



# Dinámica estacional del sistema del dióxido de carbono en el lago cráter La Alberca de los Espinos: implicaciones para los arrecifes microbianos

Seasonal dynamics of the carbon dioxide system in crater lake La Alberca de los Espinos: Implications for microbialite reefs

J. Fernando Alvarado Rodríguez<sup>1,2,\*</sup> , Héctor Nava<sup>1</sup> , Estefanía Izaguirre Quesada<sup>1</sup>, Carlos Orión Norzagaray López<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

<sup>2</sup> Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México.

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.

## Historial

Manuscrito recibido: 28 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de agosto de 2025

Manuscrito publicado: diciembre 2025

## \*Autor para correspondencia

J. Fernando Alvarado Rodríguez

jfalvarado15@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1274-9943

## Resumen

La variabilidad temporal en los procesos metabólicos y biogeoquímicos son factores clave que regulan el crecimiento de los arrecifes microbianos o microbialitos. Este estudio investigó la dinámica del sistema del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el lago cráter La Alberca de Los Espinos, el único lago cráter de Michoacán que alberga un microbialito. Durante la primavera y el verano, el sistema favoreció la captura de carbono desde la atmósfera a través de la fotosíntesis, lo que incrementó el pH y la saturación de carbonato de calcio ( $\Omega$ ), mientras que disminuyó la presión parcial del  $\text{CO}_2$  ( $\text{pCO}_2$ ). En otoño e invierno, la respiración de materia orgánica se intensificó, mientras que la fotosíntesis se redujo. Esto provocó una reducción del pH y de la  $\Omega$ , junto con un aumento de la  $\text{pCO}_2$ . En consecuencia, disminuyó el potencial de precipitación de carbonato de calcio y se promovió un flujo neto de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera. En conjunto, estos resultados sugieren que el lago cráter y su microbialito constituyen un sistema dinámico, cuyo papel en el ciclo del carbono varía de manera estacional entre el secuestro y la liberación de  $\text{CO}_2$ .

**Palabras clave:** Caracterización ambiental, maar, microbialito

## Abstract

Temporal variability in metabolic and biogeochemical processes are key factors regulating the growth of microbial reefs or microbialite reefs. This study investigated the dynamics of the carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) system in the crater lake La Alberca de Los Espinos, the only crater lake in Michoacán that hosts a microbialite. During spring and summer, the system favored carbon capture from the atmosphere through photosynthesis, which increased pH and calcium carbonate saturation ( $\Omega$ ) while decreasing partial pressure of  $\text{CO}_2$  ( $\text{pCO}_2$ ). In autumn and winter, the respiration of organic matter was intensified, while photosynthesis was reduced. This caused a reduction in pH and  $\Omega$ , along with an increase in  $\text{pCO}_2$ . Consequently, the potential for calcium carbonate decreased and a net flow of  $\text{CO}_2$  to the atmosphere was promoted. Together, these results suggest that the crater lake and its microbialite constitute a dynamic system, whose role in the carbon cycle varies seasonally between  $\text{CO}_2$  sequestration and release.

**Keywords:** Environmental characterization, maar, microbialite

## Introducción

Los microbialitos son estructuras sedimentarias formadas por la actividad metabólica de comunidades microbianas, especialmente bacterias fotosintéticas como las cianobacterias (Prat y Riding, 1993). Estas comunidades promueven la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y generan estructuras pétreas perdurables en el

registro geológico (Mata y Bottjer, 2012). La edad aproximada de los microbialitos más antiguos en el registro fósil, como los estromatolitos encontrados en Australia occidental, es de ~3,500 millones de años (Ma) (Allwood *et al.*, 2006; Lowe, 1980).

La actividad fotosintética de las comunidades microbianas asociadas a microbialitos liberó una gran cantid

dad de oxígeno durante el Arqueano, lo que transformó la atmósfera y el océano de un estado reductor a uno oxidante y creó un entorno favorable para la evolución de la biosfera moderna y el desarrollo de formas de vida complejas (Dupraz *et al.*, 2009). Tras cada uno de los cinco eventos de extinción masiva que han ocurrido en el planeta, los ecosistemas de microbialitos demostraron gran capacidad de expansión, alcanzando su mayor diversificación en el Paleoproterozoico, entre 2,500 y 1,650 Ma, y el Mesoproterozoico, entre 1,350 y 1,000 Ma (Castro-Contreras *et al.*, 2014; Mata y Bottjer, 2012).

En la actualidad, los microbialitos modernos tienen orígenes diversos y se clasifican en cuatro tipos según su estructurainterna: estromatolitos, trombolitos, dendrolitos y leiolitos (Dupraz *et al.*, 2009). Los estromatolitos se caracterizan por tener una estructura laminar relacionada con crecimiento estacional y sedimentación periódica. En cambio, los trombolitos presentan una estructura coagulada o grumosa no estratificada, que resulta por la agregación de partículas en un entorno más dinámico. A diferencia de los trombolitos y los estromatolitos, los dendrolitos no se forman por aglutinamiento de partículas, sino por fábricas mesoscópicas de origen microbiano que se asemejan a arbustos, mientras que los leiolitos no muestran una estructura definida (Riding, 2000). Esta clasificación no solo facilita la comprensión de su formación, sino que también ofrece información valiosa sobre las condiciones ambientales que propician su desarrollo.

La formación de microbialitos requiere condiciones fisicoquímicas específicas, donde el motor de alcalinidad juega un papel central (Dupraz *et al.*, 2009). Este motor se activa principalmente a través de la actividad fotosintética de microorganismos que consume dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), generando una elevación del pH y del estado de saturación del agua con respecto al  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega$ ) en el entorno inmediato, promoviendo la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  en las estructuras microbianas (Arp *et al.*, 2001; Couradeau *et al.*, 2011). La temperatura, la salinidad, la luz y la disponibilidad de nutrientes también influyen en estos procesos, favoreciendo la actividad metabólica de las comunidades microbianas que precipitan  $\text{CaCO}_3$  (Anderson *et al.*, 2020).

