



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA EN  
DOS LAGOS TROPICALES DE ALTA MONTAÑA: "EL SOL"  
Y "LA LUNA", NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G A

P R E S E N T A

CLARA NEHELY DELGADO OCEJA



DIRECTOR DE TESIS: DR. JAVIER ALCOGER DURAND

2004



FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCIÓN ESCOLAR



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA 14  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: "Distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica en dos lagos tropicales de alta montaña: "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México"

realizado por

Clara Nehely Delgado Oceja

con número de cuenta 09622393-0 , quien cubrió los créditos de la carrera de:

Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

Dr. Javier Alcocer Durand

*Javier Alcocer Durand*

Propietario

Dra. Elva Escobar Briones

*Elva Escobar Briones*

Propietario

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza

*Enrique Arturo Cantoral Uriza*

Suplente

Dr. Luis Ernesto Marín Stillman

*Luis Ernesto Marín Stillman*

Suplente

M. en C. Luis Alberto Oseguera Pérez

Consejo Departamental de Biología

*Juan Manuel Rodríguez Chávez*  
M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez

FACULTAD DE CIENCIAS



<b>Índice General</b>	<b>pp.</b>
Índice de Tablas	3
Índice de Figuras	5
Resumen / Abstract	7/8
Introducción	9
Justificación	12
Antecedentes	14
Objetivos	17
Hipótesis	18
Área de Estudio	19
Metodología	
I. Trabajo de Campo	
II. Trabajo de Laboratorio	22
III. Trabajo de Escritorio	
Resultados	28
Discusión	58
Conclusiones	68
Agradecimientos	70
Referencias	73

## **Índice de Tablas**

	<b>pp.</b>
<i>Tabla 1.</i> Profundidad del disco de Secchi en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México:	29
<i>Tabla 2.</i> Clima de luz en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	31
<i>Tabla 3.</i> Temperatura en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	34
<i>Tabla 4.</i> Oxígeno disuelto en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	37
<i>Tabla 5.</i> pH en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	40
<i>Tabla 6.</i> Conductividad en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	42
<i>Tabla 7.</i> Concentración de nutrimentos en los lagos "El Sol" y La Luna, Nevado de Toluca, México.	40
<i>Tabla 8.</i> Concentración de Clor-a en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	54
<i>Tabla 9.</i> Concentración de Clor-a reportada en lagos tropicales y templados de alta montaña.	64

<b>Índice de Figuras</b>	<b>pp.</b>
<i>Figura 1.</i> Localización geográfica de los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	21
<i>Figura 2.</i> Variables meteorológicas (precipitación total mensual, temperatura, días con granizo y evaporación (SMN), Nevado de Toluca, México.	28
<i>Figura 3.</i> Variación temporal de la transparencia de disco de Secchi en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	29
<i>Figura 4.</i> Extinción lumínica en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	30
<i>Figura 5.</i> Variación temporal del clima de luz (SPAR) en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	31
<i>Figura 6.</i> Variación del clima de luz (PAR %) en fondo en los lagos "El Sol" y La Luna, Nevado de Toluca, México.	32
<i>Figura 7.</i> Variación temporal de la temperatura del agua en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	34
<i>Figura 8.</i> Comparación de la diferencia vertical máxima y mínima de temperatura del agua en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.	35
<i>Figura 9.</i> Comparación de la diferencia máxima y mínima de temperatura del agua en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.	35

<i>Figura 10.</i> Variación de la temperatura promedio del agua en los lagos "El Sol" y "La Luna" (2000 a 2001) y atmosférica en el Nevado de Toluca (1964 a 2000) (Sistema Meteorológico Nacional).	36
<i>Figura 11.</i> Variación temporal y porcentaje de saturación en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	38
<i>Figura 12.</i> Comparación de la diferencia vertical máxima y mínima de OD en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.	38
<i>Figura 13.</i> Comparación de la diferencia vertical máxima y mínima de OD en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.	39
<i>Figura 14.</i> Variación temporal de pH en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	40
<i>Figura 15.</i> Variación temporal de la conductividad en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	42
<i>Figura 16.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de $N-NH_4$ en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	45
<i>Figura 17.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de $N-NO_2$ en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	46
<i>Figura 18.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de $N-NO_3$ en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	48
<i>Figura 19.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de $NID$ en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	49
<i>Figura 20.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de $P-PO_4$ en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	51

<i>Figura 21.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de Si-SiO <sub>2</sub> en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	52
<i>Figura 22.</i> Variación temporal y vertical de la concentración de Clor-a por volúmen en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	54
<i>Figura 23.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de la concentración de Clor-a en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.	55
<i>Figura 24.</i> Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de la concentración de Clor-a en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.	56
<i>Figura 25.</i> Variación temporal de la Clor-a integrada en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.	57



## Resumen

El presente estudio tiene como finalidad determinar la distribución vertical y la variación temporal de la concentración de clorofila-a [Clor-a] como proxy de la biomasa fitoplanctónica en dos lagos tropicales mexicanos de alta montaña: "El Sol" y "La Luna" (19°06'N, 99°45'O, 4200m s.n.m., 200m arriba del límite del crecimiento arbóreo). Son dos lagos típicos de alta montaña: transparentes, oligotróficos-ultraoligotróficos, ácidos, alimentados principalmente por precipitación pluvial y deshielo, "polimícticos cálidos continuos".

