

Distribución estacional del fitoplancton en un lago cálido monomíctico en Michoacán, México

Hernández-Morales R.¹✉, M. R. Ortega M.¹, J.D. Sánchez H.¹, R. Alvarado V.¹ y M. S. Aguilera R.²

¹Laboratorio de Biología Acuática "J. Javier Alvarado Díaz" Facultad de Biología, UMSNH

²Laboratorio de Análisis Químico "Rosa María Torres Ponce de León" Facultad de Biología. UMSNH

Resumen

En México los lagos tropicales profundos presentan un comportamiento termal que los postula para ser monomícticos cálidos con circulación en invierno, característica que permite la circulación y estratificación del sistema lacustre en un ciclo anual, creando fluctuaciones en las variables físicas y químicas en la columna de agua, que conducen un patrón sucesional del fitoplancton, el cual fue medido en el Lago Cráter La Alberca de Tacámbaro, realizando arrastres verticales con una red cónica de 39 μm y tomando muestras con la botella de Van Dorn a diferentes profundidades en cinco sitios, preservando con formol al 4% neutralizado con bórax. Se determinaron 136 especies pertenecientes a Chlorophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta, Dinophyta, Euglenophyta, Xantophyta, Cryptophyta y Chrysophyta, siendo abundantes Bacillariophyta en invierno y Chlorophyta el resto del año, con un florecimiento de Cyanophyta en otoño, arrojando valores elevados en diversidad alfa de Shannon y Wiener en invierno, verano y otoño, con el mínimo en primavera. Las variaciones biológicas en la columna fueron dirigidas por la temperatura, la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos, evidenciadas por curvas clinógradas de oxígeno disuelto. Se demuestra la estacionalidad en la distribución del fitoplancton y el patrón taxonómico encontrado en lagos tropicales y templados.

Palabras clave: *Fitoplancton, lago cráter, monomíctico.*

Abstract

In Mexico the deep tropical lakes show a thermal behavior that posits as monomíctico warm with circulation in winter, a feature that allows the circulation and stratification of the lake system in an annual cycle, creating fluctuations in physical and chemical variables in the water column, which drive a successional pattern of phytoplankton, which was measured at Crater Lake La Alberca of Tacámbaro, by vertical tows with a conical net of 39 μm and taking samples with a Van Dorn bottle at different depths in five sites, preserved with formalin (4%) neutralized with borax. 136 species were identified belonging to Chlorophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta, Dinophyta, Euglenophyta, Xantophyta and Cryptophyta, being abundant Bacillariophyta in winter and Chlorophyta the rest of the year, with a bloom of Cyanophyta in the fall, behavior that gave high values of alpha diversity (Shannon and Wiener) in winter, summer and autumn, with the minimum in spring. The biological variation in the column was directed by the temperature, electrical conductivity and total dissolved solids, evidenced by clinograde curves of dissolved oxygen. It demonstrates the seasonality in the distribution of phytoplankton and the taxonomic pattern found in tropical and temperate lakes.

Key words: *Phytoplankton, crater lake, monomictic.*

Introducción

La distribución estacional de las comunidades biológicas y su dinámica ha sido estudiada en las últimas décadas (Lewis 1978, Bootsma 1993, Oliver & Granf 2000, Oliva *et al.* 2001, Alvarado 2003, Tavera y Martínez-Almeida 2005 y Vázquez *et al.* 2005), con el fin de generalizar el comportamiento limnológico de los sistemas acuáticos y proveer herramientas para conocer las tasas de producción energética que estos presentan. En lagos tropicales profundos se conoce que hay un patrón en la sucesión biológica, influenciada por la hidrodinámica de la columna de agua y eventos meteorológicos (Salmaso, 2000), los cuales crean condiciones específicas para el florecimiento de diferentes grupos algales, predisponiendo un incremento o deceso de los consumidores primarios y secundarios (Lugo *et al.* 1999 y Kuang *et al.* 2004). Estas dinámicas en lagos tropicales profundos son dirigidas por

eventos de mezcla y de estratificación termal (Estévez, 1998); los cuales dan pauta a sucesiones algales en invierno y principios de primavera (Bernal-Brooks 1998, Oliva *et al.* 2001, Alcocer y Lugo 2003, Alvarado 2003 y Ramos-Higuera *et al.* 2008), en verano (Oliva *et al.*, 2001; Falcón *et al.* 2002, Alvarado 2003 y Alcocer y Lugo 2003) y en otoño (Lewis 1978a; Oliver y Granf 2000, Oliva *et al.* 2001, Alvarado 2003 y Ramos-Higuera *et al.* 2008).

En el estado de Michoacán en México se localizan cuatro lagos tropicales profundos, de los cuales tres son lagos cráter. La Alberca de Tacámbaro es el más grande de ellos y su uso radica en proveer recursos hídricos a las actividades piscícolas y ser motor económico de las actividades agrícolas de la zona, factor que permite una constante recirculación nutrimental de la columna de agua, que aunado a los eventos meteorológicos y de circulación, logran dirigir la variación estacional del fitoplancton, fenómeno que en el presente trabajo se determina para lograr distinguir los periodos de estabilidad en la estructura de la comunidad y los patrones en la sucesión temporal específica que determinan la diversidad y la dominancia del gremio.