En México, la presencia de microbialitos ha sido documentada en lagos cráter alcalinos del Cinturón Volcánico Transmexicano, donde se determinó que la alcalinidad mínima necesaria para su formación es de 1.23 mM (Zeyen *et al.*, 2017), equivalente a 1,230  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ . Diversos estudios han caracterizado las comunidades microbianas del microbialito de La Alberca de los Espinos y las variables fisicoquímicas asociadas a su desarrollo

(e.g., Havas *et al.*, 2023; Iniesto *et al.*, 2022; Zeyen *et al.*, 2021). No obstante, dichos trabajos se basaron en visitas únicas al sitio de estudio, lo que, si bien proporciona información valiosa sobre los procesos metabólicos y biogeoquímicos, no permite evaluar la dinámica estacional del sistema, estrechamente vinculada con la ubicación geográfica y altitud del lago (1,980 msnm). Por su parte, los estudios de Rendón-López (2008) y Hernández-Morales (2011) se centraron en la limnología física del lago, sin considerar su relación con la formación del arrecife microbiano. Recientemente, se ha confirmado la presencia de un extenso arrecife microbiano en el lago cráter La Alberca de los Espinos (Alvarado-Rodríguez *et al.*, 2024; Nava *et al.*, 2024).

Este trabajo tiene como objetivo investigar la dinámica del sistema de  $\text{CO}_2$  en el lago cráter La Alberca de los Espinos, centrándose en describir la variabilidad temporal de los procesos metabólicos y biogeoquímicos que regulan la biominerización en el arrecife, así como la capacidad del lago para actuar como fuente o sumidero de  $\text{CO}_2$  a lo largo del tiempo. Comprender esta dinámica es fundamental para evaluar el papel de los microbialitos en la mitigación de los efectos del cambio climático y su capacidad de adaptación a las variaciones en las condiciones ambientales.

## Materiales y métodos

### Descripción del área de estudio

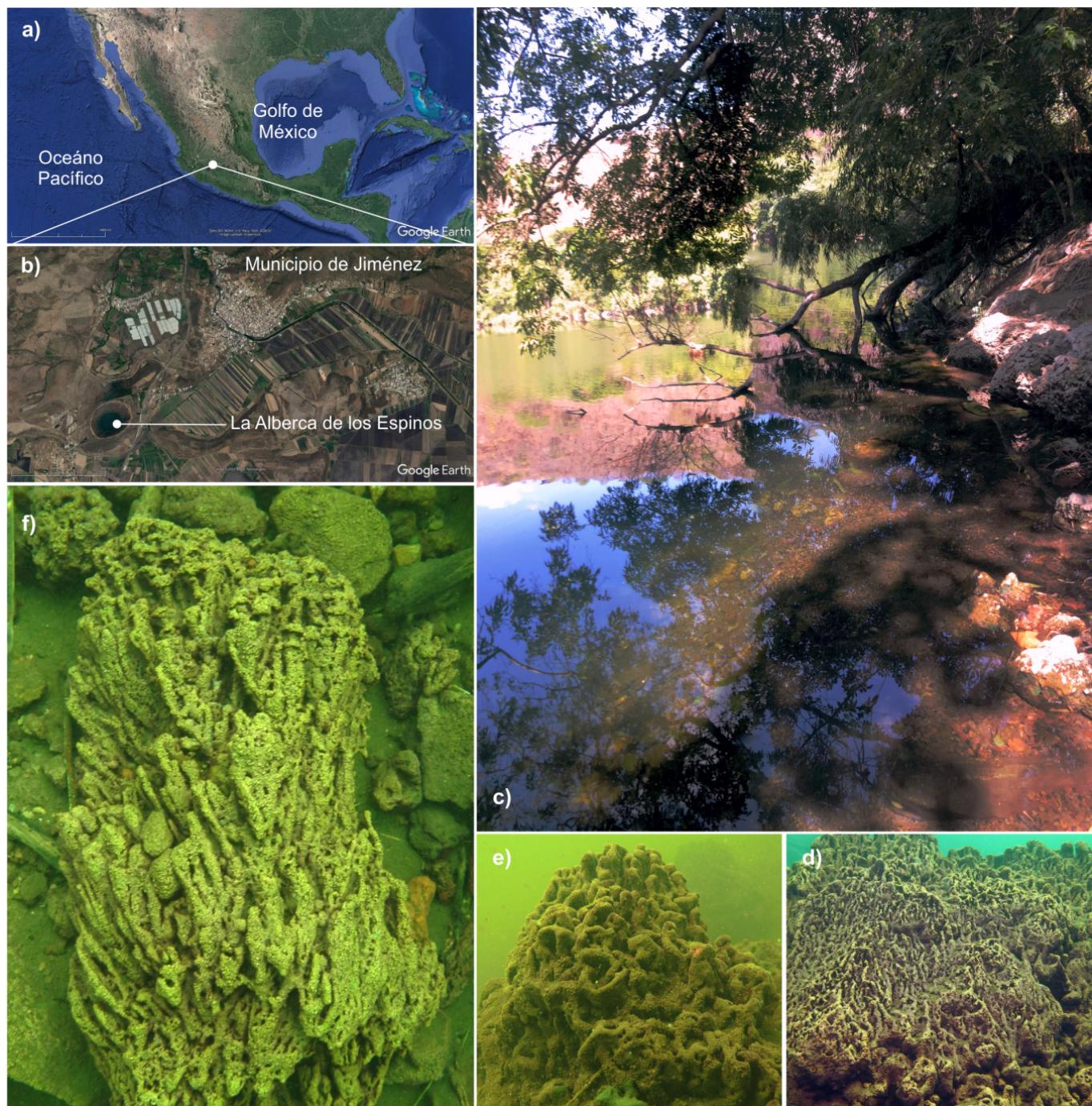
El clima de la región es templado subhúmedo, con una temperatura media anual que oscila entre 16.6 y 18 °C, y una precipitación media anual de 898 mm (Marín-Togo y Blanco-García, 2009).