"El Sol" presentó una concentración promedio anual de Clor-a de  $0.524 \pm 0.323 \mu\text{g L}^{-1}$ , mientras que "La Luna" presentó valores menores con  $0.364 \pm 0.264 \mu\text{g L}^{-1}$ . En "El Sol" la concentración máxima se registró en octubre con  $1.223 \mu\text{g L}^{-1}$  y estuvo correlacionada positiva y significativamente ( $R=0.557$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ) al aporte de nutrientes –nitratos- producto de las lluvias de verano. En "La Luna" la concentración máxima se presentó en junio con  $0.779 \mu\text{g L}^{-1}$  y estuvo correlacionada negativa y significativamente ( $R=-0.599$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ) también al aporte de nutrientes –nitrógeno inorgánico disuelto- producto del deshielo primaveral.

La concentración de Clor-a integradas por unidad de área ("El Sol"  $25.55 \pm 7.074 \text{mg m}^{-2}$  y "La Luna"  $12.29 \pm 6.998 \text{mg m}^{-2}$ ) fue baja con relación a otros estudios realizados en lagos tropicales de alta montaña, pero similar a la de otros lagos de alta montaña templados.

La distribución vertical de biomasa fitoplanctónica [Clor-a] en "El Sol" mostró una distribución preferente hacia el fondo en la época cálida húmeda de verano mientras que en "La Luna" fue en el estrato superior a principios de la misma época. El resto del año de la época fría seca de invierno, ambos lagos presentaron una distribución vertical homogénea.

## Abstract

The present study describes seasonal variations and the vertical distribution of chlorophyll-*a* (Clor-*a*) as a proxy of phytoplankton biomass in two Mexican tropical high mountain lakes: "El Sol" y "La Luna" (19°06'N, 99°45'O, 4200m a.s.l., 200m above timberline). These are typical high mountain lakes: principally rain and ice-melt fed lakes, continuous warm polymictic characterized by its transparent, oligotrophic-ultraoligotrophic, acid, waters.

The mean annual concentration of chlorophyll-*a* was  $0.524 \pm 0.323 \mu\text{g L}^{-1}$  in "El Sol", and  $0.364 \pm 0.264 \mu\text{g L}^{-1}$  in "La Luna". "El Sol" presented its maximum Clor-*a* concentrations in October with  $1.223 \mu\text{g L}^{-1}$  correlated with nitrates input associated to the summer rainy season ( $R=0.557$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ). "La Luna" displayed maximum chlorophyll-*a* concentrations in June with  $0.779 \mu\text{g L}^{-1}$  correlated with dissolved inorganic nitrogen input through the spring snowmelt ( $R=-0.599$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ). Integrated mean annual chlorophyll-*a* concentrations ("El Sol"  $25.55 \pm 7.074 \mu\text{g m}^{-2}$ , "La Luna"  $12.29 \pm 6.998 \mu\text{g m}^{-2}$ ) was low compared to tropical high mountain lakes but similar to other temperate high mountain lakes.

"El Sol" and "La Luna" had a heterogeneous vertical distribution in summer wet warmer season with the highest concentrations in the deepest layers and surface layers, respectively and homogenous distribution in winter cold dry season.

## Introducción

Los lagos de alta montaña (también denominados alpinos) son ecosistemas acuáticos ubicados por arriba del límite de crecimiento arbóreo ("timberline"), donde las condiciones se vuelven extremas evitando el establecimiento de una estructura vegetal compleja (Sommaruga, 2001). La línea de crecimiento arbóreo se presenta a los 4500m s.n.m. en latitudes ecuatoriales (0° NS), como el monte Kenia en África (0°N), mientras que en latitudes templadas (23° a 90°NS) como en los Alpes (45°N), ésta se localiza a los 3000m s.n.m. (Sommaruga, 2001). Los lagos de alta montaña ubicados en los trópicos (23° N a 23°S) se encuentran a una altitud entre 2000 y 4000m s.n.m., principalmente en los Andes de Sudamérica (Ecuador, Venezuela, Colombia, Norte de Perú), en Norte y Centroamérica (México, Costa Rica y Guatemala), en África (Etiopía, Kenia, Uganda, Tangañika) y en Asia (Indonesia y Papúa Nueva Guinea) (Loffler, 1964; Gunkel y Casallas, 2002a). La mayoría de los lagos tropicales de alta montaña, fueron formados durante el Pleistoceno y algunos formados recientemente. Éstos se caracterizan por ser ecosistemas que se originaron básicamente a partir de dos fenómenos geológicos: por actividad volcánica y por retracción glacial (Loffler, 1964).

