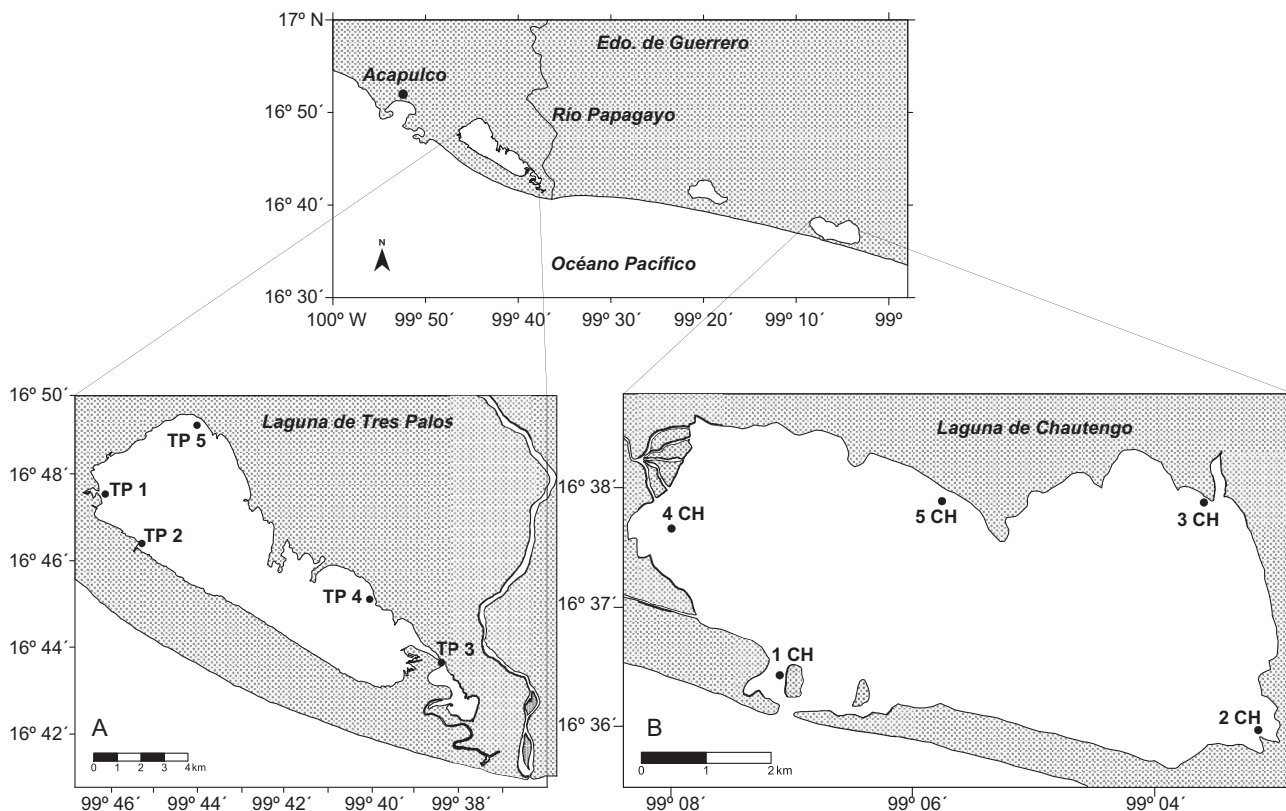


Fig 1. Área de estudio y ubicación de las estaciones de muestreo: Laguna de Tres Palos (A) y Laguna de Chautengo (B)

De acuerdo con Rendón-Dircio *et al.* (2012), la transparencia media de la laguna es de 0.48 m que abarca el 57% de la columna de agua, la temperatura media anual es 29.8 °C, tiene una salinidad dependiente de su relación con el mar, que va desde 0.7 hasta 38 ups, con un promedio de 20.6 ups, el pH es 7.4 en promedio, pero con barra abierta alcanza 8.1; la velocidad promedio de la corriente es 2 m/min y los vientos dominantes del SW tienen una velocidad promedio de 2.9 m/s. (Observatorio Meteorológico 805 de la CNA de Acapulco 1997-1998).