La Alberca de los Espinos (19°54'24.34" N, 101°46'02" O) se localiza en la antigua Cuenca de Zacapu, a 1,985 msnm, al suroeste del municipio de Jiménez, Michoacán, dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (Siebe *et al.*, 2012; **Figura 1a, b**). Es un cráter volcánico formado hace aproximadamente 25,000 años, clasificado como maar, originado por explosiones freatomagmáticas resultantes de la interacción del magma y agua subterránea, que actualmente alberga un lago en su interior (Siebe *et al.*, 2012). El lago presenta basamentos constituidos por xenolitos de andesita (Siebe *et al.*, 2014) y es alimentado por escurreimiento de agua de lluvia, así como por manantiales a más de 12 metros de profundidad (Marín-Togo y Blanco-García, 2009). Con una profundidad máxima de 30 m, este lago es de carácter monomictico cálido, con un periodo de circulación reportado en invierno (Hernández-

Morales, 2011; Rendón-López, 2008) y exhibe valores de alcalinidad variables a lo largo del año y cercanos a  $7 \text{ mmol L}^{-1}$  (Havas *et al.*, 2023; Hernández-Morales, 2011; Zeyen *et al.*, 2021). A lo largo de su litoral, de forma discontinua, se desarrolla un arrecife microbiano, posiblemente un trombolito, que se extiende desde la superficie hasta 10 m de profundidad, y está conformado

por estructuras calcáreas que superan los 2 m de espesor (Alvarado-Rodríguez *et al.*, 2024; **Figura 1c-f**). A lo largo del litoral del lago se observan microbialitos vivos (sumergidos) y muertos (emergidos) (**Figura 1c-f**).

Para monitorear la dinámica de las variables ambientales y del sistema de  $\text{CO}_2$  en el epilimnio (capa superficial cálida y bien mezclada durante la



**Figura 1.** Localización geográfica del lago cráter La Alberca de los Espinos en el municipio de Jiménez, Michoacán, dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (a y b). (c) Observación del litoral del lago. Detalle de un fragmento de microbialito de aproximadamente 40 cm de largo (d) y estructuras de varios metros de altura y extensión entre 2 y 10 m de profundidad (e y f).

estratificación) del lago cráter, se realizaron muestreos bimestrales durante 2023, cubriendo las cuatro estaciones del año: invierno (febrero), primavera (abril y junio), verano (agosto) y otoño (octubre). En cada muestreo, se registraron variables ambientales en la columna de agua y se recolectaron muestras discretas para el análisis de las variables del sistema del CO<sub>2</sub>, siguiendo el procedimiento recomendado por Dickson *et al.* (2007).

### Variables ambientales medidas en la columna de agua

La temperatura del agua ( $\pm 0.15$  °C), la salinidad ( $\pm 0.01$ ), el oxígeno disuelto (mg L<sup>-1</sup>), y el pH ( $\pm 0.02$  unidades en escala NBS) se midieron a  $\sim 2$  m de profundidad con una sonda multiparamétrica marca HANNA (modelo HI98194). Previo al registro *in situ* de dichas variables, la sonda fue calibrada con la solución indicada por el fabricante y con el método rápido en un punto para los sensores de pH, conductividad, y oxígeno disuelto.

### Recolección y procesamiento de muestras discretas de agua para analizar las variables del sistema del CO<sub>2</sub>

La alcalinidad total (AT) del agua se midió en muestras de agua discretas recolectadas por medio de buceo autónomo a una profundidad de 4–6 metros y en tres estaciones dentro del lago cráter, donde se observó la mayor presencia de estructuras arrecifales. Para evitar la formación de burbujas durante la recolecta, se usaron jeringas de plástico de 60 ml conforme a la metodología descrita por Alvarado-Rodríguez *et al.* (2022). Brevemente, el agua de las jeringas se transfirió a botellas de borosilicato de 150 ml (i.e., tres jeringas por botella; cinco repeticiones por estación y muestreo) y se fijó con 100 µl de cloruro de mercurio (HgCl<sub>2</sub>). En el laboratorio, la AT se determinó por titulación de celda abierta (Hernández-Ayón *et al.*, 1999), siguiendo el procedimiento operativo estándar descrito por Dickson *et al.* (2007), con un sistema automático de alcalinidad total (Modelo P-TA, PONTUS, México; <http://www.pontusbaja.com>). Se utilizó material de referencia certificado (CRG AG Dickson, Scripps Institution of Oceanography) para asegurar una precisión en las estimaciones de AT dentro de  $\pm 3.0$  µmol kg<sup>-1</sup>.

Para el cálculo del carbono inorgánico disuelto (CID), la presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>), y el estado de saturación del agua con respecto a calcita ( $\Omega_{\text{Ca}}$ ), se utilizaron los valores de pH y AT como variables de entrada, además de la salinidad y temperatura medidos *in situ*. Este procedimiento se realizó con la función *carb*

del paquete *seacarb* (Gattuso *et al.*, 2024; versión 3.3.3) en R (R Core Team, 2024), empleando las constantes de equilibrio ( $K_1$  y  $K_2$ ) reportadas por Millero (2010). Ya que la función no admite valores de pH en escala NBS, los valores fueron previamente transformados a escala de agua de mar con la función pHnbs2sws.