Los lagos tropicales de alta montaña (p.e. >3,800m; Loffler, 1972) en México son de origen volcánico principalmente (Armienta *et al.*, 2000) ubicados en elevaciones orográficas importantes, como es el caso del eje Neovolcánico. Existen solamente dos lagos perennes, "El Sol" y "La Luna", en el volcán del Nevado de Toluca, centro de México (4300m s.n.m.), un estanque temporal en el volcán Iztaccíhuatl (3920m s.n.m.) (Alcocer *et al.*, 2004) y uno extinto en el Popocatepetl (5426m s.n.m.) (Loffler, 1972).

La temperatura y la radiación solar se encuentran directamente relacionadas con la inclinación vertical de la Tierra y el posicionamiento latitudinal de los cuerpos de agua lo que genera una estacionalidad más marcada en las zonas templadas (30° a 90°NS y 30° 90°NS) que en las zonas de los trópicos (Thomasson, 1956; Kalff, 2002). Los lagos tropicales reciben una radiación relativamente homogénea y continua, no estacional y de la misma intensidad durante todo el año; su estacionalidad es definida entonces, a partir de una época cálida de "lluvias" en verano alternada con una fría de "secas" en invierno, más que por los cambios en luz y temperatura (Gunkel y Casallas, 2002a).

Debido a la gran altitud en la que se encuentran los lagos tropicales de alta montaña, éstos son afectados por condiciones extremas ya que comparten las condiciones climáticas de los ambientes templados-árticos expresadas por las temperaturas bajas (menos de 0 a 15°C) y la exposición permanente y elevada de radiación solar (producto de una atmósfera reducida en cantidad y más pura), una delgada capa de ozono, humedad escasa, nubosidad, presencia de fuertes vientos, épocas marcadas de sequía y precipitación, bajas concentraciones atmosféricas de oxígeno (Thomasson, 1956; Löffler, 1964).

En los lagos de alta montaña, la radiación solar incide con la misma magnitud que en sitios de baja altitud, sin embargo, ésta es incapaz de elevar la temperatura del agua de forma considerable (Thomasson, 1956) debido a la presencia de fuertes vientos, la reducida presión atmosférica y la transparencia que genera su condición de lagos oligotróficos deficientes de carbono orgánico disuelto y sólidos disueltos. Aumentando la altitud, por encima del nivel del mar, la insolación se incrementa ya que la distancia de los rayos solares a través de la atmósfera se vuelve más corta (Thomasson, 1956).

Existe un interés especial de los limnólogos por el estudio de los productores primarios (p.e., fitoplancton) debido a que éstos constituyen la base de la cadena trófica en los ecosistemas acuáticos. Aún a pesar que los

estudios de biomasa fitoplanctónica en lagos tropicales de alta montaña son reducidos (Löffler, 1964; Payne, 1986), los datos existentes presentan un intervalo amplio de variación. Algunos lagos fríos profundos en regiones alpinas tropicales como el Lago Titicaca en Perú-Bolivia o el Lago San Pablo en Ecuador (Widmer y Richerson, 1975; Gunkel, 2000), presentan cambios estacionales apreciables en la productividad del lago. En contraste, otros lagos como el Lago Mucabaji y la Laguna Negra en Venezuela, presentan intervalos reducidos (Lewis y Weibazahn, 1976).

Los perfiles de la distribución de biomasa fitoplanctónica expresada como clorofila "a" (Clor-a) muestran que en lagos de alta montaña existe una inhibición (metabólica) fotosintética en las capas superficiales causada principalmente por la radiación ultravioleta (RUV) (p.e., Lago Titicaca, Widmer y Richerson, 1975). Estudios realizados en lagos templados de alta montaña en los Alpes suizos, muestran dos patrones de distribución característicos (Sommaruga y García-Pichel (1999) y Sommaruga *et al.*, (1999)): a) *lagos alimentados por glaciares* (turbios), los cuales presentan la concentración máxima de Clor-a cercana a la superficie y b) *lagos no alimentados por glaciares* (transparentes), que presentan la concentración máxima de Clor-a cercana al fondo.

El hundimiento pasivo y la migración activa influyen sobre la distribución vertical del fitoplancton. Estas dependen a su vez de la densidad del agua, la turbulencia, la viscosidad y la estratificación térmica de la columna de agua (Klausmeier y Litchman, 2001). Los tres factores que generalmente determinan la presencia, composición y abundancia de los productores primarios en los lagos son la luz (radiación solar), el viento y la concentración y tipo de nutrientes. La variación y combinación de estos tres factores son importantes para determinar la magnitud y distribución de la comunidad fitoplanctónica en estos ecosistemas de altitud (Melack, 1996).