Muestreo de campo

Se realizaron tres campañas de muestreo en la estación seca del año, durante los meses de abril de 2007, febrero y mayo de 2008 en Chautengo y abril de 2007 y 2008 en Tres Palos. Se establecieron cinco sitios de muestreo en cada laguna tomando en cuenta las desembocaduras de los ríos, la barra de las lagunas, los asentamientos humanos circundantes y las zonas de manglar.

En Tres Palos la estación 1TP se localiza en la desembocadura del río la Sabana, la 2TP frente al aeropuerto internacional de Acapulco, 3TP en el canal, 4TP aledaña a la comunidad El Quemado y 5TP cercana a la localidad de San Pedro de las Playas (**Fig. 1A**). En Chautengo la estación 1CH se encuentra cercana a la localidad Pico del Monte, 2CH en la desembocadura del río Copala, 3CH aledaña a la comunidad Las Peñas, 4CH en la desembocadura del río Nexpa y la estación 5CH cerca de la localidad de Chautengo (**Fig. 1B**).

En los cinco sitios seleccionados en cada laguna se realizaron muestreos para obtener la concentración de CH₄ y CO₂ en el aire sobre la superficie, y en la columna de agua, superficial y de fondo (a un metro de profundidad). También se tomaron muestras para determinación de carbono inorgánico (CI), orgánico (CO) y total (CT), en agua de superficie y de fondo, en ambas lagunas.

Las muestras de aire en la superficie de las lagunas fueron tomadas siguiendo un método similar al propuesto por Lekphet *et al.* (2005) para registrar flujos de CO₂ y CH₄. Se utilizó una cámara cerrada de PVC montada sobre una base cilíndrica flotante de poliuretano, con 9.75 cm de radio y 15 cm de altura. Con una jeringa y aguja de calibre 22 se tomaron 20 mL de muestra que fueron inyectados en viales (al vacío) de vidrio sellados. Se tomó una muestra al tiempo cero (muestra inicial) y una segunda a los 20 minutos (muestra final). Se determinó la concentración de los gases por cromatografía. El intercambio de CO₂ y CH₄ entre agua y atmósfera se estimó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Flujo = \frac{(C_f - C_i) \times Volumen}{Tiempo \times Área} \quad (1)$$

Donde C_f es la concentración final y C_i la inicial, el volumen y el área corresponden a la cámara. Se consideró que hay captura de gases cuando la diferencia de concentraciones fue negativa y emisión cuando fue positiva.

Las muestras de agua de superficie y fondo se tomaron con una botella Van-Dorn y se colocaron en frascos de vidrio de 20 mL con *head-space*; para la determinación de carbono total (CT), inorgánico (CI) y orgánico (CO) las muestras fueron puestas en frascos de plástico de 250 mL.

Análisis de laboratorio

La concentración de gas en las diferentes muestras de agua y aire se obtuvo usando un cromatógrafo marca Agilent serie 6890 acoplado a un metanizador, con detector FID, (*flame ionization detector*), una columna empacada Porapak Q de 0.32 mm de diámetro interno de 6 pies de largo y con malla de 80/100 × 1/8 pulgadas. Las temperaturas de trabajo fueron: en el metanizador de 375 °C, en el FID 300 °C, la del inyector 100 °C y la del horno 35 °C. Se utilizó nitrógeno (N₂) como gas acarreador, siendo el flujo de aire comprimido de 400 mL/min y el del gas catalizador del FID (H₂) de 30 mL/min.

Se elaboraron dos curvas de calibración usando el método de mínimos cuadrados (Miller y Miller 2002) con dos estándares certificados de 50 ppmv y de 400 ppmv para establecer un control de calidad para las mediciones de CH₄ y CO₂, lo que permitió validar el método de análisis. La curva de CH₄ se realizó con 9 puntos, obteniéndose un coeficiente de correlación de $r^2 = 0.999$, una pendiente de 8.02 y la ordenada al origen de -5.06. El límite de detección se estableció en 0.15 ppm y el de cuantificación en 6.76 ppm. La curva de calibración CO₂ se realizó con 6 puntos, dando un coeficiente de correlación $r^2 = 0.999$, una pendiente de 7.48, una ordenada al origen de 45.54. El límite de detección fue de 0.40 ppm y el de cuantificación 11.81 ppm.