✉ **Autor de correspondencia:** M. C. Rubén Hernández Morales. Laboratorio de Biología Acuática, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Gral. Martín Castrejón 742 a, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, C.P. 58040. Número telefónico (443) 1 72 97 05. Fax (443) 3.16.74.12. email: quercusbios@hotmail.com

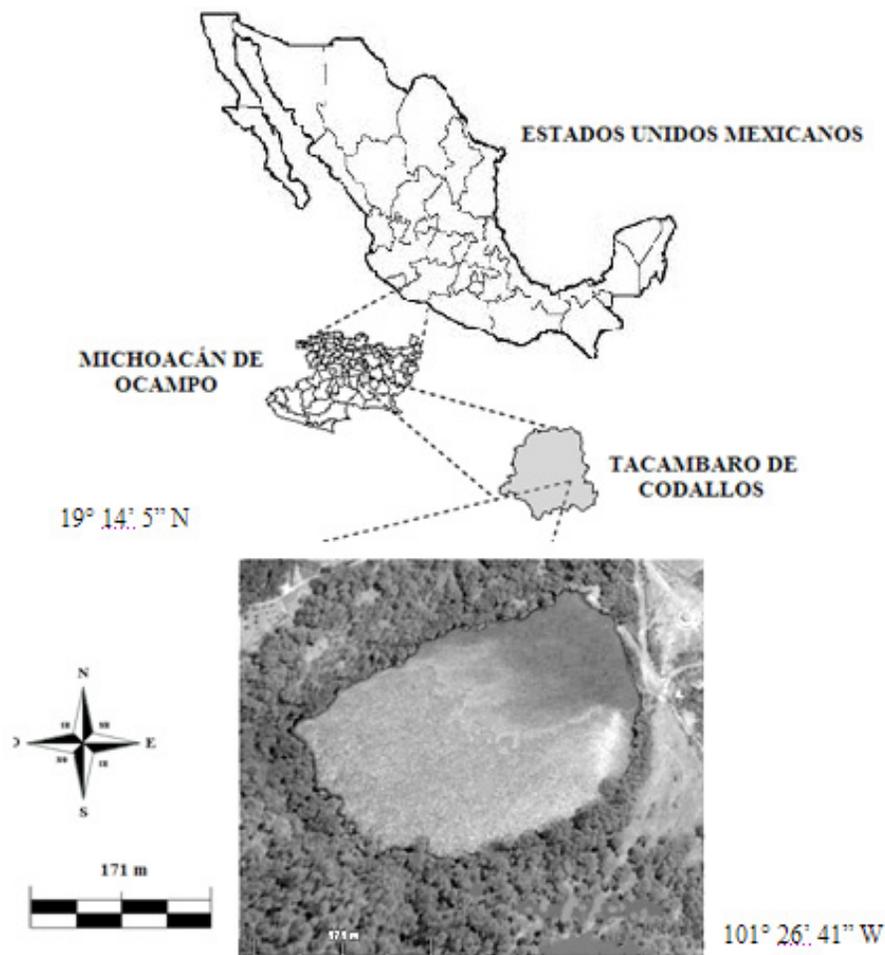


Figura 1. Localización del área de estudio.

Materiales y métodos

Se colectaron un total de 136 muestras en cuatro estaciones del año (Invierno, Primavera, Verano y Otoño), en cinco sitios, durante el 2006, de las cuales 20 fueron tomadas con una red cónica de 39 μm por arrastre vertical, de los 3 m hasta la superficie y 116 fueron obtenidas con la botella de Van Dorn de 3L a diferentes profundidades (0.5, 3, 5, 7, 10, 15, 20 y 26 m), en 4 sitios y por la poca profundidad de un sitio sólo se colectó en la superficie y el fondo (0.5 y 3 m). Submuestras de 300 mL fueron preservadas con formol neutralizado con bórax, con una concentración final del 4% y almacenadas en frascos de plástico en el Herbario Ficológico (EBUM), de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La determinación del material ficológico fue a nivel específico, utilizando un microscopio Leitz, con los aumentos de 20, 40 y 100 X y literatura especializada, considerando

la curva de acumulación de especies de Braun-Blanquet (1979), con un tamaño mínimo de muestra de 27 laminillas, mientras que la cuantificación se realizó utilizando cámaras de sedimentación de 10 mL con un microscopio invertido modelo ID03 marca ZEISS, por una modificación de la técnica de Utermöhl (Schwoerbel, 1975). Los parámetros de la estructura de la comunidad, como diversidad alfa y dominancia fueron evaluados con el índice de Shannon-Wiener y Simpson respectivamente con el programa estadístico Biotoool's versión 0.10 (Hanks, 1998).

En los mismos estratos de colecta se determinaron; Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, Oxígeno Disuelto (mg l^{-1}), Sólidos Totales Disueltos (mg l^{-1}), Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y Salinidad (00/100). Mientras que para la superficie y fondo se determinaron las concentraciones de; Fósforo total ($\mu\text{g l}^{-1}$), Fósforo reactivo ($\mu\text{g l}^{-1}$), Nitrógeno -Amonio (mg l^{-1}), Nitrógeno-Nitritos (mg l^{-1}) y Materia Orgánica disuelta (mg l^{-1}), además de la transparencia (m), siguiendo los criterios de APHA-AWWA-WPCF (1995).

l^{-1}) y Materia Orgánica disuelta (mg l^{-1}), además de la transparencia (m), siguiendo los criterios de APHA-AWWA-WPCF (1995).

Resultados

Variables Ambientales

El lago cráter La Alberca, presentó un comportamiento termal que lo postula para clasificarse como lago monomíctico cálido según la clasificación de Lewis (1983), con circulación en invierno y estratificación el resto del año. La temperatura (Fig. 2) presentó un rango de 7.98°C , con su máximo en la superficie de la columna de agua para verano (25.18°C) y el mínimo a los 20 m durante invierno (17.2°C), con una media anual de 20.4°C ($\sigma 2.82^{\circ}\text{C}$). El ancho del epilimnio abarcó de 5 a 7 m, con su máximo en otoño (0 a 7 m) y el metalimnio ocupó de 2 a 5 m en la columna de agua, con su máximo en primavera (5 a 10 m) y un mínimo en invierno y verano (5 a 7 m), mientras que el hipolimnio abarcó en el perfil del lago de 16 a 19 m, con su máximo en verano (7 a 26 m) y el mínimo en primavera y otoño (10 a 26 m).