## Justificación

Aún a pesar que en América (México, Colombia, Venezuela, Costa Rica, Guatemala, Perú y Ecuador), África (Etiopía, Kenia, Uganda, Tangañika) y Asia (Indonesia y Papúa Nueva Guinea) existen numerosos casos de lagos de alta montaña, el número de estudios realizados es reducido en relación con los realizados en Europa, Estados Unidos y Canadá. En estos últimos, se han realizado numerosos programas de cooperación internacional con la finalidad de caracterizar sus recursos hidrológicos y utilizarlos como biodetectores de cambio climático global (CCG).

Por lo anterior resulta importante reconocer las características ecológicas y limnológicas específicas en los lagos "El Sol" y "La Luna" (Nevado de Toluca, México) para poder realizar comparaciones con sus análogos de latitudes templadas y sobre todo, contribuir a que México cuente con una base de datos nacional de los cuerpos acuáticos ubicados en las Regiones Hidrológicas Prioritarias (p.e., *Sensu* CONABIO, Arriaga *et al.*, 1998).

Como en la mayoría de los estudios ecológicos, existen aún muchas interrogantes sin resolver acerca de la dinámica de las comunidades de microorganismos fitoplanctónicos y de qué manera éstas son influenciadas por los múltiples factores físicos y químicos particulares de estos sistemas remotos. De la información disponible, se observa una variabilidad de patrones climáticos y biológicos característicos de estos ecosistemas tropicales a diferencia de los templados (Lewis, 1987; Roldán, 1992).

Paralelamente a lo que se conoce del efecto que tienen los procesos de acidificación de los lagos de alta montaña por precipitación ácida, el papel de éstos en la química y sus efectos en la limnología ha sido ampliamente estudiado (p.e., como factor limitante en la distribución del fitoplancton)

(Barbieri *et al.*, 1999). La acidez que presentaron "El Sol" (5.48) y "La Luna" (4.7) (similar a lo encontrado para ocho lagos ácidos (4.9-6.0), estudiados por MOLAR Water Chemistry Group (1999), se debe en principio al tipo de material volcánico de la cuenca donde se encuentran suelos menos desarrollados y delgados (Zobrist y Drever, 1989); sin embargo, la presencia de lluvias ácidas generadas por actividades antropogénicas incrementan el grado de acidez "natural" (p.e., las exportaciones de materiales nitrogenados ( $N-NO_3$ ) y sulfatos ( $S-SO_4$ ) producto de la mineralización y oxidación de nitrógeno y azufre, respectivamente) como se ha sido descrito en otros estudios realizados en lagos templados de alta montaña en los Alpes Suizos (EMERGE, MOLAR, RECOVER: 2010) (Rogora, 2003; Mosello *et al.*, 1999, 2000; Barrett *et al.*, 2000).

Específicamente en el área de estudio, los vientos predominantes provienen del Noreste, donde se encuentra situada la ciudad de Toluca (2680m s.n.m.) (Carta topográfica INEGI 1:50 000) con 666,596 mil habitantes (Censo Poblacional 2000) donde la industria, textil, manufacturera, derivados del petróleo y carbón, química de plástico y hule, extracción mineral de arena, grava y cantera son las actividades primordiales (INEGI, 2003). La gran actividad industrial y la cantidad de habitantes en la ciudad, pueden ser los factores de impacto importantes en la variación química (depósitos de compuestos nitrogenados y sulfatados) de los lagos "El Sol" y "La Luna" al ser sitios de naturales de depósitos atmosféricos. Es por lo anterior que estos ecosistemas pueden ser utilizados como sistemas de biomonitorio por acidificación.

Es necesario considerar que es de trascendental importancia que se promuevan y actualicen los estudios en ambientes lacustres tropicales de alta montaña que permitan ayudar a proteger y preservar estos recursos hidrológicos. Mientras no se tenga un claro conocimiento de la composición y el funcionamiento de estos ecosistemas remotos, la posibilidad de aprovecharlos y explotarlos de manera sustentable se hace nula.

## Antecedentes

La mayoría de los estudios limnológicos recientes se han realizado en lagos de alta montaña de latitudes templadas y se enfocan principalmente al efecto de la actividad antropogénica sobre estos ecosistemas de altitud (acidificación, aumento de la temperatura por gases invernadero, cambios climáticos, eutroficación) (p.e., Psenner y schmidt, 1992; Battarbee, 1994; Lami *et al.*, 1994; Catalan *et al.*, 1994; Marchetto y Lami, 1994; Marchetto *et al.*, 1994 y 1995; Psenner, 1994; Wotjan y Galos, 1994; Viaroli *et al.*, 1994; Thies, 1994; Barbieri *et al.*, 1999; Kopacek *et al.*, 2001; Tait y Thaler, 2000 incluyendo las respuestas de las comunidades fitoplanctónicas a la acidificación (Findlay y Kasian, 1990).