La determinación de gas en superficie se hizo de la siguiente manera: después de la validación de los datos se seleccionaron las muestras que cumplieran con el estándar establecido, por lo que se consideraron 30 muestras para CH₄ en cada una de las dos lagunas, 20 para el análisis de CO₂ en Chautengo y 15 para la laguna de Tres Palos.

Tanto el CT como el CI en muestras de agua, fueron determinados con un analizador coulom-

bimétrico CM5014 (UIC, Inc.), acoplado a un módulo de acidificación CM5130 y a un horno de combustión (CM5300). El carbono orgánico se calculó por diferencia entre el CT y el CI (Johnson *et al.* 1999).

Los parámetros meteorológicos (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento) se obtuvieron con una estación meteorológica portátil marca Davis modelo Weather Wizard III. También se hicieron mediciones *in situ* de pH, temperatura del agua y salinidad.

La caracterización de las lagunas de Chautengo y Tres Palos en relación con la dinámica de los flujos de CH₄ y CO₂ y especies de carbono se realizó de la siguiente forma: en cada estación de muestreo se calcularon los promedios del flujo de CO₂ y CH₄; carbono orgánico y total y la concentración en los cuerpos de agua de CO₂ y CH₄. Posteriormente, se obtuvo el promedio de cada variable en ambas lagunas.

A fin de establecer las diferencias existentes entre las lagunas con respecto a la variación de la concentración de CH₄, CO₂ y carbono en agua de superficie y fondo así como a los datos de captura y emisión de CH₄ y CO₂, se aplicó una prueba de *t* de Student para muestras independientes a un nivel de confianza de 95%.

RESULTADOS

Concentración de CH₄ y CO₂ en el ambiente

La concentración de CH₄ en el aire de superficie en las distintas épocas de muestreo fluctuó entre 3 y 13 ppm en la laguna de Chautengo y entre 7 y 13 ppm en la laguna de Tres Palos. Fue durante la campaña de mayo que se encontraron las concentraciones más altas, mientras que en abril en ambas lagunas se observaron los valores más bajos.

En Chautengo, la concentración promedio de CO₂ en el aire de superficie fue 478 ppm en febrero y 508 ppm en mayo, en tanto que Tres Palos presentó una concentración promedio de 478 ppm en el mes de abril.

Concentración de CH₄ y CO₂ en agua de superficie y fondo

Chautengo presentó una variación de CH₄ en agua de superficie de 13 a 21 ppm y de 14 a 20 ppm en agua de fondo. En Tres Palos la concentración de CH₄ fue mayor que en Chautengo, los valores oscilaron entre 39 a 56 ppm en agua de superficie y 36 y 62 ppm en agua de fondo.

Las variables ambientales tomadas de la columna de agua en el área de estudio se presentan en el **cuadro I**.

La concentración promedio de CO₂ fue similar en ambas lagunas. En Chautengo la concentración en agua de superficie fue de 264 ppm y 298 ppm en agua de fondo, en tanto que en Tres Palos los valores promedio de superficie fueron de 232 ppm y 272 ppm en agua de fondo.

Concentración de CI, CO y CT

La laguna de Chautengo presentó las concentraciones mayores de CI, CO y CT en agua de fondo. Los valores promedio más altos fueron los de CT en tanto que el CO mostró los más bajos. En Tres Palos, las concentraciones más altas fueron las de CT y CO en ambos estratos siendo estas superiores a las encontradas en Chautengo. El CI mostró los valores más bajos 22.2 y 25.3 mg/L en superficie y fondo respectivamente. De manera general las concentraciones mayores de las distintas especies de carbono se observaron en el agua de fondo (**Fig. 2**).

Captura y emisión de CH₄ y CO₂

Se estimaron los flujos de CH₄ y CO₂ para definir el comportamiento de cada una de las lagunas como fuente o sumidero de estos gases, utilizando la Ec. 1

Los valores de temperatura y pH fueron muy similares en ambas lagunas, mientras que la salinidad fue notablemente mayor en Chautengo (**Cuadro II**).

En Chautengo la captura de CH₄ fluctuó entre 1 y 21 mg/m²/día y la emisión entre 1 y 97 mg/m²/día. La captura de CO₂ presentó variaciones, de 124 a 2306 mg/m²/día y la emisión de 95 a 5585 mg/m²/día.

