

4.4. Influencia de la profundidad y el estado trófico en el flujo de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) en lagos kársticos tropicales

Vargas-Sánchez Mariana¹; Alcocer Javier²; Sánchez-Carrillo Salvador³; Oseguera-Pérez Luis²; Rivera-Herrera Montserrat⁴ y Soria-Reinoso Ismael⁴

¹Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Ciudad de México, México.

²Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Tlalnepantla, México.

³Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana, Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (MNCN-CSIC).

⁴Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: marvargas@ciencias.unam.mx

Resumen

Los ecosistemas acuáticos epicontinentales son fuentes importantes de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera a nivel mundial. Las emisiones de GEI están estrechamente relacionadas con el estado trófico y con la profundidad de los cuerpos de agua. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue estimar la emisión de GEI tanto en la zona litoral como en la profunda de tres lagos kársticos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” con distinto estado trófico. El estudio se llevó a cabo durante la temporada fría/seca (enero de 2022). Los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O se midieron utilizando cámaras flotantes dinámicas y la concentración dentro de cada cámara fue estimada por espectroscopia fotoacústica. Los tres lagos actuaron como fuente de CO₂ y CH₄ y como sumidero de N₂O. Únicamente el flujo de CH₄ presentó variación entre la zona profunda y el litoral. La estimación de emisiones en CO_{2eq} muestra que Tziscão contribuye significativamente a las emisiones de GEI en comparación con San Lorenzo y San José.

Palabras clave: *GEI, lagos kársticos, eutrofización, Chiapas, México*

Abstract

Epicontinental aquatic ecosystems are important sources of greenhouse gases (GHG) to the atmosphere worldwide. GHG emissions are closely related to the trophic status and depth of water bodies. Therefore, the objective of this study was to estimate GHG emissions in both the littoral and deep zones of three karst lakes of the “Lagunas de Montebello” National Park with different trophic statuses. The study was conducted during the cold/dry season (January 2022). CO₂, CH₄, and N₂O fluxes were measured using dynamic floating chambers, and the concentration within each chamber was estimated by photoacoustic spectroscopy. The three lakes functioned as a source of CO₂ and CH₄ and as a sink of N₂O. Only the CH₄ flux varied between the deep zone and the littoral. The estimation of emissions in CO_{2eq} shows that Tziscão contributes significantly to GHG emissions compared to San Lorenzo and San José.

Keywords: *GHG, karst lakes, eutrophication, Chiapas, México*

Introducción

El ciclo del carbono (C) y del nitrógeno (N) representan un vínculo entre el ambiente acuático, el terrestre y la atmósfera (Butman *et al.*, 2018; Battin *et al.*, 2009). El C y el N que ingresa a los sistemas acuáticos epicontinentales (SAE) está sujeto a transformaciones que pueden resultar en la producción o consumo de gases de efecto invernadero (GEI; Ortiz-Llorente & Alvarez-Cobelas, 2012; Li *et al.*, 2021; Prairie & Cole, 2022). Se estima que las emisiones de GEI de los SAE *sensu lato* pueden superar los 3.9 Pg C al año, cifra equivalente al sumidero global de C del océano (Drake *et al.*, 2017; Tromboni *et al.*, 2022).

El intercambio de GEI en la interfaz aire-agua depende de varios factores, entre ellos se encuentran: a) cambios en la solubilidad del gas, b) procesos biogeoquímicos que producen o consumen los gases, c) la tasa física de intercambio del gas entre el aire y el agua y d) la morfometría y morfología de los cuerpos de agua. Las tasas de emisión de GEI difieren en lagos profundos y someros (Li *et al.*, 2020). El procesamiento de C y la emisión de GEI en los SAE están estrechamente relacionados con su estado trófico (Del Sontro *et al.*, 2018; Beaulieu *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2021) y se especula que los lagos someros emiten cantidades mayores de GEI en comparación con los profundos debido a que la metanogénesis es estimulada por un alto aporte de C proveniente de la vegetación acuática del litoral del lago (Loken *et al.*, 2019). Algunos trabajos sugieren que los SAE funcionan como sumideros de CO₂ si el nivel trófico se incrementa (p.ej., Pacheco *et al.*, 2014; Grasset *et al.*, 2020). En contraparte, otros autores sostienen que lagos que reciben efluentes ricos en nutrientes emiten más GEI a la atmósfera en comparación con los lagos que no han sido afectados por el impacto antropogénico (Huttunen *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2020).