## Resultados

### Variables ambientales medidas *in situ*

El epilimnio mostró una marcada estacionalidad en la mayoría de las variables fisicoquímicas (Figura 2). La excepción fue la salinidad, que permaneció estable y baja (0.6) durante el estudio. En invierno, los valores promedio ( $\pm$  DE) de temperatura, oxígeno disuelto, y pH fueron, respectivamente,  $18.7 \pm 0.5$  °C,  $4.37 \pm 0.05$  mg L<sup>-1</sup> (59.4  $\pm$  1.1 % de saturación), y  $8.42 \pm 0.04$ . En primavera, la temperatura incrementó a  $22.8 \pm 0.2$  °C, el oxígeno disuelto a  $5.33 \pm 0.71$  mg L<sup>-1</sup> (79.4  $\pm$  13.3 % de saturación), y el pH a  $8.69 \pm 0.06$ . Durante el verano, la temperatura alcanzó los  $23.4 \pm 0.1$  °C, mientras que el oxígeno disuelto y el pH disminuyeron a  $4.28 \pm 0.11$  mg L<sup>-1</sup> y  $8.68 \pm 0.01$  (64.5  $\pm$  2.6 % de saturación), respectivamente. Hacia el otoño, la temperatura descendió a  $21.9 \pm 0.1$  °C, el oxígeno disuelto a  $4.19 \pm 0.32$  mg L<sup>-1</sup> (60.9  $\pm$  7.6 % de saturación), mientras que

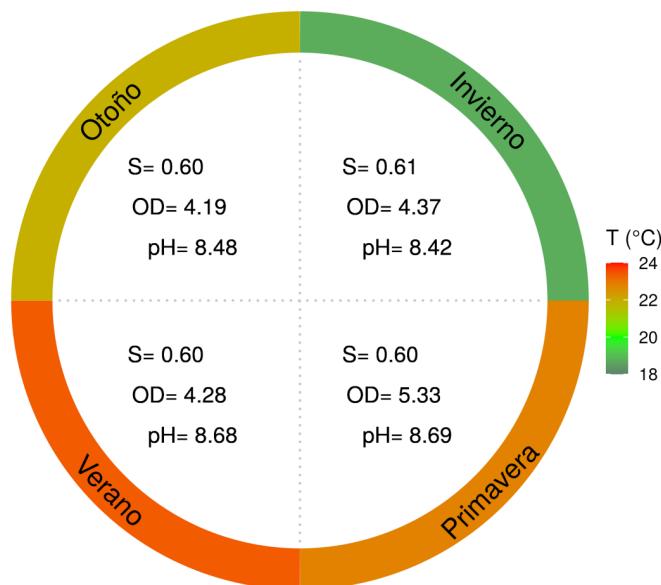


Figura 2. Variación estacional promedio de la temperatura (T, °C), salinidad (S), oxígeno disuelto (OD, mg L<sup>-1</sup>) y pH del lago cráter La Alberca de Los Espinos durante 2023.

el pH incrementó a  $8.48 \pm 0.06$ .

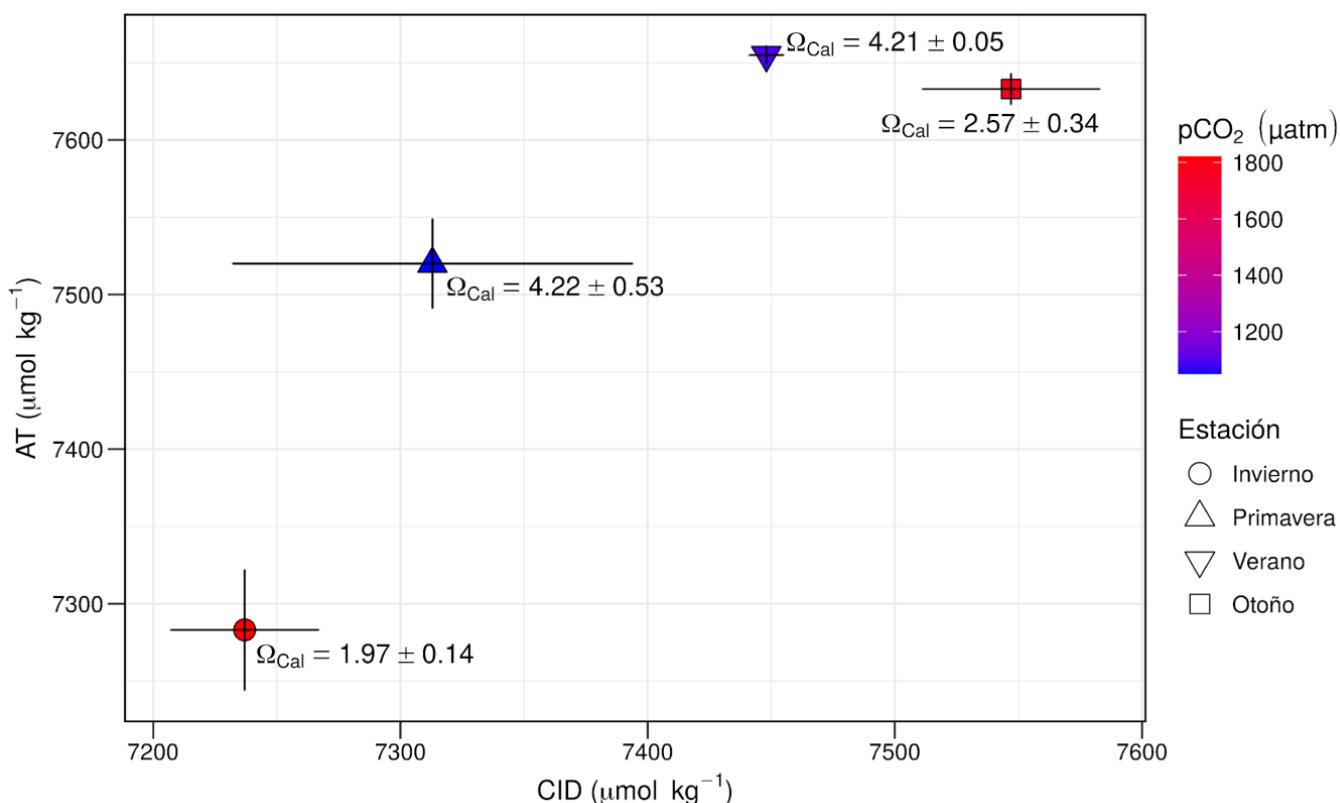
### Variables del sistema del CO<sub>2</sub>