CUADRO I. PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES AMBIENTALES EN AGUA DE SUPERFICIE Y AGUA DE FONDO EN LAS LAGUNAS DE CHAUTENGO Y TRES PALOS

Localidad	Agua de superficie			Agua de fondo		
	Salinidad	pH	Temperatura	Salinidad	pH	Temperatura
Chautengo	33.1% ± 3.4%	8.2 ± 0.2	29.7 ± 1.7	33.3% ± 3.4%	8.2 ± 0.2	29.6 ± 1.6
Tres Palos	0.6% ± 1.7%	8.8 ± 0.6	30.5 ± 1.1	0.8% ± 2.2%	8.7 ± 0.6	30.4 ± 1.1

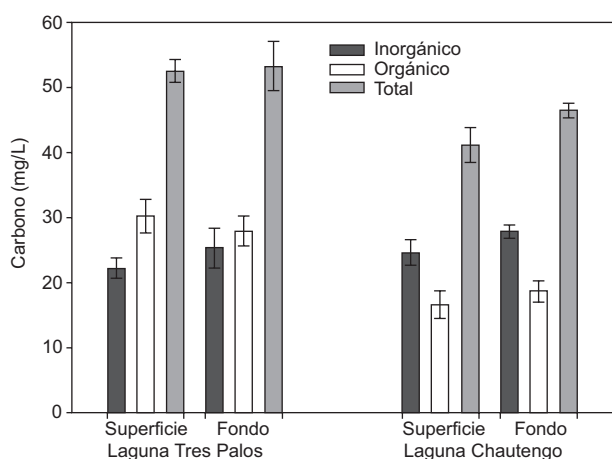


Fig 2. Concentración promedio de CI, CO y CT y error estándar en agua de superficie y fondo en las lagunas de Tres Palos y Chautengo

En Tres Palos los valores de captura de CH_4 oscilaron de 2 a 946 $\text{mg/m}^2/\text{día}$ y los de emisión entre 10 y 4342 $\text{mg/m}^2/\text{día}$. En esta laguna, los valores promedio de captura de CO_2 fueron mucho mayores a los de emisión (**Cuadro II**).

Los resultados de la prueba t aplicada a los distintos componentes de CO_2 , CH_4 y especies de carbono en cada laguna señalan la existencia de diferencias significativas entre algunos variables como se refleja en el **cuadro III**. Estos resultados indican que ambas lagunas tienen una dinámica diferente con respecto a la variabilidad de los distintos factores analizados.

DISCUSIÓN

Una de las principales características de las lagunas costeras del Pacífico mexicano es que cierran temporal o permanentemente su comunicación con el mar por lo que estos cuerpos de agua se mantienen aislados durante algunas épocas del año (Contreras 1993), situación que favorece cambios biogeoquímicos, así como un incremento en la concentración de nutrientes y contaminantes.

De acuerdo con Contreras (1993) y De La Lanza *et al.* (2008), la laguna de Tres Palos permanece cerrada

la mayor parte del año por lo que existe poco movimiento de marea generando un intercambio mínimo de materia a través de la columna de agua. Esta condición se reflejó en la diferencia de concentraciones de CH_4 registradas en este estudio entre el agua de superficie y la de fondo, siendo mayores en este último estrato como consecuencia de la acumulación de materia orgánica debido a la estática del sistema.

En Chautengo, los valores de CH_4 en ambos estratos fueron muy similares, lo que indica que en esta laguna el proceso de mezcla es mayor, lo cual se debe a que este cuerpo de agua presenta una mayor conexión con el mar (Contreras 1993, Rendón-Dircio *et al.* 2012), a la poca profundidad registrada (1.5 m) y a la acción del viento, que tuvo una velocidad promedio de 1.2 m/s.

La dinámica descrita anteriormente en cada laguna refleja que el proceso de mezcla y las condiciones de aislamiento juegan un papel fundamental en la distribución y concentración de CH_4 , hecho que se confirma con los resultados de la prueba de t al mostrar diferencias significativas de este componente entre ambas lagunas.