Con respecto al oxígeno disuelto (Fig. 3) se obtuvieron los valores máximos en la superficie en la primavera (10.2 mg l^{-1}), mientras los mínimos se registraron en la parte media y baja del hipolimnio durante el resto del año (0 mg l^{-1}), generando anoxia debajo de los 10 m en invierno y en los niveles inferiores a 15 m el resto del año. Esta variable reportó un rango de 10.2 mg l^{-1} con una media anual de 3 mg l^{-1} ($\sigma 3.56 \text{ mg l}^{-1}$), formando curvas linógrafas durante el periodo de estudio.

El pH presentó los valores más altos durante primavera (9.1), logrando diferenciar en esta estación a la columna, mostrando un epilimnio básico, un metalimnio básico con tendencia a neutro y un hipolimnio neutro. Mientras que el mínimo se observó en invierno (6.3), caracterizando a la columna por mostrar un epilimnio y metalimnio ácido y un hipolimnio neutro a los 10 m desarrollando condiciones ácidas en el fondo. Cabe resaltar que esta variable muestra un patrón durante verano y otoño, ello influenciado por el establecimiento de una estratificación fuerte en este periodo, generando un epilimnio y metalimnio

ligeramente básico y un hipolimnio neutro. Con una media anual cercana a 7.2 (σ 0.75) y un rango de 2.9.

La transparencia con el disco de Secchi, fue alta durante el invierno, primavera y otoño, ocupando valores menores para el verano, mientras que los sólidos totales disueltos presentaron incremento en el periodo de circulación, patrón que no coincidió con la conductividad, ya que ésta fue elevada durante la estratificación temprana, al igual que el fósforo total y la materia orgánica disuelta. Por su parte los ortofosfatos, el amonio y los nitritos presentaron valores mayores cuando tuvo lugar la estratificación tardía (Tabla 1).

Fitoplancton

Se determinaron 136 especies, pertenecientes a Chlorophyta (57), Bacillariophyta (44), Cyanophyta (16), Euglenophyta (8), Dinophyta (7), Chrysophyta (2), Cryptophyta (1) y Xantophyta (1), de las cuales Bacillariophyta encabeza la abundancia del fitoplancton durante invierno y Chlorophyta el resto del año.

En el periodo de circulación (Fig. 5) el fitoplancton estuvo conformado por seis divisiones taxonómicas, distribuidas a lo largo de la columna de agua, de las cuales las diatomeas fueron las más abundantes, con su máximo a los cinco metros con *Synedra acus*, siendo dominante en la columna *Stephanocyclus meneghiniana*. Las algas verdes fueron el segundo grupo con concentraciones de organismos importantes, con *Tetraedron*

minimum a la cabeza en la columna de agua y en el máximo de la superficie. Las cianobacterias por su parte fueron el tercer grupo en importancia con su máximo para los 5 m (*Chroococcus minutus*) y 20 m (*Gloeocapsopsis crepidinum*), con una débil concentración entre los 7 y 15 m. Mientras que en menor concentración ocurrieron los dinoflagelados (*Peridinium inconspicuom*), las euglenas (*Trachelomonas hispida*) y xantoficeas (*Ophioctyum cochleare*).

Durante la estratificación temprana la estructura de la comunidad del fitoplancton evidenció una fuerte reconfiguración (Fig. 6) siendo abundantes las algas verdes, estando a la cabeza *Didymocystis fina*, ocupando sus máximos en la superficie y siete metros, con una disminución marcada a los 10 m con representación de *Cosmarium bioculatum* y *D. fina* hasta el fondo. Por su parte la cianobacterias reemplazaron a las diatomeas, ocupando la columna de agua con sus máximos a los 7 m (*Chroococcus limneticus*), mientras que las diatomeas ocuparon su máximo en la superficie con *Stephanocyclus meneghiniana* a la cabeza. Los dinoflagelados (*Peridinium thompsonii*) y las euglenas (*Trachelomonas hispida*), estuvieron presentes en ésta temporada pero con bajas concentraciones en la columna exhibiendo el máximo en la superficie y 5 metros respectivamente.

Para la temporada media de estratificación (Fig. 7) las algas verdes continúan siendo abundantes en la columna con *Didymocystis fina*, *Tetraedron minimum* y *Coelastrum reticulatum*,

Tabla 1. Variables ambientales durante el 2006

VARIABLE	INVIERNO FEBRERO 2006		PRIMAVERA MAYO 2006		VERANO AGOSTO 2006		OTOÑO OCTUBRE 2006	
	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
Transparencia (m)	1.3	0.34	1.32	0.06	1.14	0.10	1.26	0.20
Sólidos Totales Disueltos (mg L ⁻¹)	105.99	23.11	97.02	27.92	101.59	14.02	104.1	31.17
Conductividad Eléctrica (μ S cm ⁻¹)	193.3	10.9	203.4	8.8	195.3	21.2	193.2	29.5
Salinidad (00/100)	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0
Fósforo Total (μ g L ⁻¹)	54.32	45.81	105.91	81.15	21.21	10.19	19.09	16.86
Fósforo reactivo (μ g L ⁻¹)	3.83	2.34	2.92	1.33	4.8	1.37	2.17	1
Nitrógeno - Amonio (mg L ⁻¹)	0.081	0.122	0.065	0.102	0.094	0.1	0.072	0.084
Nitrógeno - Nitrato (mg L ⁻¹)	0.0011	0.0004	0.0012	0.0007	0.0019	0.002	0.0007	0.0002
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg L ⁻¹)	6.09	1.26	8.83	1.17	7.32	2.07	4.56	0.57