Los sistemas kársticos ocupan alrededor del 15% de la superficie continental de la Tierra y, en muchas regiones, los acuíferos kársticos son la principal fuente de abastecimiento de agua potable (Ford y Williams, 2007; Stevanovič, 2019). Las “Lagunas de Montebello” representan uno de los sistemas kársticos más importantes de México. La interacción entre las rocas y el agua (subterránea y la superficial) ha creado un paisaje con características específicas (producto de la disolución de las rocas y procesos de fractura; Zhou & Beck, 2011), dando lugar a más de 130 lagos con diferentes características morfométricas (Alcocer *et al.*, 2016) y ecológicas (Vargas-Sánchez *et al.*, 2022; Alcocer *et al.*, 2024). En el presente trabajo estudiamos la variación espacial (zona litoral y pelágica) de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en tres lagos kársticos con diferente estado trófico para elucidar la influencia de las características morfométricas, por un lado, así como el impacto de las actividades antropogénicas (*i.e.*, estado trófico) en la emisión de GEI.

Materiales y Métodos

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) se localiza en el sureste de Chiapas (16°04'-16°10' N y 91°37'-91°47' O, 1,500 m s.n.m.) entre los municipios de La Independencia y La Trinitaria (CONANP, 2011). El sistema pertenece a la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta (CONANP, 2007) y, aunque su principal fuente de agua superficial es el Río Grande de Comitán, el aporte de agua subterránea es el más relevante. El clima es templado lluvioso con un verano largo, fresco y húmedo, con un régimen de precipitaciones típico de verano [Cb(m)(f)ig] (García, 2004). La temperatura media anual y la precipitación son de 18.67 °C y de 1,960 mm, respectivamente (Estación Meteorológica Automática N15DA7496 de CONANP, 16°06'52.5 N, 91°43'48.2 W). Para el estudio se seleccionaron tres lagos con estado trófico contrastante (Fig. 1): Tziscão (prístino/ultra-oligotrófico; TZ), San José (prístino/oligotrófico; SJ) y San Lorenzo (impactado-eutrófico; SL). Las principales características fisicoquímicas y biológicas de los lagos se enlistan en el Cuadro 1 (Vargas-Sánchez *et al.*, 2023).

El muestreo se llevó a cabo durante la temporada fría/seca (enero de 2022). Se estimaron los flujos de GEI desde la superficie del agua en la zona pelágica y en la litoral de cada cuerpo de agua utilizando cámaras flotantes dinámicas (polietileno de 5L).

Cuadro 1. Valores promedio $\pm$ desviación estándar de las principales fisicoquímicas y biológicas en los lagos Tzisco (TZ), San José (SJ) y San Lorenzo (SL) durante la temporada fría/seca (enero de 2022).

Lago	T (°C)	OD (mg L ⁻¹)	Z _{EU} (m)	Clor-a (mg L ⁻¹)	NT (μmol L ⁻¹)	PT (μmol L ⁻¹)
TZ	19.2 $\pm$ 0.5	5.4 $\pm$ 0.6	21.7	0.5 $\pm$ 0.1	4.0 $\pm$ 2.6	39.4 $\pm$ 6.9
SJ	21.6 $\pm$ 0.7	6.1 $\pm$ 0.2	7.0	0.8 $\pm$ 0.1	2.3 $\pm$ 1.3	68.0 $\pm$ 25.6
SL	21.7 $\pm$ 0.1	10 $\pm$ 0.1	1.1	50.1 $\pm$ 1.1	16.3 $\pm$ 3.2	273.5 $\pm$ 41.8