El Cambio Climático Global (CCG) ha sido exitosamente estudiado en numerosos lagos alpinos de latitudes templadas y polares con la finalidad de utilizarlos como biodetectores del cambio climático global. Con base en esta idea se derivan programas como MOLAR (Mountain Lake Research), EMERGE (European Mountain Lake Ecosystems: Regionalization, diagnostic and socioeconomic Evaluation), AL:PE (Acidification of Mountain Lakes: Paleolimnology and Ecology) y RECOVER: 2010 (Predicting recovery in acidified freshwater by the year 2010 and beyond) (Simona *et al.*, 1999; Barbieri *et al.*, 1999; Pugnetti y Bettinetti, 1999; Psenner *et al.*, 2000; Ferrier *et al.*, 2001; Sommaruga *et al.*, 1999; Somamruga, 2001; Tartari, 1995; Rogora, 2003 y 2004; Becker y Bugmann, 2001; Beniston *et al.*, 1997). En latitudes tropicales, no existe información limnológica para lagos de alta montaña y el papel que juegan en este fenómeno de escala global. Excepción son los trabajos realizados por Barker (2000) en el Lago Rutundu, Monte Kenya (África, 0°N). Es por lo anterior que resulta importante que el presente estudio establezca las bases limnológicas y ecológicas para lograr que los lagos del Nevado de Toluca "El Sol" y "La Luna" puedan insertarse a estos programas mundiales de detección en los trópicos.



Con relación al fitoplancton se han realizado importantes contribuciones en latitudes templadas: a) influencia de la radiación solar (RUV) (Sommaruga y Psenner, 1997; Blumthaler *et al.*, 1992; Cabrera *et al.*, 1997; Vincent *et al.*, 1998; Sommaruga, 1999 y 2000; Laurion *et al.*, 2000), b) estructura de las asociaciones fitoplanctónicas (Pugnetti y Bettinenetti, 1999; Queilmaliños, 2002); c) dinámica estacional y su diversidad (Martínez, 1980; Cruz-Pizarro *et al.*, 1994; Nauwerk, 1994; Prazáková y Fott, 1994; Stockner y Sortreed, 1994; Simona *et al.*, 1999; Hinder *et al.*, 1999) y d) en general, sobre la producción fitoplanctónica (Rodhe, 1962; Pchelaner, 1971).

La dinámica ecológica del fitoplancton en lagos ha sido estudiada por algunos autores entre los cuales se reconocen a Reynolds (1984) y Simona *et al.* (1999) quienes establecen que al ser los lagos ecosistemas heterogéneos (luminosidad, temperatura, nutrientes, hidrodinámica), el fitoplancton se distribuye de manera discontinua en el gradiente vertical. Esta distribución es dependiente de la composición de especies fitoplanctónicas las cuales presentan flotabilidad negativa ( $\rho' > \rho$ ), positiva ( $\rho' < \rho$ ), neutra ( $\rho' \approx \rho$ ) o migración activa en la columna de agua. Hinder *et al.*, (1999) establecen que la distribución heterogénea se debe a la diferencia de condiciones que se presentan en los diferentes estratos del perfil del lago (concentración de nutrientes, luz, estabilidad hidrodinámica, depredación, temperatura, oxígeno disuelto). Los estudios realizados en lagos de alta montaña de los Alpes (p.e., Sommaruga y García-Pichel, 1999; Sommaruga *et al.*, 1999), se han reconocido dos patrones característicos de distribución vertical de Clor-*a* para este tipo de ecosistemas de altitud: a) *los lagos no alimentados por glaciares* (transparentes), que se caracterizan por presentar un máximo de Clor-*a* cerca del fondo; y b) *los lagos alimentados por glaciares* (turbios), que presentan la concentración máxima de Clor-*a* cerca de la superficie.

En cuanto a la variación temporal, Hinder *et al.*, (1999)(Lagos Jori, Alpes suizos), Caballero Miranda (1997)("El Sol" y La Luna", Nevado de Toluca) y Nauwerk (1980)(Lapland, Suiza), han establecido patrones de incrementos

fitoplanctónicos relacionados al aporte de nutrientes producto de la precipitación pluvial en la época cálida húmeda y el deshielo de la primavera. Por otro lado, las variaciones temporales del fitoplancton se encuentran influidas directamente por la presión ecológica que ejercen los aumentos de densidad de organismos depredadores (zooplancton) (Alcocer et al., 2004).

La importancia del estudio limnológicos de estos ecosistemas de altitud en los trópicos ha sido reconocido por Löffler, 1964 y 1972; Widmer y Richerson, 1975; Hecky, 1981; Wurtsbaugh et al., 1985; Koste y Bottger, 1989; Banderas, 1991, 1997 y datos no publicados; Kinzie et al., 1998; Muragavel y Panadian, 2000; Barker et al., 2000; Gunkel y Casallas, 2002a y b; Gunkel 2000; Kiersch et al., 2003; Alcocer et al., 2004 y 1980, entre otros.