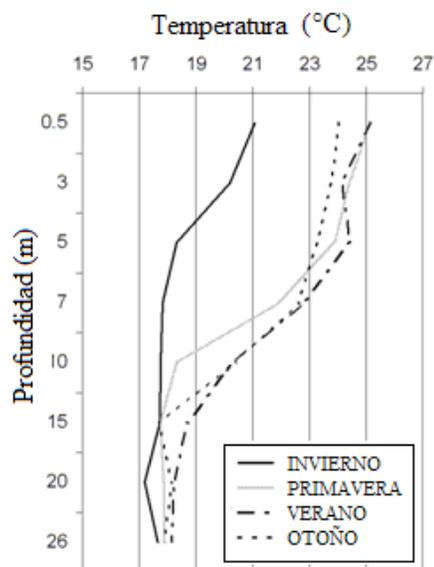


Figura 2. Perfiles de temperatura.

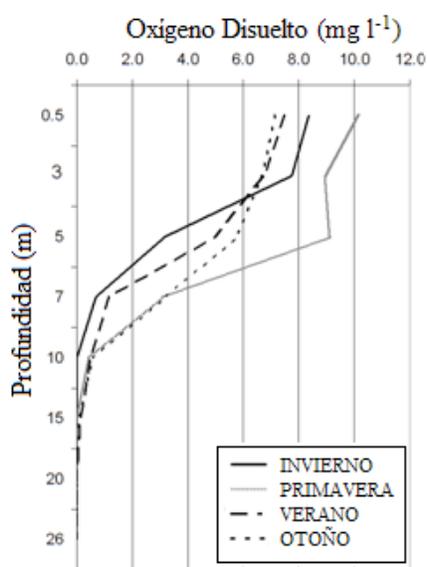


Figura 3. Perfiles de Oxígeno.

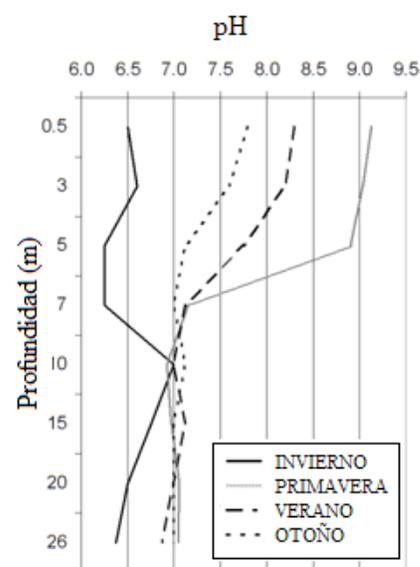


Figura 4. Perfiles de pH.

mientras que se registra un florecimiento de diatomeas en el hipolimnio, con su máximo a los 20 m, representado por *Synedra acus* y *Ulnaria ulna*, acompañado por un incremento de las cianobacterias en esta capa (*Merimospedia glauca*), con su máximo para la superficie, sobresaliendo *Anabaena catenula* y *Microcystis wesenbergii*. Cabe resaltar un aumento en la concentración de dinoflagelados en el epilimnio, metalimnio y parte superior del hipolimnio en esta época con abundancia de *Peridinium inconspicuom* y *P. volzii*. Y la presencia de euglenofíceas (*Euglena comunis*) y xantofíceas (*Ophiocytum cochleare*) en el metalimnio e hipolimnio, además de criptofíceas (*Cryptomonas ovata*), en el epilimnio.

Y por último para la temporada final de estratificación se observó un incremento de cianobacterias en la columna (Fig. 8) con sus máximos a los 5 y 15 m, sobresaliendo *Anabaena catenula* y *Merimospedia glauca* respectivamente. Las algas verdes encabezaron otra vez la abundancia en esta época con valores altos en la superficie y a los 5 m, representados por *Tetraedon minimum* y *Crucigeniella saquei* respectivamente. Mientras que las diatomeas son el grupo con altas concentraciones en el fondo (*Synedra acus* y *Ulnaria ulna*). Además del aumento de dinoflagelados en el epilimnio con *Peridinium inconspicuom* y *Peridinium thompsonii*. Y la presencia de xantofíceas (*Ophiocytum cochleare*) y criptofíceas

(*Cryptomonas ovalo*) en la superficie y de euglenas en la superficie (*Trachelomonas hispida*) y fondo (*Euglena comunis*).

Con respecto a la diversidad y dominancia de la comunidad del fitoplancton en la columna de agua durante el periodo anual, se observa que ambas variables presentan una correlación inversa. La diversidad evidenció valores altos en invierno (2.6 bits/Ind. σ 0.2), mientras los valores mínimos los registró para primavera (1.5 bits/Ind. σ 0.1), encontrando valores ligeramente elevados en verano (2.3 bits/Ind. σ 0.2) y otoño (2.2 bits/Ind. σ 0.2). Por lo tanto la dominancia fue elevada en primavera (0.41 σ 0.044), mientras sus valores bajos se observaron en invierno (0.15 σ 0.02), verano (0.14 σ 0.03) y otoño (0.15 σ 0.044).