La estrategia comprendió la selección de 3 sitios de muestreo: la zona litoral (1/3 de la Z_{MAX}), pelágica media (2/3 de la Z_{MAX}) y pelágica profunda (3/3 de la Z_{MAX}) donde Z_{MAX} es la profundidad máxima de cada lago. Para determinar *in situ* las variaciones de concentración dentro de la cámara de gas se utilizó un Gasera ONE PULSE basado en espectroscopia fotoacústica a través de tecnología NDIR-PAS (fuente de infrarrojos de banda ancha cortada mecánicamente con filtros de paso de banda ópticos). Las mediciones de gas utilizando el dispositivo Gasera se tomaron automáticamente cada 2 minutos a través de un tubo de teflón de 2 m, recirculando el gas medido de nuevo a las cámaras para evitar la presión negativa. Las cámaras fueron colocadas por un máximo de 35 minutos para evitar la sobresaturación de estas. El flujo de GEI (F_{GEI}) se determinó a partir de la pendiente de la concentración (ppm) de cada gas con respecto al tiempo de muestreo (t) y se estandarizó al área (A_C) y volumen (V_C) de cada cámara (Ec. 1).

$$F_{GEI} = \frac{\Delta C}{\Delta t} \left(\frac{V_C}{A_C} \right) \quad (1)$$

Para estimar la emisión total de GEI en la zona profunda (F_P) y en el litoral (F_L) se extrapoló el flujo medido *in situ* al área (A) ocupada por cada zona (Fig. 1). El flujo en la zona media (F_M) se asumió como el promedio de la zona profunda y el litoral. La emisión media de GEI (E_m) de todo el lago se calculó de la siguiente manera:

$$E_m = F_L(A_L) + F_M(A_M) + F_P(A_P) \quad (2)$$

Finalmente, se realizaron análisis de varianza (Kruskal-Wallis) para comparar las emisiones entre la zona litoral y la pelágica y entre lagos. Las diferencias entre los niveles del factor Lago se probaron utilizando la prueba post-hoc de Dunn. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software R Core Team (2016).

Resultados y discusión

Los tres lagos en estudio presentaron flujos positivos de CO₂ y CH₄, lo que probó que funcionan como fuentes directas de estos GEI a la atmósfera. El flujo de CO₂ (F_{CO2}) fue cerca de 4 veces mayor en TZ (1.14 $\pm$ 0.79 g CO₂ m⁻² d⁻¹) y SJ (1.02 $\pm$ 0.47 g CO₂ m⁻² d⁻¹) en comparación con SL (0.25 $\pm$ 0.06 g CO₂ m⁻² d⁻¹) ($p < 0.05$). El flujo de CH₄ (F_{CH4}) fue cerca de 3 ordenes de magnitud mayor en TZ (2,124.55 $\pm$ 2964.81 mg CH₄ m⁻² d⁻¹) en comparación con SJ (2.88 $\pm$ 1.13 mg CH₄ m⁻² d⁻¹) y SL (33.64 $\pm$ 36.39 mg CH₄ m⁻² d⁻¹) ($p < 0.05$). Los tres lagos en estudio presentaron flujos negativos de N₂O a la atmósfera, sugiriendo que estos fungen como sumideros de N₂O. El flujo de N₂O (F_{N2O}) fue más elevado en TZ (-0.83 $\pm$ 0.17 mg N₂O m⁻² d⁻¹), seguido de SL (-0.15 $\pm$ 0.37 mg N₂O m⁻² d⁻¹) y por último en SJ (-0.06 $\pm$ 0.01 mg N₂O m⁻² d⁻¹) ($p < 0.05$).