A lo largo de las cuatro estaciones del año se registró una variación en los valores de CID, AT, pCO<sub>2</sub>, y  $\Omega_{\text{Cal}}$  (**Figura 3**). En invierno, los valores (promedio  $\pm$  DE) de CID y AT fueron menores ( $7237 \pm 30 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y  $7283 \pm 39 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , respectivamente) en comparación con las otras estaciones del año, y coincidieron con valores altos de pCO<sub>2</sub> ( $1820.3 \pm 170 \mu\text{atm}$ ) y bajos de  $\Omega_{\text{Cal}}$  ( $1.97 \pm 0.14$ ). En primavera y verano, se observó un incremento tanto en CID ( $7313 \pm 81 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y  $7448 \pm 7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , respectivamente) como en AT ( $7520 \pm 29 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y  $7655 \pm 6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , respectivamente), con una disminución en pCO<sub>2</sub> ( $1051 \pm 139 \mu\text{atm}$  y  $1089 \pm 13 \mu\text{atm}$ , respectivamente) y una sobresaturación del agua con respecto a calcita ( $\Omega_{\text{Cal}} > 4$  en ambas estaciones). En otoño, se apreciaron valores ligeramente más altos de CID ( $7547 \pm 36 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) pero similares de AT ( $7633 \pm 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ), así como un incremento en pCO<sub>2</sub> ( $1770 \pm 264 \mu\text{atm}$ ) y una disminución en  $\Omega_{\text{Cal}}$  ( $2.57 \pm 0.34$ ).

### Discusión

La variación temporal observada en el epilimnio del lago cráter La Alberca de Los Espinos revela una dinámica fisicoquímica vinculada a los ciclos estacionales, lo que potencialmente influye en los procesos biogeoquímicos del lago y en la capacidad del microbialito para almacenar carbono inorgánico en sus estructuras calcáreas. A su vez, la estabilidad de la salinidad a lo largo del estudio, con un valor consistentemente bajo ( $\sim 0.6$ ), resalta la importancia de los aportes de escorrimiento de agua de lluvia intensificados de junio a septiembre (Hernández-Morales, 2011; Rendón-López, 2008). Esta estabilidad también sugiere una posible influencia de aportes de agua dulce subterránea, como se ha señalado en estudios previos (Rainier *et al.*, 1997, citado en Marín y Blanco-García, 2009). Estas condiciones podrían favorecer el crecimiento de comunidades microbianas adaptadas a ambientes de baja salinidad.

El intervalo de variación de la temperatura del agua observada en La Alberca de Los Espinos durante 2023 ( $18.7\text{--}23.4^\circ\text{C}$ ) fue similar al reportado en estudios previos ( $17.5\text{--}24.5^\circ\text{C}$ ; Hernández-Morales, 2011; Rendón-López, 2008) y mostró variaciones típicas de



**Figura 3.** Variación estacional del carbono inorgánico disuelto (CID), alcalinidad total (AT), presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>), y estado de saturación del agua con respecto a calcita ( $\Omega_{\text{Cal}}$ ) en el lago cráter La Alberca de Los Espinos durante 2023. Las barras horizontales y verticales en los símbolos representan las desviaciones estándar para el CID y la AT.

sistemas monomicticos, en los cuales los ciclos de mezcla y estratificación están influenciados por sus cambios estacionales (Wetzel, 2001). La temperatura del agua es un regulador clave del metabolismo y crecimiento microbiano (Raven y Geider, 1988). Estudios previos han documentado una relación positiva entre la temperatura del agua y la biomasa de cianobacterias (Hansson *et al.*, 2013; Urrutia-Cordero *et al.*, 2016), por lo que un aumento en las tasas metabólicas de las comunidades microbianas que intervienen en el crecimiento del microbialito (principalmente cianobacterias) podría ser favorecido durante la primavera y el verano, cuando prevalecen condiciones más cálidas.

El oxígeno disuelto (OD) mostró valores intermedios y consistentes de verano a invierno, con un máximo en primavera, que concuerda con los hallazgos de Hernández-Morales (2011), quien reportó valores máximos en abril, y con Havas *et al.* (2023), quienes incluso reportaron valores de supersaturación en mayo (7.9 mg L<sup>-1</sup> o 118% de saturación). Estos resultados indican que la actividad fotosintética de la comunidad fitoplanctónica se intensifica y oxigena el epilimnio durante la primavera, potencialmente debido a la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua, así como a la alta irradiación solar y temperatura del agua durante dicha estación. De manera notable, estas condiciones no sólo impulsan el crecimiento del fitoplancton de vida libre en la columna de agua desde el mes de febrero, sino que también estimulan el crecimiento de una esponja dulceacuícola que alberga microalgas fotosintetizadoras en simbiosis (Nava *et al.*, 2024), lo que resalta el papel de estas variables en la regulación de la productividad del ecosistema, incluso en interacciones simbióticas altamente especializadas.