Discusión

El régimen termal presente para el 2006 en el Lago Cráter La Alberca de Tacámbaro, es característico de sistemas monomícticos cálidos, los cuales en México describen los eventos termodinámicos de lagos profundos (Alcocer et al. 2000, Oliva et al. 2001, Alvarado 2003, Tavera y Martínez-Almeida 2005 y Vázquez et al. 2005) debido a que se localizan dentro áreas tropicales (Lewis 2000). Esta cualidad térmica genera fluctuaciones temporales y espaciales de los nutrientes en la columna de agua y determina la sucesión de las comunidades biológicas (Reynolds

1984), dirigiendo a su vez fluctuaciones en las variables físicas y químicas (Estévez 1998) como el oxígeno, el cual en lagos eutróficos presenta curvas linógrafas (Wetzel 2001) como las observadas en la Alberca de Tacámbaro, las cuales se asocian a la producción del gas por el fitoplancton y el consumo por organismos heterótrofos a lo largo de la columna de agua y la oxidación de la materia orgánica en la capa del fondo creando altas concentraciones de oxígeno disuelto en el epilimnio y anoxia en el hipolimnio, característica que prevalece durante todo el año debido a la elevada producción de materia orgánica en el epilimnio.

Durante invierno se observa una correlación positiva entre el oxígeno y la temperatura (F 132.57 y $p < .0001$), no por la diferencia de densidades que permite que el oxígeno se distribuya, sino por efectos biológicos (relacionado con la productividad primaria) en la columna, limitando la presencia del oxígeno en el fondo lo cual es característico de la época de circulación en sistemas monomícticos (Alcocer et al. 2000, Alvarado 2003, Schabetsberger et al. 2004, Shikano et al. 2004, Fennel et al. 2007, Larson et al. 2007, Ramos-Higuera et al. 2008).

Con respecto al fitoplancton en esta época, sobresale el florecimiento de diatomeas, el cual es una característica de la sucesión algal en sistemas tropicales (Oliva et al. 2001, Alvarado 2003, Vázquez et al. 2005 y Ramos-Higuera et al. 2008)

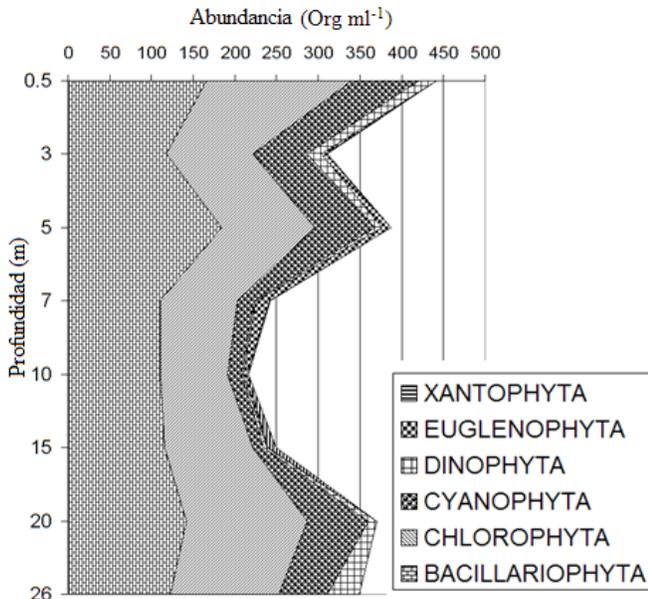


Figura 5. Abundancia del fitoplancton en invierno del 2006.

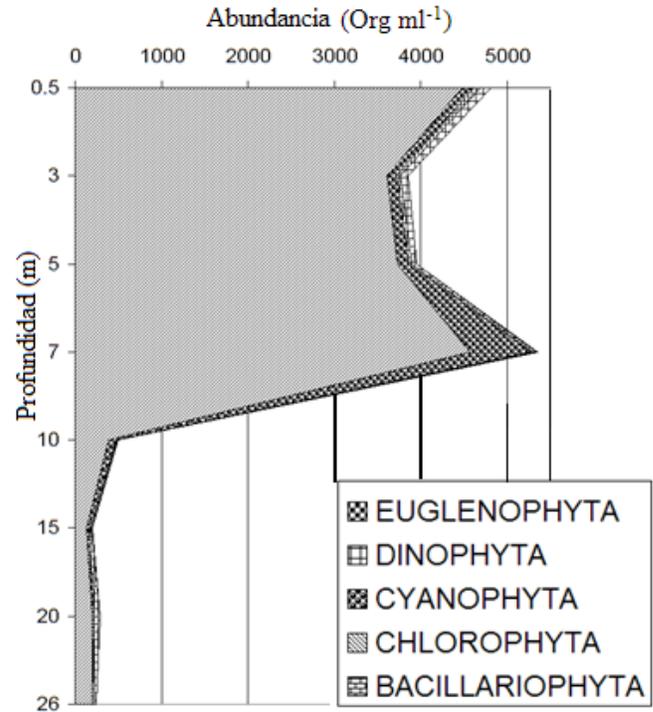


Figura 6. Abundancia del fitoplancton en primavera del 2006.

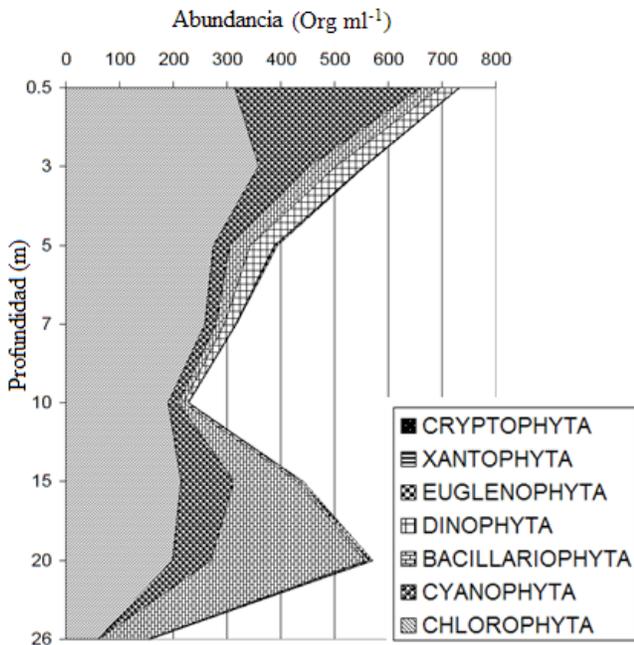


Figura 7. Abundancia del fitoplancton en verano 2006.