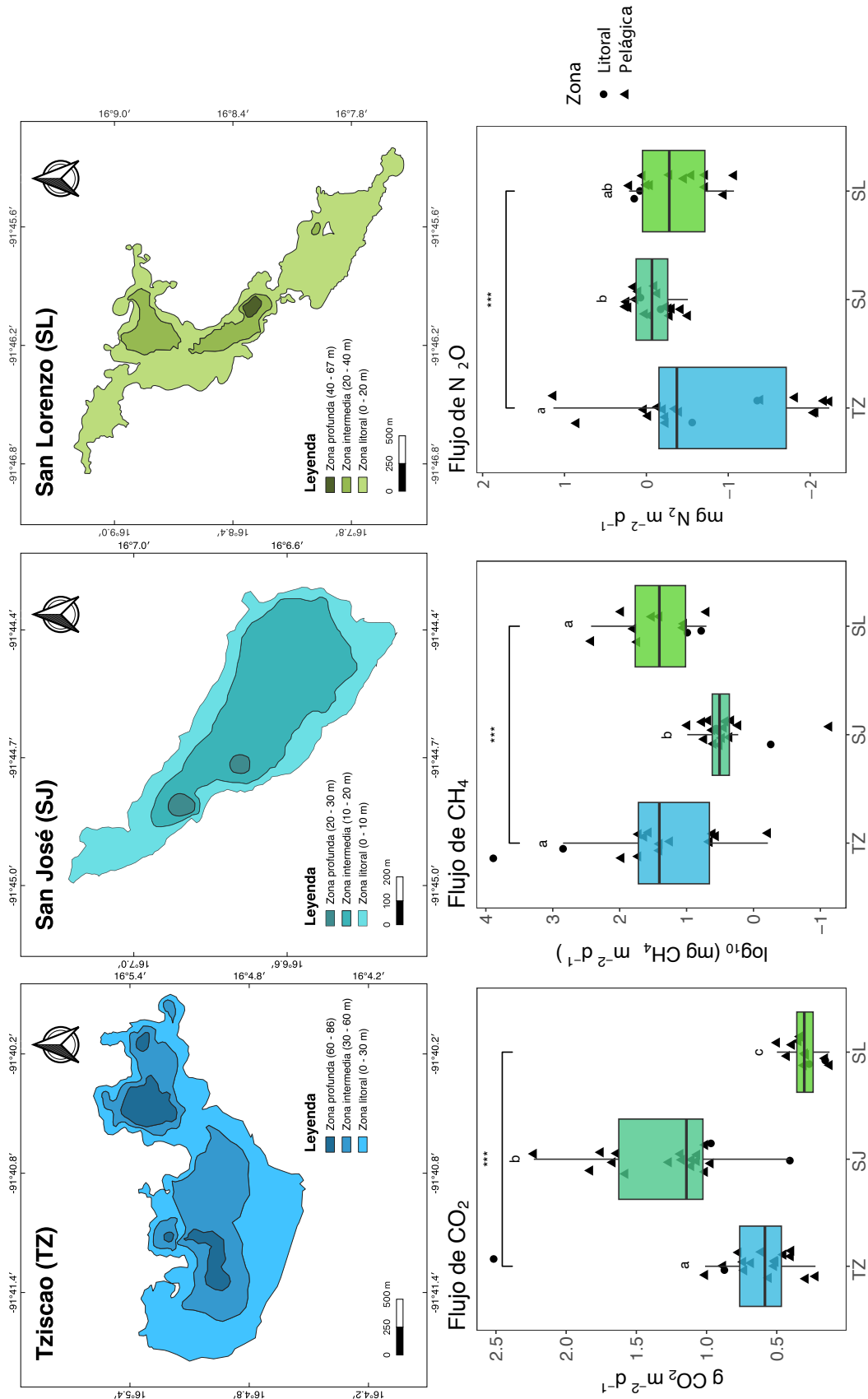


Figura 1. Ubicación y delimitación de las tres zonas (profunda, media y litoral) de los tres lagos estudiados (arriba). Flujos de GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) en Tziscaco (TZ), San José (SJ) y San Lorenzo (SL) (abajo). Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis entre lagos se indican entre corchetes [*** : $p < 0,0001$]. Los resultados de la prueba post-hoc de Dunn se indican con letras minúsculas.