En Chautengo, el contenido más alto de carbono orgánico (CO) en columna de agua se observó en el sitio 3CH aledaño a la comunidad Las Peñas donde se practica el cultivo de peces. Se ha observado que en zonas costeras donde existen sistemas de cultivo se presenta un alto contenido de materia orgánica debido, entre otros factores, a las heces y restos de alimento, lo que lleva a un aumento considerable de contenido de carbono, nitrógeno y fósforo (Buschmann 2001).

En Tres Palos el mayor contenido de CO para agua de superficie y fondo se encontró en las estaciones 3TP y 4TP (**Fig. 1A**) ambas con poco movimiento de corriente. De La Lanza-Espino *et al.* (2008), señalan que estas áreas reciben de manera directa la descarga de aguas residuales procedentes de las localidades aledañas, hecho que puede generar una gran acumulación de materia orgánica y por lo tanto, concentraciones elevadas de CO e incluso anoxia. Por otra parte, los valores más altos de CI en agua de superficie se presentaron en la desembocadura del río

CUADRO II. VALORES PROMEDIO DE LA CAPTURA Y EMISIÓN DE CH_4 Y CO_2 Y VARIABLES AMBIENTALES EN LAS LAGUNAS DE CHAUTENGO Y TRES PALOS

Localidad	CH_4 $\text{mg/m}^2/\text{día}$		CO_2 $\text{mg/m}^2/\text{día}$		Parámetros ambientales		
	Captura	Emisión	Captura	Emisión	Salinidad	pH	Temperatura °C
Chautengo	8.7	15.4	1001.7	2241.5	33.2%	8.2	29.7
Tres Palos	127.7	1483.2	1474.9	94.9	0.7%	8.8	30.5

CUADRO III. RESULTADOS DE LA PRUEBA *t* DE STUDENT

Variables Chautengo (Grupo 1) vs Tres Palos (Grupo 2)	Valor de <i>t</i>	gl	Valor de P (Sig. Bilateral)
CH ₄ superficie	-2.25	29.92	0.032
CH ₄ fondo	-2.30	29.91	0.028
Carbono orgánico superficie	5.82	20.47	0.000
Carbono orgánico fondo	4.97	22.77	0.000
Carbono total superficie	4.19	13.42	0.001
Carbono total fondo	2.51	16.83	0.022
Emisión de CH ₄	-4.64	18.01	0.000
Emisión de CO ₂	-1.30	9.01	0.022

Prueba de *t* para muestras independientes a un nivel de confianza de 95% ($P < 0.05$)

La Sabana (1TP). Las concentraciones observadas de CO y carbono inorgánico (CI) en esta laguna fueron superiores a las registradas en Chautengo, reflejando diferencia de condiciones ambientales entre ambos cuerpos de agua.

Debido al acelerado crecimiento urbano, el cambio de uso del suelo y la deforestación generados en las costas tropicales de México es posible que exista una alteración de las emisiones y capturas de CO₂ y CH₄ diferenciada de acuerdo a la magnitud de los cambios experimentados en cada área.

Este hecho se reflejó en las altas concentraciones de CH₄ y CO₂ en la atmósfera y que pueden estar directamente relacionadas con los diferentes procesos generados en las márgenes continentales, como la fuerte entrada de nutrientes y de carbono de tierra a través de los ríos. Asimismo, la producción, la degradación y la exportación de materia orgánica en las zonas costeras traen como consecuencia un mayor flujo de estos gases efecto invernadero a la atmósfera (Duarte y Prairie 2005, Borges *et al.* 2006).

Los resultados indican que la emisión y captura de CH₄ y CO₂ es generada por una serie de factores específicos en cada laguna como son las condiciones ambientales, sitios de mayor movimiento y remoción continua de materia orgánica, aportes de aguas continentales e influencia de actividad antrópica.

En Chautengo se presenta un equilibrio en la tasa de captura y emisión de metano, sin embargo la emisión de bióxido de carbono fue mayor que su captura. Este comportamiento puede deberse a las condiciones ambientales observadas en la laguna, esto es, temperatura y salinidad altas (**Cuadro II**) situación que coincide con lo descrito por Raven y Falkowski (1999), García-Luque *et al.* (2005) y Álvarez-Borrego (2007) quienes mencionan que en aguas cálidas y salinas la solubilidad del CO₂ es menor, lo que genera una mayor emisión de este gas a la atmósfera.