La disminución del OD registrada después de la primavera también concuerda con los hallazgos de Hernández-Morales (2011), quien reportó valores bajos durante el verano (~4.5 mg L<sup>-1</sup>). No obstante, aunque este autor documentó condiciones de hipoxia durante la mezcla invernal (OD < 1 mg L<sup>-1</sup> en enero), durante nuestro estudio el epilimnio se mantuvo oxigenado ya a partir del mes de febrero, lo que refleja la alta variabilidad ambiental que existe en el lago cráter tanto entre estaciones como dentro de cada periodo estacional.

La caída del OD se puede atribuir a un aumento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), consecuencia de la degradación de materia orgánica y la intensificación de la actividad microbiana en el epilimnio. Este comportamiento contrasta con lo observado en otros lagos monomicticos cálidos, como en Alchichica, donde la concentración de OD en el epilimnio se mantiene

elevada (6.3 ± 0.8 mg L<sup>-1</sup>) incluso durante el periodo de mezcla (Alcocer *et al.*, 2014).

En cuanto al pH, se observó un aumento general durante los meses más cálidos, alcanzando un máximo en primavera (8.69), lo cual indica un ambiente alcalino posiblemente promovido por la intensa actividad fotosintética de la comunidad, la cual domina sobre la respiración. La fotosíntesis fija especies del carbono inorgánico disuelto en el agua (i.e., CO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), lo que incrementa el pH y favorece la precipitación de CaCO<sub>3</sub> (Zeebe y Wolf-Gladrow, 2001). En contraste, el descenso del pH observado en otoño e invierno sugiere un aumento de la actividad respiratoria, proceso inverso a la fotosíntesis, en donde la comunidad bacteriana libera especies del carbono (ej. solamente CO<sub>2</sub>), lo cual modifica el sistema de los carbonatos, disminuyendo el pH y consumiendo el oxígeno de la columna de agua. Este cambio en el pH favorece la disolución de CaCO<sub>3</sub> (Dupraz *et al.*, 2009).

Las fluctuaciones observadas en las variables del sistema del CO<sub>2</sub> a lo largo del año en La Alberca de los Espinos proporcionan una visión más detallada sobre el motor de la alcalinidad (Dupraz *et al.*, 2009), uno de los componentes integrales del proceso de biominerilización (*sensu* Perry *et al.*, 2007). Los cambios en las concentraciones del carbono inorgánico disuelto (CID), la alcalinidad total (AT), la presión parcial del CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>), y el estado de saturación del agua con respecto a la calcita (Ω<sub>Ca</sub>) reflejan una interacción compleja entre los mecanismos que regulan el ciclo del carbono orgánico (fotosíntesis-respiración) y el ciclo del carbono inorgánico (precipitación-disolución de CaCO<sub>3</sub>) (Cyronak *et al.*, 2018).

Durante el invierno, los valores bajos de CID y AT, combinados con niveles elevados de pCO<sub>2</sub> (1820.3 μatm), sugieren dos posibles escenarios: 1) el afloramiento de agua profunda rica en CO<sub>2</sub> y 2) una menor captura de carbono inorgánico debido a la reducción de la actividad fotosintética, que es común en los meses fríos debido a la disminución de la irradiancia solar y las bajas temperaturas (Gonçalves *et al.*, 2011). Ambos escenarios son viables, ya que en La Alberca de los Espinos el periodo de circulación ocurre en invierno (Hernández-Morales, 2011; Rendón-López, 2008), lo que modifica significativamente las condiciones fisicoquímicas en la superficie.

En lagos estratificados, el agua del hipolimnio acumula CO<sub>2</sub> generado por la respiración de la materia orgánica, la fermentación microbiana del metano, la nitrificación del amoniaco y la oxidación del sulfuro. Cuando se rompe la termoclina, la mezcla del hipolimnio (una masa de agua profunda y rica en materia orgánica)

con el epilimnio reduce el pH e incrementa la pCO<sub>2</sub> en la superficie (Wetzel, 2001). Este comportamiento es congruente con la observación de valores bajos de  $\Omega_{\text{Cal}}$  ( $1.97 \pm 0.14$ ) en invierno, lo que sugiere una menor capacidad del sistema para favorecer la precipitación de CaCO<sub>3</sub>, y, en consecuencia, un potencial reducido para formar depósitos minerales.

En primavera y verano, se observó un cambio sustancial en el sistema, con un incremento en CID y AT pero una notable disminución de la pCO<sub>2</sub>. Estos resultados sugieren una disminución en la concentración de CO<sub>2</sub> en el epilimnio, posiblemente impulsada por la actividad fotosintética (Hernández-Morales, 2011). La sobresaturación del agua con respecto a calcita ( $\Omega_{\text{Cal}} > 4$ ) durante estas estaciones, refuerza la hipótesis de que el sistema favorece la precipitación de CaCO<sub>3</sub> bajos estas condiciones (Zeebe y Wolf-Gladrow, 2001).

El incremento en la pCO<sub>2</sub> observado en otoño (1770  $\mu\text{atm}$ ), junto con un ligero aumento en CID y valores más bajos de  $\Omega_{\text{Cal}}$  (2.57), sugiere que el sistema comienza a revertir el comportamiento observado en primavera y verano. Este aumento en la presión parcial de CO<sub>2</sub> puede ser el resultado de una disminución en la actividad fotosintética, así como un aumento en la actividad respiratoria y degradación de materia orgánica que se observa desde octubre y se intensifica en diciembre de acuerdo con Hernández-Morales (2011). El descenso en el  $\Omega_{\text{Cal}}$  refuerza la idea de que el sistema reduce su capacidad para precipitar CaCO<sub>3</sub> en esta estación del año.