Los lagos kársticos son especialmente vulnerables al impacto antropogénico ya que, al ser dependientes del agua subterránea, los nutrientes y MO se difunden rápida y ampliamente (Micak *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2020). En general, la variabilidad en los flujos de GEI entre los tres cuerpos de agua responde principalmente al estado trófico de cada uno de ellos (Vargas-Sánchez *et al.*, 2023). El F_{CO_2} y el F_{N_2O} no presentaron variación entre la zona litoral y la zona profunda ($p > 0.05$; Fig. 1). En cambio, el F_{CH_4} mostró los valores más elevados en la zona litoral de TZ ($p < 0.0$; Fig. 1). Lo anterior probablemente debido a que la entrada de carbono orgánico e inorgánico estimulan la producción de CH_4 realizada por bacterias metanogénicas, lo que resulta en mayores F_{GEI} (Tranvik *et al.*, 2009; Jansen *et al.*, 2022).

Al escalar el flujo de cada lago al área ocupada TZ presentó los valores de emisión de GEI más elevados (184.2 Ton CO_{2eq}), seguido de SL (1.55 Ton CO_{2eq}) y, finalmente, SJ (0.65 Ton CO_{2eq}).

Conclusiones

Los hallazgos de este estudio permiten determinar que los lagos kársticos del PNLM tienen un alto potencial como emisores de GEI a la atmósfera. La presente investigación demuestra que las emisiones de GEI en lagos kársticos presentan diferencias espaciales significativas las cuales están controladas por diversos factores que son sensibles al impacto humano, como la eutrofización cultural.

Agradecimientos

El presente trabajo fue apoyado por la DGAPA-UNAM a través de los proyectos PAPIIT IV200319 “Área Experimental de Lagos Tropicales” y PAPIIT IV200122 “AELT - Efectos del cambio global y climático sobre la limnología y biodiversidad acuática”, por el Programa de Investigación en Cambio Climático a través de los proyectos PINCC 2020 “Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México”, PINCC 2021 “Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México. Continuación” y PINCC 2023 “Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México. Segunda parte: Eutrofización y emisión de GEI”, por el CONAHCYT a través del proyecto CF-2023-G-221 “Emisión de CH_4 y otros GEI en Cuerpos Acuáticos Epicontinentales Tropicales (EMGEI-CAET)”, así como por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIN/AEI) a través de los proyectos PID2020-116147GB-C21/AEI/10.13039/501100011033 “DAMOLAKE” de la “European Union Next Generation EU/PRTR Funds” y COOPA20433-“Contribución del Neotrópico Acuático Continental a las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero” del Programa ICOOP-CSIC. Los autores agradecen al Parque Nacional Lagunas de Montebello, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), comunidad local y Comisarios Ejidales por facilitar el acceso a los lagos. Asimismo, agradecen a los colegas del equipo de Limnología Tropical de la FES Iztacala (UNAM) por su apoyo en el trabajo de campo.