La laguna de Tres Palos mostró una emisión muy elevada de CH₄ y alto contenido de carbono orgánico en el agua, reflejando una alta actividad metanogénica en la zona de sedimentos, dado que es un sistema que no está conectado con el mar. Esta laguna recibe el aporte del río La Sabana que acarrea una gran cantidad de componentes biodegradables. De acuerdo con Brockman *et al.* (1990), Borges y Frankignoulle (1999) y Cabeçadas *et al.* (2002) los aportes fluviales acarrear grandes cantidades de material orgánico tanto particulado como disuelto, lo que favorece la remineralización provocando condiciones anaeróbicas en el sistema, lo que conlleva a una sobresaturación de CH₄ que es emitido a la atmósfera. Por otro lado, Watson *et al.* (1995) mencionan que las descargas de los ríos también transportan altas concentraciones de nutrientes que favorecen la producción primaria generando una subsaturación de CO₂.

La captura de CO₂ en Tres Palos es mucho mayor que la emisión, lo cual se puede relacionar con la alta actividad fotosintética, la baja salinidad y la alcalinidad de la laguna que permiten capturar grandes cantidades de CO₂ en el agua (Seinfeld y Pandis 1998, Raven y Falkowski 1999).

Las características físico-químicas de la columna de agua, en particular el pH y la salinidad, así como la hidrodinámica asociada a los vientos fueron variables que mostraron relación con los flujos y concentración superficial de los gases.

La **figura 3** muestra un modelo que proponemos sobre la dinámica en la laguna de Tres Palos en cuanto a captura de CO₂ y emisión de CH₄. La descomposición de materia orgánica en los sedimentos es la principal fuente de metano y la alta actividad fotosintética mantiene la captura de carbono.

En Chautengo se tienen tasas de emisión y captura comparables con los resultados obtenidos por otros autores en distintas zonas geográficas y donde

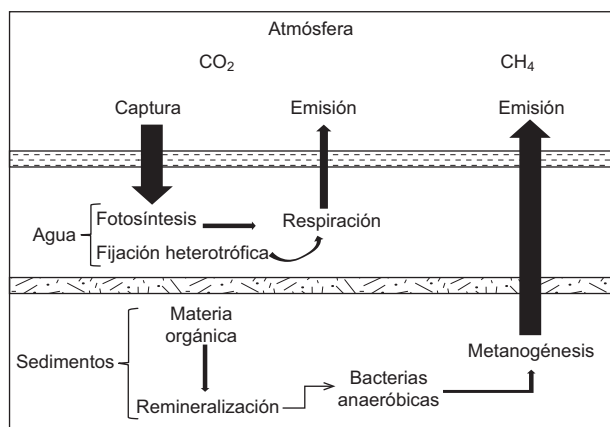


Fig 3. Modelo propuesto del proceso de captura y emisión de CO_2 y CH_4 en la laguna de Tres Palos durante la época de secas

utilizaron cámaras flotantes (Abril y Borges 2004, Tremblay *et al.* 2009, Vachon *et al.* 2010). En esos estudios los cuerpos de agua tienen comunicación con el océano y por lo tanto capas sedimentarias delgadas.

Chautengo, con una extensión de 3400 ha emite 0.084 Gg/año de CH_4 y 15 Gg/año de CO_2 . Esta laguna tiene un intercambio equilibrado de gases gracias a su interacción directa con el océano que permite una exportación mayor de CO y CI. De acuerdo con Rendón-Dircio *et al.* (2012), la laguna de Chautengo presenta características de un cuerpo de agua somero y tropical con condiciones adecuadas para el desarrollo de la fauna y flora acuática. Esto a pesar de ser una laguna sometida a una fuerte presión, debida principalmente a los efectos de deterioro propiciado por asentamientos humanos, el desarrollo industrial y agrícola, los fenómenos meteorológicos, el mal manejo del ambiente, la sobrepesca y el turismo.