En conjunto, estas variaciones estacionales reflejan un sistema dinámico, donde el equilibrio entre procesos metabólicos como la fotosíntesis, la respiración y otros procesos biogeoquímicos juega un papel crucial en la acreción (acumulación o ganancia de carbonato de calcio) del microbialito en La Alberca de los Espinos. Los valores de pCO<sub>2</sub>, consistentemente más altos en el agua (1051–1820  $\mu\text{atm}$ ) que en la atmósfera ( $\sim 418 \mu\text{atm}$  a nivel del mar en 2023, NOAA 2023), indican que el lago cráter La Alberca de los Espinos actúa como una fuente neta de carbono hacia la atmósfera a lo largo del año. Sin embargo, la existencia de un arrecife microbiano de varios metros de espesor que bordea el litoral del lago (Alvarado-Rodríguez *et al.*, 2024) sugiere que parte del carbono inorgánico permanece retenido en forma de estructuras minerales. Para comprender mejor el papel del microbialito en el ciclo del carbono de este ecosistema, serán necesarios estudios adicionales que profundicen en la actividad metabólica de los microorganismos del microbialito y que integren mediciones detalladas de los flujos de CO<sub>2</sub>.

## Agradecimientos

Esta contribución fue financiada por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del estado de Michoacán (Proyecto No. PICIR-026) y por la Coordinación de Investigación Científica de la UMSNH. Se agradece a los Pas. Biól. Candelaria Monserrat Ruiz Montiel y Julio César Cristóbal Aguilar por el apoyo provisto en las actividades de muestreo de campo. JFAR agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca posdoctoral otorgada (SECIHTI No. 561548).

## Referencias

- Alcocer J, Ruiz-Fernández AC, Escobar E, Pérez-Bernal LH, Oseguera LA, and Ardiles-Gloria V (2014). Deposition, burial and sequestration of carbon in an oligotrophic, tropical lake. *Journal of Limnology* 73(2):21–33. doi:10.4081/jlimnol.2014.783
- Allwood AC, Walter MR, Kamber BS, Marshall CP, and Burch IW (2006). Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature. Nature Publishing Group* 441(7094): 714-718. doi:10.1038/nature04764
- Alvarado-Rodríguez JF, Calderon-Aguilera LE, Cabral-Tena RA, Norzagaray-López CO, Nava H, Peiffer L, and Fernández-Aldecoa RG (2022). High sclerobiont calcification in marginal reefs of the eastern tropical Pacific. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 557(2022):151800. doi:10.1016/j.jembe.2022.151800
- Alvarado-Rodríguez JF, Nava H, Izaguirre-Quesada E (2024). El microbialito del lago cráterico La Alberca de Los Espinos: un arrecife inexplorado. *Boletín de La Sociedad Científica Mexicana de Ecología* 4(2):18–25.
- Anderson NL, Barrett KL, Jones SE, and Belovsky GE (2020). Impact of abiotic factors on microbialite growth (Great Salt Lake, Utah, USA): a tank experiment. *Hydrobiologia. Springer International Publishing* 847(9):2113–2122. doi:10.1007/s10750-020-04235-9
- Arp G, Reimer A, and Reitner J (2001). Photosynthesis-Induced Biofilm Calcification and Calcium Concentrations in Phanerozoic Oceans. *Science* 292(5522):1701–1704. doi:10.1126/science.1057204
- Castro-Contreras SI, Gingras MK, Pecoits E, Aubet NR, Petrush D, Castro-Contreras SM, Dick G, Planavsky N, and Konhauser KO (2014). Textural and geochemical features of freshwater microbialites from Laguna Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *PALAIOS* 29(5):192–209. doi:10.2110/palo.2013.063
- Couradeau E, Benzerara K, Moreira D, Gérard E, Kaźmierczak J, Tavera R, and López-García P (2011). Prokaryotic and Eukaryotic Community Structure in Field and Cultured Microbialites from the Alkaline Lake Alchichica (Mexico). *PLoS ONE* 6(12):e28767. doi:10.1371/journal.pone.0028767
- Cyronak T, Andersson AJ, Langdon C, Albright R, Bates NR,