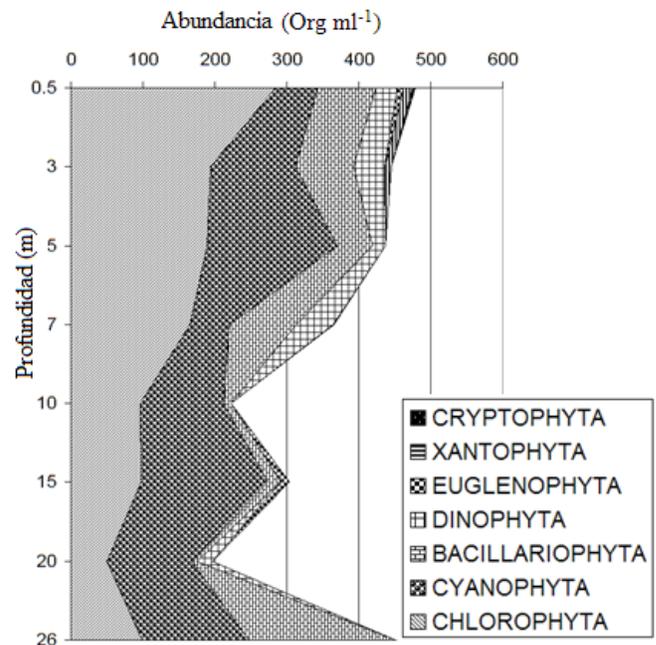


Figura 8. Abundancia del fitoplancton en otoño del 2006.

aportando elevados valores en cuanto a diversidad alfa se refiere, ya que la resuspensión del sílice contenido en el fondo, además de los nutrientes, concentraciones de sólidos e iones crean el ambiente propicio para la proliferación del grupo (Darley 1987, Round 1981 y Margalef 1983).

Además de la presencia de otros grupos algales a lo largo y ancho del vaso lacustre, no por su capacidad fotosintética a altas profundidades, en condiciones afóticas, sino por el efecto de la turbulencia que las distribuye en la columna de agua. Generando una correlación positiva en el incremento de las concentraciones

algales de grupos taxonómicos como Cyanophyta y Bacillariophyta (F 7.32 y $p > 0.0352$) y Cyanophyta y Chlorophyta (F 7.33 y $p > 0.0352$).

Cabe resaltar que el comportamiento del pH en el lago es el resultado de los iones suspendidos y de la productividad algal, ya que los valores elevados del pH en la columna de agua se localizan por debajo de los estratos con mayor producción

algal, circunstancia que eleva el pH en esta zona por el incremento de los carbonatos provistos por el fitoplancton (Koschel 1997).

En primavera continúa la correlación positiva del oxígeno con la temperatura (F 132.20 y $p < 0.0001$) además de que al iniciar la estratificación en el sistema otras variables son dirigidas por la temperatura y el oxígeno, siendo evidente una correlación positiva entre la temperatura y el pH (F 38.056 y $p > 0.0008$), los sólidos totales disueltos (F 38.056 y $p > 0.0001$), mientras que con el oxígeno se correlacionaron positivamente el pH (F 163.75 y $p < 0.0001$) y los sólidos totales disueltos (F 23.37 y $p > 0.0029$), lo cual corrobora que en los estratos donde se encuentren concentraciones algales importantes, habrá una mayor cantidad de oxígeno y un pH básico, omitiendo la zona de compensación en donde se encontrará el máximo de zooplancton que puede influir en dichas variables (Lugo *et al.* 1999).

Para esta época la abundancia del fitoplancton estuvo encabezada por las algas verdes, grupo característico de la estratificación temprana en lagos templados (Lewis 1978a y Oliver & Ganf 2000) florecimiento que no sigue el patrón de lagos tropicales, en donde las cianobacterias son el grupo dominante en la columna de agua en esta época (Oliva *et al.* 2001, Alvarado 2003 y Vázquez *et al.* 2005) y que es propiciado por la alta irradiación lumínica en el lago y la disponibilidad del fósforo y las formas de nitrógeno en la zona limnética, factores detonantes para el crecimiento del grupo (Darley 1987 y John *et al.* 2002). Esta presencia dominante de las algas verdes, afecta a la diversidad alfa del lago, ya que al aumentar la dominancia por el grupo, los valores de diversidad decrecen y es por ello que en esta época se ubican los valores mínimos en esta variable. Propiciando un patrón de distribución biológica evidenciado por las variables fisicoquímicas, donde las concentraciones de algas verdes mantuvieron una correlación positiva con la concentración de dinoflagelados (F 10.70 y $p > 0.0170$) correlacionadas a su vez positivamente con la temperatura (F 40.188 y $p > 0.0007$) el oxígeno disuelto (F 35.50 y $p > 0.0010$) y el pH (F 28.51 y $p > 0.0018$). Eligiendo

Euglenophyta y Cyanophyta los estratos con menor cantidad de iones suspendidos (F 25.32 y $p > 0.0024$).