Sobre el fitoplancton de los lagos "El Sol" y "La Luna" del volcán Nevado de Toluca se han realizado estudios acerca de su biología como es el caso de Caballero-Miranda (1996) quien trabajó con diatomeas; Alcocer et al. (2004) con biomasa fitoplanctónica; Banderas y González-Villela (2000), hidroquímica del lago y distribución de biomasa fitoplanctónica temporal; Banderas (1991, 1997 y datos no publicados), aspectos limnológicos y descripción de la comunidad de algas bentónicas en el lago "El Sol"; González-Villela (2000) quien realizó modelos dinámicos de producción primaria; Fott et al. (1994) y Sarma et al. (1996), descripción de la composición de especies de organismos zooplanctónicos (rotíferos).

## Objetivos

### **General**

El objetivo del presente estudio es analizar el patrón de distribución vertical en la columna de agua y la variación temporal de la biomasa fitoplanctónica (expresada a través de la concentración de Clorofila-*a*) de dos lagos de alta montaña en el trópico: "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.

### **Particulares**

- Analizar la relación entre la distribución de la biomasa fitoplanctónica [Clor-*a*] y la capa de mezcla ( $Z_{mix}$ ) determinada a través de los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto.
- Analizar la relación entre la distribución de la biomasa fitoplanctónica [Clor-*a*] y la zona eufótica ( $Z_{eu}$ ) determinada a través de los perfiles de radiación fotosintéticamente activa (PAR).
- Analizar la relación entre la distribución de la biomasa fitoplanctónica [Clor-*a*] y la concentración de nutrientes ( $N-NO_3$ ,  $N-NO_2$ ,  $N-NH_4$ ,  $NID$ ,  $Si-SiO_4$  y  $P-PO_4$ ).
- Comparar los hallazgos limnológicos encontrados en "El Sol" y "La Luna" con otros lagos tropicales y templados de alta montaña reportados en la literatura.

## Hipótesis

### **H<sub>1</sub> Distribución de la biomasa fitoplanctónica en el perfil de la columna de agua**

Si se considera que el factor de la radiación solar y los nutrientes son condiciones determinantes en la distribución vertical del fitoplancton entonces como lo establecen Sommaruga y García-Pichel (1999), Sommaruga *et al.* (1999), Simona *et al.* (1999) y Hinder *et al.* (1999) se espera que los lagos tropicales de alta montaña del Nevado de Toluca "El Sol" y "La Luna" (no alimentados por glaciares), muestren una concentración mayor de biomasa fitoplanctónica cercano al fondo.

### **H<sub>2</sub> Variación temporal de la biomasa fitoplanctónica**

Si los lagos de alta montaña reciben aportes de nutrientes principalmente de su cuenca de drenaje por el arrastre que produce la precipitación pluvial, el deshielo y el transporte atmosférico y éstos son factores determinantes en el crecimiento de la comunidad algal, entonces como lo establecen Nauwerk (1980), Caballero-Miranda (1996), Hinder *et al.*, (1999) durante la época cálida y húmeda (mayo-octubre) se espera encontrar un incremento en la biomasa fitoplanctónica en la época cálida húmeda de verano y el inicio de la primavera.

### Área de Estudio

"El Sol" y "La Luna" son dos lagos cráter tropicales de alta montaña estáticos que se encuentran dentro de la Región Hidrológica Prioritaria "Lagos Cráter del Nevado de Toluca", México (*Sensu* CONABIO Arriaga *et al.*, 1998), a 19°06' N, 99°45' O y 4,300m s.n.m., aproximadamente 200m por encima de la línea de crecimiento arbóreo (*Fig. 1*).

El volcán Nevado de Toluca se encuentra en la Sierra Madre Transversal (SMT) del Eje Neovolcánico Mexicano que ha permanecido sin actividad desde la última glaciación del Pleistoceno tardío (13, 500 años); es un estratovolcán andesítico-dacítico (Armienta *et al.*, 2000). El cráter presenta una elongación de este a oeste de 1 a 1.5km en forma de herradura abriéndose hacia el este. En el centro del cráter se presenta un domo central "El Ombligo" que taponaa la chimenea principal del volcán. Los avances glaciales ocurrieron durante el Holoceno (100, 000 años) lo cual afectó de gran manera la morfología actual del volcán (Heine, 1988 en Armienta *et al.*, 2000). El cráter forma una cuenca cerrada endorréica la cual está formada de roca sólida cubierta de grava, arena y lodo provenientes de la misma roca volcánica madre formando suelos tipo Regosol y Andosol (Alcocer, 1980).

El clima de la zona se caracteriza por ser frío a semifrío, húmedo con una temperatura anual que oscila entre -2°C en invierno y 5°C en verano. Presenta una precipitación total anual de 1,243.5mm variando de 175mm en diciembre a 270mm en julio con una evaporación promedio anual de 990mm (García, 1988). El intervalo de temperatura reducido que ambos lagos presentan es similar al de las zonas húmedas frías de alta montaña de los Andes denominadas "Páramos" (Loffler, 1964).

La vegetación característica que circunda los lagos es de tipo zacatonal alpino, compuesta por algunas especies de musgos, pastos, compuestas y líquenes (Rzedowski, 1981).