Literatura citada

- Alcocer, J., Oseguera, L. A., Sánchez, G., González, C. G., Martínez, J. R. y González, R. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology*, 75(s1). <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1343>
- Alcocer, J., Vargas-Sánchez, M., Montserrat Rivera-Herrera, E., Oseguera, L. A. y Sánchez-Carrillo, S. 2024. Limnological comparison of pristine and impacted lakes from a tropical, high-altitude karst region in southern Mexico. *Inland Waters*, 1–33. <https://doi.org/10.1080/20442041.2024.2351324>
- Battin, T. J., Kaplan, L. A., Findlay, S., Hopkinson, C. S., Marti, E., Packman, A. I., Newbold, J. D. y Sabater, F. 2009. Erratum: Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature Geoscience*, 2(8), 595–595. <https://doi.org/10.1038/ngeo602>
- Beaulieu, J.J., DelSontro, T. y Downing, J.A. 2019. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>
- Butman, D., Striegl, R. G., Stackpoole, S. M., Del Giorgio, P., Prairie, Y. T., Pilcher, D., Raymond, P. A., Pellat, F. P., Alcocer, J., Birdsey, R. A., Mayes, M. A., Najjar, R., Reed, S. C., Romero-Lankao, P. y Zhu, Z. 2018. *Chapter 14: Inland Waters. Second State of the Carbon Cycle report*. <https://doi.org/10.7930/soccr2.2018.ch14>
- Chen, J., Jia, Y., Bai, X., Zeng, Y. y Wang, J. 2020. Fragility of karst ecosystem and environment: Long-term evidence from lake sediments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106862. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106862>
- CONANP. 2007. Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México.
- CONANP. 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua, Estudio para monitorear los parámetros de calidad del agua de las lagunas de Montebello.
- Del Sontro, T., Beaulieu, J. J. y Downing, J. A. 2018. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(3), 64–75. <https://doi.org/10.1002/lo2.10073>
- Drake, T. W., Raymond, P. A. y Spencer, R. G. M. 2017. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and oceanography letters*, 3(3), 132–142. <https://doi.org/10.1002/lo2.10055>
- Ford, D. y Williams, P. D. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (Revised). Wiley.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Grasset, C., Sobek, S., Scharnweber, K., Moras, S., Villwock, H., Andersson, S., Hiller, C., Nydahl, A., Chaguaceda, F., Colom, W. y Tranvik, L. J. 2020. The CO₂-equivalent balance of freshwater ecosystems is non-linearly related to productivity. *Global Change Biology*, 26(10), 5705–5715. <https://doi.org/10.1111/gcb.15284>
- Huttunen, J. T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., Silvola, J. y Martikainen, P. J. 2003. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 52(3), 609–621. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(03\)00243-1](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(03)00243-1)
- Jansen, J., Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Albergel, C., Bastviken, D., Weyhenmeyer, G. A., Marcé, R., Sharma, S., Sobek, S., Tranvik, L. J., Perroud, M., Golub, M., Moore, T. N., Vinnå, L. R., La Fuente, S., Grant, L., Pierson, D. C., Thiery, W. y Jennings, E. 2022. Global increase in methane production under future warming of lake bottom waters. *Global Change Biology*, 28(18), 5427–5440. <https://doi.org/10.1111/gcb.16298>
- Jiang, G., Chen, Z., Siripornpibul, C., Haryono, E., Nguyen, N. X., Oo, T., Manzano, L. S. J., Vongphachanh, S., Kong, S. y Guo, F. 2020. The karst water environment in Southeast Asia: characteristics, challenges, and approaches. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02267-y>
- Li, M., Peng, C., Zhu, Q., Zhou, X., Yang, G., Song, X. y Zhang, K. 2020. The significant contribution of lake depth in regulating global lake diffusive methane emissions. *Water Research*, 172, 115465. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115465>
- Li, Y., Shang, J., Zhang, C., Zhang, W., Niu, L., Wang, L. y Zhang, H. 2021. The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review. *Science of the Total Environment* (Vol. 768). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144582>
- Loken, L.C., Crawford, C.G., Schramm, P., Stadler, P., Desai, A.R. y Stanley, E.H. 2019. Large Spatial and Temporal Variability of Carbon Dioxide and Methane in a Eutrophic Lake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(7), 2248–2266. <https://doi.org/10.1029/2019jg005186>
- Mikac, I., Fiket, Z., Terzić, S., Barešić, J., Mikac, N. y Ahel, M. 2011. Chemical indicators of anthropogenic impacts in sediments of the pristine karst lakes. *Chemosphere*, 84(8), 1140–1149. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.027>
- Ortiz-Llorente, M. J. y Alvarez-Cobelas, M. 2012. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands. In *Atmospheric Environment* (Vol. 59, pp. 328–337). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.031>
- Pacheco, F., Roland, F. y Downing, J. 2014. Eutrophication reverses whole-lake carbon budgets. *Inland Waters*, 4(1), 41–48. <https://doi.org/10.5268/iw-4.1.614>
- Prairie, Y. T. y Cole, J. J. 2022. The Carbon Cycle in Lakes: A Biogeochemical Perspective. *Encyclopedia of Inland Waters*, 89–101. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819166-8.00055-4>
- Stevanović, Z. 2019. Karst waters in potable water supply: a global scale overview. *Environmental Earth Sciences*, 78(23). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>
- Tranvik, L.J., J. Downing, J. Cotner, S. Loiselle, R. Striegl, T. Ballatore, P. Dillon, K. Finlay, K. Fortino, L. Knoll, P. Kortelainen, T. Kutser, S. Larsen, I. Laurion, D. Leech, S. McCallister, D. McKnight, J. Melack, E. Overholt, J. Porter, Y. Prairie, W. Renwick, F. Roland, B. Sherman, D. Schindler, S. Sobek, A. Tremblay, M. Vanni, A. Verschoor, E. von Wachenfeldt y G. Weyhenmeyer. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54(part2), 2298–2314. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298
- Tromboni, F., Hotchkiss, E.R., Schechner, A.E., Dodds, W.K., Poulson, S.R. y Chandra, S. 2022. High rates of daytime river metabolism are an underestimated component of carbon cycling. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 270. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00607-2>