Cuando la estratificación está establecida en el lago durante verano, la temperatura continua dirigiendo las variables de la columna de agua, manteniendo una correlación positiva con el oxígeno (F 26.60 y $p > 0.0021$) y el pH (F 18.59 y $p > 0.0050$), mientras ejerce una correlación negativa con la conductividad eléctrica (F 17.97 y $p > 0.0054$). El pH es influenciado por la concentración algal de la superficie pero no en el fondo, ya que la relación en esta capa es debida a la alta tasa de oxidación de la materia orgánica por acción de las bacterias. Además los iones suspendidos en el agua no están contribuyendo con los valores del pH (F 8.20 y $p > 0.0286$) lo cual corrobora que su fluctuación es debida a las actividades biológicas del sistema.

En esta época se observa una recomposición ficológica en la distribución de los grupos a lo largo de la columna de agua, encontrando que las algas verdes continúan encabezando la abundancia algal, lo cual es común para esta temporada en los lagos tropicales (Oliva *et al.* 2001, Alvarado 2003, Vázquez *et al.* 2005 y Ramos-Higuera *et al.* 2008) pero ahora con incrementos de cianobacterias al igual que en los lagos templados (Lewis 1978a y Oliver & Ganf 2000), con la variante de un florecimiento de diatomeas en el fondo, lo cual contribuye de manera certera al igual que en otros lagos monomícticos con el máximo de la productividad primaria en el hipolimnio (Lugo *et al.* 1999, Oliva *et al.* 2001, Alcocer y Filonov 2007, Macek *et al.* 2009 y Fennel *et al.* 2007).

La relación en las concentraciones algales muestra que al aumentar las concentraciones de Euglenophyta, aumentan también las de Bacillariophyta (F 12.48 y $p > 0.0123$) ubicándose en estratos con altas concentraciones de materia orgánica, sólidos totales disueltos e importantes valores de conductividad eléctrica, mientras que Chlorophyta y Dinophyta continúan manteniendo una correlación positiva (F 13.52 y $p > 0.0104$) elevando sus concentraciones simultáneamente en ambientes con pH básico, bajas concentraciones de sólidos y valores mínimos de conductividad eléctrica, condiciones ideales para el

desarrollo de éstos grupos (Round 1981, Margalef 1983, Darley 1987 y John *et al.* 2002).

Durante otoño, la presencia evidente de la termoclina continua correlacionándose positivamente con el oxígeno (F 51.72 y $p > 0.0004$) y el pH (F 6.15 y $p > 0.0477$), mientras para esta época el perfil térmico se correlaciona negativamente con los sólidos (F 11.95 y $p > 0.0135$) y la conductividad (F 37.91 y $p > 0.0008$), lo cual es corroborado en el registro elevado de la transparencia, creando un epilimnio ancho en comparación con el resto del año y reduciendo al metalimnio y al hipolimnio, variables que permiten la diversificación del fitoplancton a lo largo de la columna, comportamiento general en los lagos tropicales y templados profundos (Lewis 1978a y 1986, Oliver & Ganf 2000, Oliva *et al.* 2001, Alvarado 2003, Vázquez *et al.* 2005 y Ramos-Higuera *et al.* 2008) característica que da lugar a valores elevados en diversidad alfa para esta comunidad.

La distribución de los grupos en la columna de agua evidencia patrones, ya que las algas verdes ahora mantienen una correlación positiva con xantoficeas (F 11.16 y $p > 0.0156$) y criptoficeas (F 6.99 y $p > 0.0383$) en cuanto a su concentración relacionándose positivamente con la temperatura (F 21.22 y $p > 0.0037$), el oxígeno disuelto (F 39.85 y $p > 0.0007$) y el pH (F 12.87 y $p > 0.0115$) mientras que presentan correlación negativa con la conductividad eléctrica (F 7.33 y $p > 0.0352$), estando los dinoflagelados correlacionados positivamente con la temperatura únicamente (F 6.11 y $p > 0.0483$). En el mismo contexto las diatomeas y los euglenoideos presentan el mismo patrón en cuanto a concentraciones celulares se refiere, manteniendo una correlación positiva (F 12.48 y $p > 0.0123$), coincidiendo con valores elevados de sólidos totales disueltos y materia orgánica.

Es evidente un incremento en las concentraciones de las cianobacterias a lo largo de la columna en esta época, debido a su alta capacidad para asimilar las formas del fósforo inorgánico y presentar pigmentos fotosintéticos accesorios para utilizar longitudes de onda diferentes a las del espectro visible (Margalef 1983, Darley 1987, John *et al.* 2002 y Roelke

y Buyukates 2002), grupo presente también en la época en concentraciones considerables en otro lago tropical profundo en México (Vázquez *et al.* 2005).

Conclusiones

El régimen termal en el Lago Cráter La Alberca de Tacámbaro, que genera periodos de mezcla y estratificación en el vaso lacustre da lugar a variaciones estacionales de los grupos del fitoplancton, siguiendo un régimen sucesional característico de lagos templados y tropicales, propiciando el florecimiento de diatomeas en invierno, de algas verdes en la estratificación temprana y una diversificación algal durante la estratificación tardía.

La estructura de la comunidad considerando los valores de diversidad alfa del fitoplancton, exhibe que es estable en invierno, verano y otoño, rompiendo esta persistencia en primavera debido al incremento de la dominancia conducida por el florecimiento masivo de las algas verdes en esta época.

La diversidad y la dominancia presentan una correlación inversa y sus valores están influenciados por las variaciones en la dinámica fisicoquímica que crea fluctuaciones en la composición y abundancia de las especies del fitoplancton, siendo la temperatura, los sólidos totales disueltos y la conductividad, las variables que dirigen con significancia estadística la distribución del fitoplancton.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el soporte económico para el desarrollo de investigaciones en los lagos cráter de Michoacán.