"El Sol" y "La Luna" son lagos de origen volcánico y su edad se remonta a épocas posteriores a la última glaciación del Pleistoceno (1.4 millones de años). Son dos lagos perennemente astáticos, es decir, el nivel de sus aguas aumenta y disminuye dependiendo del balance entre la precipitación y la evaporación, sin embargo éstos nunca llegan a secarse (Alcocer *et al.*, 2004). Los aportes hídricos más importantes son debidos a las lluvias en la época cálida húmeda de verano, la nieve en la época fría seca de invierno y el agua de deshielo a principios de la primavera; las pérdidas son debidas a la evaporación e infiltración que han permitido la formación de manantiales en la base del volcán.

La profundidad máxima del lago "El Sol" es de 15m (profundidad promedio 6m), con una área de 237, 321m<sup>2</sup> (largo 795m, ancho 482m); presenta forma de herradura que se abre hacia el Este. El lago "La Luna" presenta una profundidad máxima de 10m (profundidad promedio de 5m) con un área de 31, 083m<sup>2</sup> (largo 227m, ancho 209m) (Alcocer *et al.*, 2004) y presenta una forma circular. Los lagos son de aguas frías (8.5°C), bien oxigenadas (8mg L<sup>-1</sup>), transparentes ( $Z_{ds} > 6m$ ), oligotróficas a ultra-oligotróficas ( $Clor-a < 2.5\mu g L^{-1}$ ), pH ácido (4 a 7), conductividad baja (13 a 18 $\mu S cm^{-1}$ ) y con un contenido reducido de materia orgánica disuelta (Caballero-Miranda, 1996; Sarma *et al.*, 1996).

De acuerdo a Sedov *et al.*, (2003), la composición mineralógica de las fracciones de arena fina de éstos lagos muestran una asociación específica de los minerales, típicamente tefra-andesíticos. Plagioclasas intermedias, vidrio volcánico, piroxenos y anfíbolos, los cuales se encuentran asociados a micas (biotitas), minerales opacos, sílice, fragmentos de roca y cuarzos.