Tres Palos tiene una superficie de 5500 ha, emite 27 Gg/año de CH_4 y captura 28 Gg/año de CO_2 . Este cuerpo de agua presenta un fuerte impacto debido a la gran cantidad de asentamientos humanos aledaños (INEGI 2010) los cuales vierten sus desechos a la laguna, por lo que la tasa de emisión de metano es muy grande. De La Lanza *et al.* (2008) señalan que la laguna de Tres Palos ha tenido fuertes impactos debido al incremento de las fuentes de contaminación como descargas de aguas residuales, lo que la ha llevado a tener niveles altos de demanda química de oxígeno (96-476 mgO_2/L) y de demanda bioquímica de oxígeno (43.6-116 mgO_2/L), lo que refleja la alta contaminación del sistema.

CONCLUSIONES

El periodo de muestreo (secas) permitió conocer el comportamiento de ambas lagunas en condiciones de menor interferencia externa y comparar su dinámica a fin de caracterizarlas como cuerpos de agua emisores o capturadores de CO_2 y CH_4 .

Tres Palos es un sistema donde el balance entre la producción de metano y la captura de CO_2 , es favorable a éste último, lo que significa que tiene una tendencia mayor a ser sumidero de carbono. En tanto, en un ecosistema menos viciado, como Chautengo, se observa que el intercambio es más equilibrado.

Estos resultados muestran que la dinámica de estas dos lagunas costeras es diferente, tanto por sus características físicas como por su entorno ambiental y actividades humanas, por lo que se plantea que la emisión y captura de CH_4 y CO_2 está íntimamente ligada a su manejo.

El conocimiento del comportamiento de los cuerpos de agua costeros puede contribuir a una planificación sustentable que propicie la disminución de emisiones y el aumento de la captura de gases invernadero. Así, es necesario realizar estudios en diferentes épocas del año, implementando muestreos continuos que abarquen ciclos diurnos, a fin de conocer mejor los procesos responsables de la variabilidad de los flujos de carbono y su intercambio con la atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ma. Isabel Saavedra por el análisis de contenido de carbono en las muestras de agua, a José Manuel Hernández por su asesoría en el análisis por cromatografía de gases, a Faustino Zavala por su apoyo técnico, a Rafael Navarro y José de la Rosa por la preparación de las mezclas de los gases estándar.

REFERENCIAS

- Abril G. y Borges A. (2004). Carbon dioxide and methane emissions from estuaries. En: *Greenhouse gas emissions: fluxes and processes, hydroelectric reservoir and natural environments* (A. Tremblay, A. Varfalvy, C. Roehm y M. Garneau Eds.). Environmental Science Series, Springer, Berlín, 730 pp.
- Alcocer J. y Escobar E. (1993). Morphometric characteristics of six Mexican coastal-lakes related to productivity. *Rev. Biol. Trop.* 41, 171-179.