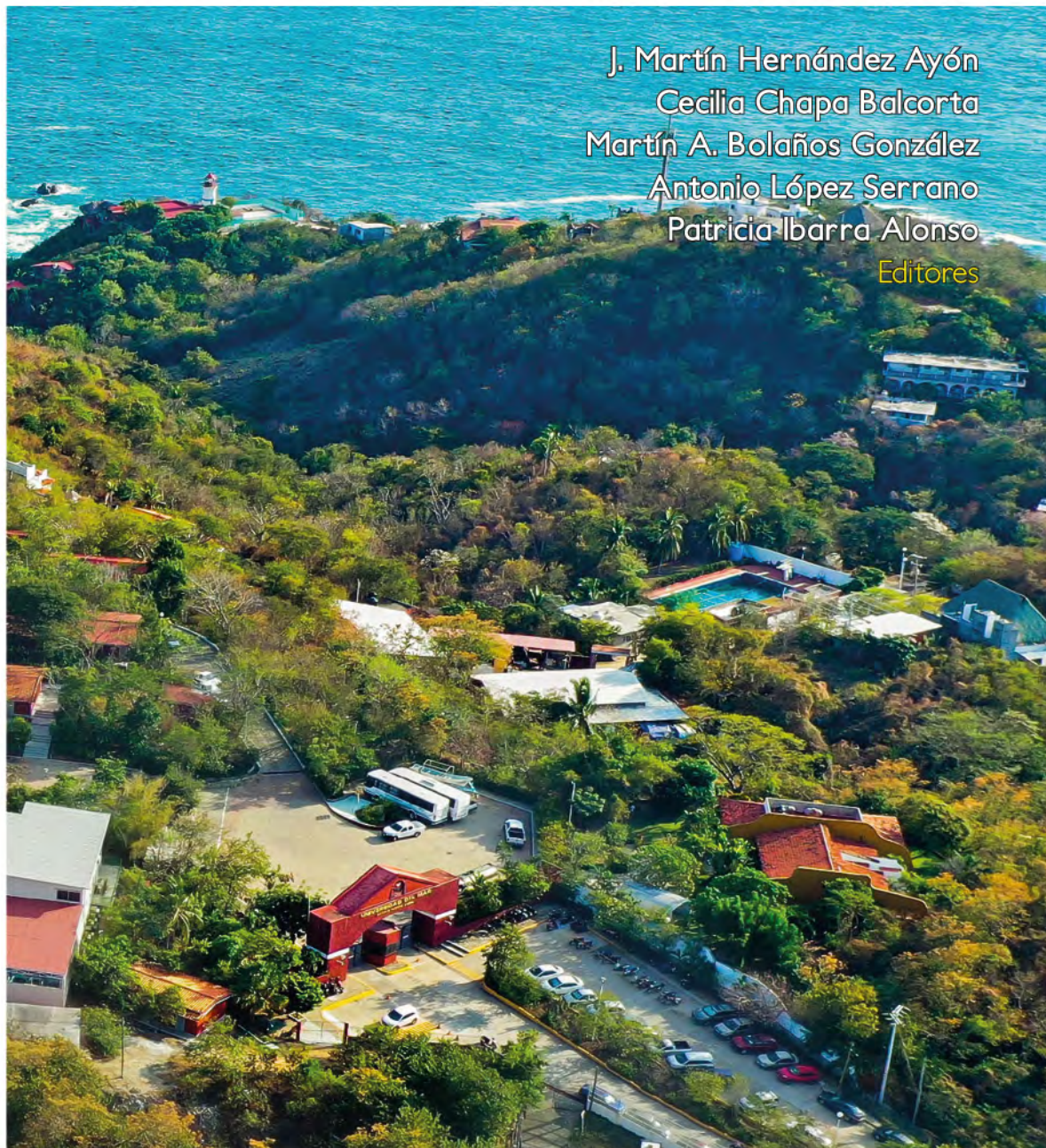


- Vargas-Sánchez, M., Alcocer, J. y Oseguera, L. A. 2022. Seston and eutrophication on a tropical karst lake district: Lagunas de Montebello, Chiapas, Mexico. *Limnetica*, 41(2), 1. <https://doi.org/10.23818/limn.41.16>
- Vargas-Sánchez, M., Alcocer, J., Sánchez-Carrillo, S., Oseguera, L. A., Rivera-Herrera, E. M., Soria-Reinoso, I., Guzmán-Arias, A., García-Oliva, F. y Merino-Ibarra, M. 2023. Carbon Dioxide Concentration and Emissions along a Trophic Gradient in Tropical Karst Lakes. *Water*, 15(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w15010013>
- Zhou, W., y Beck, B. F. 2011. Engineering Issues on Karst. *Karst Management*, 9-45. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_2
- Zhou, Y., Wang, L., Zhou, Y. y Mao, X. Z. 2020. Eutrophication control strategies for highly anthropogenic influenced coastal waters. *Science of the Total Environment*, 705, 135760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135760>



Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Síntesis a 2024

PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO



J. Martín Hernández Ayón
Cecilia Chapa Balcorta
Martín A. Bolaños González
Antonio López Serrano
Patricia Ibarra Alonso
Editores

PM
Programa Mexicano del Carbono
Red Temática del CONACYT



Stanford | México Clean
Economy 2050

 **THE OCEAN
FOUNDATION**

Forma correcta de citar:

Hernández Ayón J. M.; Chapa Balcorta C.; Bolaños González M. A.; López Serrano A.; e Ibarra Alonso P. (Editores). 2024. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2024. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad del Mar (UMAR). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 254 p.

Programa Mexicano del Carbono
Calle Morelos No. 17
Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México.

www.pmcarbono.org

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL CICLO DEL CARBONO Y SUS INTERACCIONES EN MEXICO. Año 6, No. 6, enero - diciembre de 2024. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmcarbono.org Editor responsable: José Martín Hernández Ayón. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-121910292200-102, ISSN 2954-4882. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: José Martín Hernández Ayón, Calle Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2024.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2024

J. Martín Hernández Ayón, Cecilia Chapa Balcorta,
Martín A. Bolaños González, Antonio López Serrano
y Patricia Ibarra Alonso

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono (PMC)
Universidad del Mar (UMAR)

Puerto Ángel, Oaxaca, México

Diciembre 2024