Referencias

- Alcocer J, Lugo A, Escobar E, Sánchez MR, Vilaclara G** (2000) Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27: 3166-3169
- Alcocer J, Filonov AE** (2007) A note on the effects of an individual large rainfall event on saline Lake Alchichica, México. *Environ Geol.* 53: 777-783
- Alcocer J, Lugo A** (2003) Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central México. *Geofísica Internacional* 42(3): 523-528
- Alvarado VR** (2003) *Dinámica Estacional y Circadiana del Fitoplancton en el Lago de Zirahuén, Michoacán, México*. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. pp 124
- APHA-AWWA-WPCF** (1995) *Methods for the Examination of Water*. 19TH edition. American Public Health Association (APHA), American Methods Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF) USA
- Bernal-Brooks FW** (1998) The lakes of Michoacán (México): a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* 10: 20-34
- Bootsma HA** (1993) Spatio-temporal variation of phytoplankton biomass in Lake Malawi, Central Africa. *Verh. Int. Ver Limnol.* 25: 882-886
- Braun-Blanquet FW** (1979) *Fitosociología: Bases para el estudio de las Comunidades Vegetales*. H. Blume Ediciones. Madrid, España. pp 820
- Darley WM** (1987) *Biología de las Algas, Enfoque Fisiológico*. Limusa, México, pp 236
- Estévez FA** (1998) *Fundamentos de Limnología*. Interciencia FINEP. Rio de Janeiro. pp 575
- Falcón LI, Escobar-Briones E, Romero D** (2002) Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacterial consortia in Alchichica crater-lake, México. *Hydrobiologia* 467: 71-78
- Fennel K, Collier R, Larson G, Crawford G, Boss E** (2007) Seasonal nutrient and plankton dynamics in a physical-biological model of Crater Lake. *Hydrobiologia* 574: 265-280
- Hanks J** (1998) *Biological ToolBox*. Versión 0.10. Nacogdoches, TX
- John MD, Whitton BA, Brook JA** (2002) *The Freshwater Algal Flora of the British Isles*. Press Syndicate of the University of Cambridge. United Kingdom. pp 702
- Koschel RH** (1997) Structure and function of pelagic calcite precipitation in lake ecosystems. *Verh. int. Ver. Limnol.* 26: 343-349
- Kuang Q, Bi Y, Xia Y, Hu Z** (2004) Phytoplankton community and algal growth potential in Taipinghu Reservoir, Anhui Province, China. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 9: 119-124
- Larson** (1972) Temperature, transparency and phytoplankton productivity in Cráter Lake, Oregon. *Limnology and Oceanography* 17 (3): 410-417
- Lewis WM** (1978) Analysis of succession in a tropical phytoplankton community and a new measure of succession rate. *American Naturalist*. 112: 401-414
- Lewis WM** (1978a) Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *Journal of Ecology*. 66: 849-880
- Lewis WM** (1983) A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 40: 1779-1787
- Lewis WM** (1986) Phytoplankton succession in Lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia*. 138: 139-203
- Lewis WM** (2000) Basis for the protection and Management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 5: 35-48
- Lugo A, Gonzáles ME, Sánchez MR, Alcocer J** (1999) Distribution of *Leptodiatomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Rev. Biol. Trop.*, 47 (1): 141-148
- Macek M, Alcocer J, Lugo A, Martínez-Pérez ME, Peralta SL, Vilaclara FG** (2009) Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic tropical high altitude lake. *J. Limnology* 68(2): 1-10
- Margalef R** (1983) *Limnología*. Omega. Barcelona, España. pp 1010
- Oliva MG, Lugo A, Alcocer J, Peralta L, Sánchez MR** (2001) Phytoplankton Dynamics in a Deep, Tropical, Hyposaline Lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306
- Oliver RL, Granf GG** (2000) Freshwater blooms. En BA Whitton, M Potts (eds), *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, pp 149-194
- Ramos-Higuera E, J Alcocer, E Ortega-Mayagoitia y A Camacho** (2008) Nitrogeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica* 18 (1 Suplemento), 105-113
- Reynolds CS** (1984) *The Ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Great Britain. pp 384
- Roelke D, Buyukates Y** (2002) Dynamics of phytoplankton succession coupled to species diversity as a system-tool for study of *Microcystis* population dynamics in eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography*. 47: 1109-1118

- Round FE** (1981) *The Ecology of Algae*. Cambridge University Press. Great Britain. pp 243-356
- Salmaso N** (2000) Factors affecting the seasonality and distribution of cyanobacteria and chlorophytes: A case study from the large lakes south of the Alps, with special reference to Lake Garda. *Hydrobiologia*. 438: 43-63
- Schabetsberger R, Drozdowski G, Drozdowski I, Jersabek CD, Rott E** (2004) Limnological aspects of two tropical crater lakes (Lago Biao and Lago Loreto) on the island of Bioko (Equatorial Guinea). *Hydrobiologia* 524: 79–90
- Schwoerbel J** (1975) *Methoden der Hydrobiologie*. H. Blume Ediciones. España. pp 261
- Shikano S, Kikuchi E, Takagi S, Doi H** (2004) Volcanic heat flux and short-term holomixis during the summer period in a crater lake. *Limnology and Oceanography*. 49 (6): 2287-2292
- Tavera R, Martínez-Almeida V** (2005) Atelomixis as a Possible Driving Force in the Phytoplankton Composition of Zirahuén, A Warm-Monomictic Tropical Lake. *Hydrobiologia*. 533: 199-208
- Vázquez G, Jiménez S, Favila ME, Martínez A** (2005) Seasonal dynamics of the phytoplankton community and cyanobacterial dominate in a eutrophic crater lake in Los Tuxtlas, México. *Ecoscience* 12 (4): 485–493
- Wetzel RG** (2001) *Limnology*. Third edition. Academic Press. San Diego California USA. pp 1006