- Álvarez-Borrego S. (2007). Principios generales del ciclo del carbono en el océano. En: *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. (B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola-Castro, Eds.). Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, CICESE, México. pp. 11-28.
- Borges A.V. y Frankignoulle M. (1999). Daily and seasonal variations of the partial pressure of CO₂ in surface seawater along Belgian and southern Dutch coastal areas. *J. Mar. Syst.* 19, 251-266.
- Borges A.V., Delille B. y Frankignoulle M. (2005). Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystems counts. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14601, doi:10.1/2005GL023053.
- Borges A.V., Schiettecatte L.S., Abril G., Delille B. y Gazeau F. (2006). Carbon dioxide in European coastal waters. *Estuar. Coast. Shelf S.* 70, 375-387.
- Brockman U.H., Laane R.W.P.M. y Postma H. (1990). Cycling of nutrient elements in the North Sea. *Neth. J. Sea Res.* 26, 239-264.
- Buschmann A.H. (2001). *El impacto ambiental de la acuicultura*. Terram Publicaciones, Santiago de Chile, 67 pp.
- Cabeçadas G., Momteiro M.T., Brogueira M.J., Carvaco M.H., Gonçalves C., Ferronha H., Nogueira M., Ribeiro A.P., Cabeçadas P., Guerra M., Gaudêncio M.J. y Passos M. (2002). *Caracterização ambiental da zona costeira adjacente aos estuários do Tejo e Sado*. Relatório, 57 pp.
- Contreras E.F. y Zabalegui M.L.M. (1988). *Aprovechamiento del litoral mexicano*. Centro de Ecodesarrollo, Secretaría de Pesca, México, 128 pp.
- Contreras E.F. (1993). *Ecosistemas costeros mexicanos*. Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad y Universidad Autónoma-Metropolitana-Iztapalapa. 1a ed. México 415 pp.
- De La Lanza-Espino G., Alcocer D.J., Moreno R.J.L. y Pulido H.S. (2008). Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la laguna de Tres Palos, Guerrero, México. *Hidrobiológica* 18, 21-30.
- Duarte C.M. y Prairie Y.T. (2005). Prevalence of Heterotrophy and atmospheric CO₂ emissions from aquatic ecosystems. *Ecosystems* 8, 862-870.
- Field C.B., Raupach M.R. y Victoria R. (2004). The carbon-climate-human-system, 1-27 p. En: *The global carbon cycle: Integrating humans, climate, and the natural world* (C. Field y M.R. Raupach, Eds.). Island Press, Washington, D.C. 527 pp.
- García E. (2004). *Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México. 246 pp.
- García-Luque E., Forja J. M. y Gómez-Parra A. (2005). Cuantificación de flujos de CO₂ agua-atmósfera en estuarios mediante simulación en laboratorio. *Cienc. Mar.* 31, 125-133.
- Gattuso J.P., Frankignoulle M. y Wollast R. (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 49, 405-433.
- Gil G.J.S. (1991). La diversidad ictiológica y distribución de acuerdo a la salinidad en la Laguna de Tres Palos, Gro. Tesis Prof. ESEM, UAG. 92 pp.
- Hedges J.I., Keil R.G. y Benner R. (1997). What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Org. Geochem.* 27, 195-212.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.censo2010.org.mx>.
- Johnson K.M., Kotzinger A., Mintrop L., Duinker J.C. y Wallace D.W.R. (1999). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: measurement and internal consistency of underway surface TCO₂ concentrations. *Mar. Chem.* 67, 123-44.
- Lekphet S., Nitisoravut S. y Adsavakulchai S. (2005). Estimating methane emissions from mangrove area in Ranong Province, Thailand. *Songklanakarink J. Sci. Technol.* 27, 153-163.
- Miller N.J. y Miller J.C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica*. 1a ed. Pearson Educación. Madrid, España. 296 pp.
- Raven J.A. y Falkowski P.G. (1999). Oceanic sinks for atmospheric CO₂. *Plant Cell Environment* 22, 741-755.
- Rendón-Dircio J.A., Ponce-Palafox J.T., Rojas-Herrera A., Arredondo-Figueroa J.L., De La Lanza G. y Flores-Verdugo F. (2012). Morfometría, hidrodinámica y físico-química del agua de la laguna de Chautengo, Guerrero, México. *Rev. Bio Ciencias* 4, 25-37.
- Seinfeld J.H. y Pandis S.N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics, from air pollution to climate change*. A Wiley&Sons, EUA, 1326 pp.
- SMN (2011). Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mxSt>.
- Louis V.L., Kelley 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.
- Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kuster T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verschoor A.M., von Wachenfeldt E., y Weyhenmeyer G.A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate: *Limnol. Oceanogr.* 54, 2298-2314.

- Tremblay A., Demers C., Bastien J. y Demarty M. (2009). Eastman-1 Net GHG Emissions Project – The use of automated systems to measure greenhouse gas emissions from reservoirs. Proceedings of Waterpower XVI, July 27- 30, Spokane, Washington, EUA.
- Vachon D., Prairie Y.T. y Cole J.J. (2010). The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange, *Limnol. Oceanogr.* 55, 1723-1732.
- Watson A.J. (1995). Are upwelling zones sources or sinks of CO₂? En: *Upwelling in the oceans: Modern processes and ancient records* (C.P. Summerhayes, K.C. Emeis, M.V. Angel, R.L. Smith y B. Zeitzschel, Eds.). Wiley pp. 321-336.
- Young M., Eagle M.G., Herrera J.S. y Paytan A. (2005). Export of dissolved and particulate carbon and nitrogen from a mangrove-dominated lagoon, Yucatan Peninsula, Mexico. *International J. Ecol. and Environ. Sciences* 31, 189-202.