- Caldeira K, Carlton R, Corredor JE, Dunbar RB, Enochs I, Erez J, Eyre BD, Gattuso J-P, Gledhill D, Kayanne H, Kline DI, Koweeck DA, Lantz C, Lazar B, Manzello D, McMahon A, Meléndez M, Page HN, Santos IR, Schulz KG, Shaw E, Silverman J, Suzuki A, Teneva L, Watanabe A, and Yamamoto S (2018). Taking the metabolic pulse of the world's coral reefs. *PLOS ONE* 13(1):e0190872. doi:10.1371/journal.pone.0190872
- Dickson AG, Sabine CL, Christian JR (2007). *Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements*. PICES Special Publication 3, 191 pp.
- Dupraz C, Reid RP, Braissant O, Decho AW, Norman RS, Visscher PT (2009). Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews* 96(3):141-162. doi:10.1016/j.earscirev.2008.10.005
- Gattuso J-P, Epitalon J-M, Lavigne H, Orr J, Gentili B, Hagens M, Hofmann A, Mueller J-D, Proye A, Rae J, Soetaert K (2024). Package 'seacarb': Seawater Carbonate Chemistry. 3.3.3.
- Gonçalves RJ, Villafañe VE, Medina CD, Barbieri ES & Helbling WE (2011). Plankton dynamics and photosynthesis responses in a eutrophic lake in Patagonia (Argentina): influence of grazer abundance and UVR. *Latin American Journal Aquatic Research* 39:117–130. doi:10.3856/vol39-issue1-fulltext-11
- Hansson L-A, Nicolle A, Granéli W, Hallgren P, Kritzberg E, Persson A, Björk J, Nilsson PA, and Brönnmark C (2013). Food-chain length alters community responses to global change in aquatic systems. *Nature Climate Change. Nature Publishing Group* 3(3):228-233. doi:10.1038/nclimate1689
- Havas R, Thomazo C, Iniesto M, Jézéquel D, Moreira D, Tavera R, Caumartin J, Muller E, López-García P, and Benzerara K (2023). Biogeochemical processes captured by carbon isotopes in redox-stratified water columns: a comparative study of four modern stratified lakes along an alkalinity gradient. *Biogeosciences* 20(12):2347–2367. doi:10.5194/bg-20-2347-2023
- Hernández-Ayón JM, Belli SL, and Zirino A (1999). pH, alkalinity and total CO<sub>2</sub> in coastal seawater by potentiometric titration with a difference derivative readout. *Analytica Chimica Acta* 394(1):101–108. doi:10.1016/S0003-2670(99)00207-X
- Hernández-Morales R (2011). Fitoplancton de los lagos cráter de Michoacán, México. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 235 pp. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/1662](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1662)
- Iniesto M, Moreira D, Benzerara K, Reboul G, Bertolino P, Tavera R, and López-García P (2022). Planktonic microbial communities from microbialite-bearing lakes sampled along a salinity-alkalinity gradient. *Limnology and Oceanography* 12233:1–16. doi:10.1002/lio.12233
- Lowe D (1980). Archean stromatolites 3.5 Ga Walter et al.pdf. In *Nature* (Vol. 284).
- Lowe DR (1980) Stromatolites 3,400-Myr old from the Archean of Western Australia. *Nature* 284(5755):441-443. doi:10.1038/284441a0
- Marín-Togo M and Blanco-García A (2009). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar, La Alberca de los Espinos. 1–15 pp.
- Mata SA and Bottjer DJ (2012). Microbes and mass extinctions: paleoenvironmental distribution of microbialites during times of biotic crisis. *Geobiology* 10(1):3–24. doi: 10.1111/j.1472-4669.2011.00305.x
- Millero FJ (2010). Carbonate constants for estuarine waters. *Marine and Freshwater Research*, 61(2):139. doi: 10.1071/MF09254
- Nava H, Alvarado-Rodríguez JF, and Ruiz-Montiel C 2024, March. Esponjas dulceacuáticas en microbialitos de un lago cratérico en Los Espinos, Michoacán. *Boletín de La Sociedad Científica Mexicana de Ecología*:26–33. <https://scme.mx/boletin-de-la-scme-2024/>
- NOAA (2023). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html#global>
- Perry RS, McIoughlin N, Lynne BY, Sephton MA, Oliver JD, Perry CC, Campbell K, Engel MH, Farmer JD, Brasier MD, and Staley JT (2007). Defining biominerals and organominerals: Direct and indirect indicators of life. *Sedimentary Geology*, 201(1–2):157–179. doi: 10.1016/j.sedgeo.2007.05.014
- Pratt BR and Riding R (1993). Calcareous Algae and Stromatolites. *Palaios* 8(1). doi: 10.2307/3515226
- R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Raven JA and Geider RJ (1988). Temperature and algal growth. *New Phytologist*, 110(4):441-461. doi:10.1111/j.1469-8137.1988.tb00282.x
- Rendón-López MJ (2008). Limnología Física del Lago Cráter Los Espinos, Municipio de Jiménez Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 107 pp.
- Riding R (2000). Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology* 47(s1):179–214. doi:10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x
- Siebe C, Guilbaud, M-N, Salinas S, and Chédeville-Monzo C (2012). Eruption of Alberca de los Espinos tuff cone causes transgression of Zacapu lake ca. 25,000 yr BP in Michoacán, México. *IAC 4IMC Conference, IAVCEI*, 131(January):74–75.
- Monogenetic volcanism of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: Maar craters of the Zacapu basin and domes, shields, and scoria cones of the Tarascan highlands (Paracho-Paricutín region). Pre-meeting field guide for the 5th international maar conference. In Pre-Meeting Field Guide for the 5th International Maar Conference:1–39. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Siebe C, Marie-Noëlle G, Salinas S, Kshirsagar P, Oryaëlle-Chevrel M, Ramón de la Fuente J, Hernández Jiménez A, and Godínez L (2014). Monogenetic volcanism of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: Maar craters of the Zacapu basin and domes, shields,

and scoria cones of the Tarascan highlands (Paracho-Paricutin region). *Pre-meeting field guide for the 5th International Maar Confer.* <https://theghub.org/resources/3712>.

Urrutia-Cordero P, Ekwall MK, and Hansson L-A (2016). Local food web management increases resilience and buffers against global change effects on freshwaters. *Scientific Reports. Nature Publishing Group* 6(1):29542. doi:10.1038/srep29542

Wetzel RG (2001b). Fate of heat. In: Wetzel RG (ed) *Limnology* (Third Edition). Academic Press, San Diego, pp 71-92. doi:10.1016/B978-0-08-057439-4.50010-1

Wetzel RG (2001). The inorganic carbon complex. In: Wetzel RG (ed) *Limnology* (Third Edition). Academic Press, San Diego, pp 187-204. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50015-0>

Zeebe RE, Wolf-Gladrow D (2001). *CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes*, vol 65. Elsevier oceanography series. Elsevier.

Zeyen N, Benzerara K, Beyssac O, Daval D, Muller E, Thomazo C, Tavera R, López-García P, Moreira D, Duprat E (2021). Integrative analysis of the mineralogical and chemical composition of modern microbialites from ten Mexican lakes: What do we learn about their formation? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 305:148–184. doi:10.1016/j.gca.2021.04.030

Zeyen N, Daval D, Lopez-Garcia P, Moreira D, Gaillardet J, Benzerara K (2017). Geochemical Conditions Allowing the Formation of Modern Lacustrine Microbialites. *Procedia Earth and Planetary Science* 17:380-383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.096>