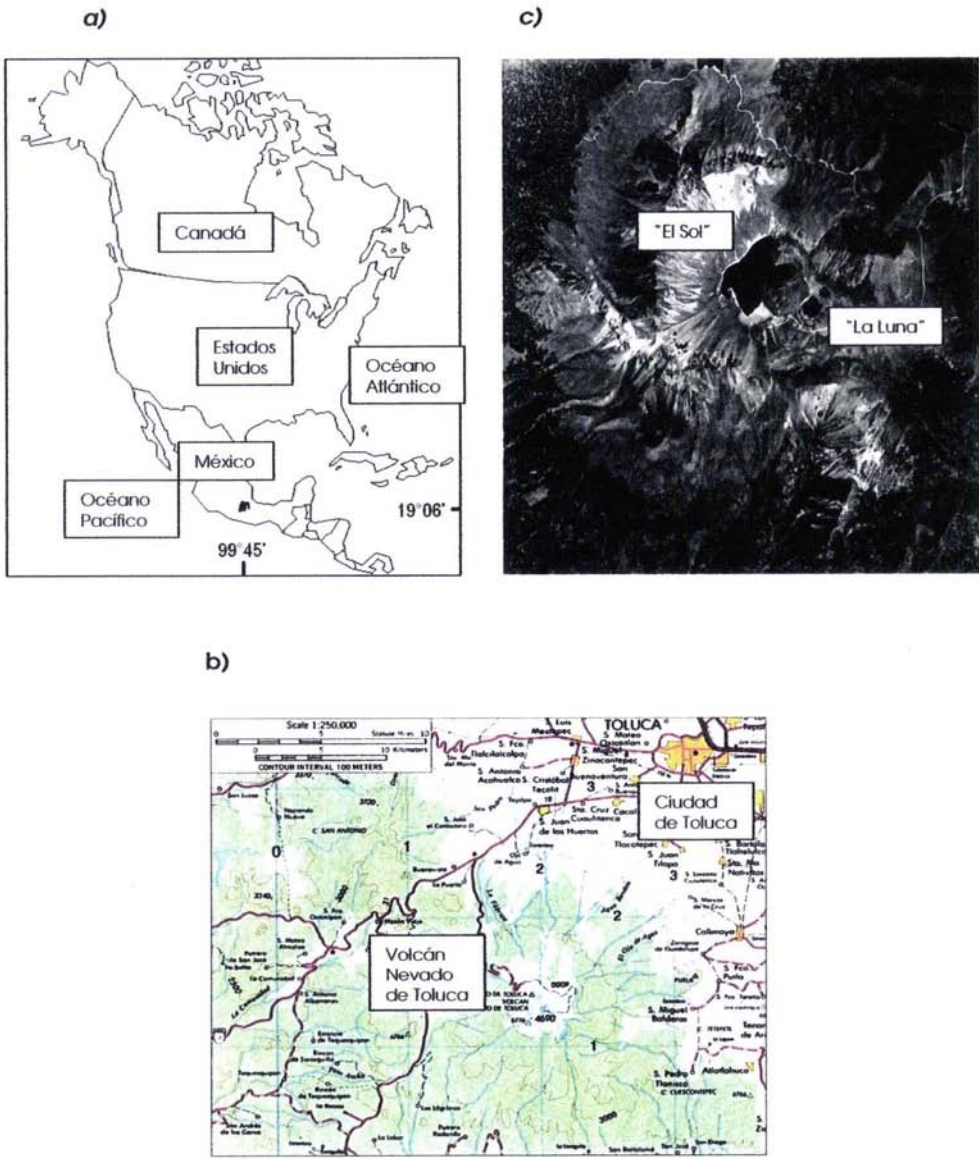


Figura 1. a) Localización geográfica mundial, b) Nacional y c) en el volcán del Nevado de Toluca de los lagos "El Sol" y "La Luna".

## Metodología

### I. Trabajo de campo

Se realizaron trece muestreos con frecuencia aproximadamente mensual a lo largo del período de un año (marzo I del 2000 a marzo II del 2001) en dos estaciones limnéticas: una en "El Sol" (9:00 a 11:00hrs.) y otra en "La Luna" (13:00 a 14:00hrs.). Ambas estaciones se ubicaron en la porción central y más profunda de los lagos. Durante el estudio, la profundidad de "El Sol" varió de 10 a 12m mientras que en "La Luna" varió de 7 a 9m.

#### *Física lacustre*

Se realizaron mediciones discretas a cada metro de profundidad de temperatura ( $T$  en  $^{\circ}\text{C}$ ), oxígeno disuelto ( $OD$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ), conductividad eléctrica del agua estandarizada a  $25^{\circ}\text{C}$  de temperatura ( $K_{25}$  en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  que es la capacidad del líquido para conducir la corriente eléctrica, expresada como la corriente eléctrica por unidad de área dividida por la diferencia de potencial por unidad de longitud) y pH. Éstos se midieron con ayuda de un sistema de monitoreo de calidad de agua Hydrolab DS4/SVR4; mediante una sonda multiparamétrica marca Hydrolab® Modelo Datasonde 4 (DS4) unido a una caja controladora modelo Surveyor 4 (SVR4). Los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto se utilizaron para estimar la capa de mezcla ( $Z_{\text{mix}}$  que es la zona que separa regiones ocupadas por dos fluidos física o químicamente distintos a través de la cual existe un gradiente en las propiedades del fluido mezclado) (Biospherical Instruments, 1996).

Asimismo, se registró el perfil vertical de la radiación fotosintéticamente activa ( $PAR$  por sus siglas en inglés; aproximadamente de 400 a 700nm;  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (discretización=1 segundo), con ayuda de un sensor de irradiancia escalar instalado en un perfilómetro marca Biospherical modelo PNF-300. Para medir el



clima de luz en superficie (SPAR), se utilizó un sensor de referencia escalar cuántica marca Biospherical modelo QSR-240. Los perfiles de PAR se utilizaron para estimar la profundidad de la zona o capa eufótica (p.e.,  $Z_{eu}$ , 1% del PAR superficial).

Para evaluar la transparencia, se utilizó el disco de Secchi (m) y la escala de Forel-Ule para el color de los lagos (unidades arbitrarias cualitativas del azul (I) al café (XX)).

#### *Química lacustre (nutrimentos)*

Se obtuvieron muestras de agua a tres profundidades (un metro por debajo de la superficie, un metro por encima del fondo y en el estrato medio de profundidad) utilizando una botella muestreadora tipo Niskin de 1.5 litros de capacidad. Las muestras de agua fueron filtradas *in situ* a través de un filtro de membrana de 47mm marca Millipore con 0.45 $\mu$ m de apertura de poro. Posteriormente, estas fueron colocadas en dos viales de plástico de 30ml de capacidad a los cuales se adicionaron un par de gotas de cloroformo para nulficar junto con la congelación, la actividad bacteriana de la muestra hasta su posterior análisis en el laboratorio.

#### *Biomasa fitoplanctónica (Clor-a)*

La concentración de clorofila "a" (Clor-a) es usualmente utilizada como parámetro indirecto referente de la cantidad de biomasa fitoplanctónica presentes en un cuerpo acuático. Sommaruga *et al.* (1999) encontraron que la concentración de clorofila y las estimaciones directas de biomasa en los lagos de alta montaña de los Alpes austriacos estaban fuertemente correlacionadas ( $R=0.938$ ).

Para estimar la concentración y distribución en la columna de agua de la biomasa fitoplanctónica expresada como Clor-a ( $\mu$ g L<sup>-1</sup>), se registraron cuatro perfiles de fluorescencia natural *in vivo* mediante un perfilómetro de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300 (discretización=1 seg).

## II. Trabajo de Laboratorio

### *Física lacustre*

Para determinar la atenuación lumínica de la columna de agua, se estimó el coeficiente de extinción a partir de la siguiente relación (Pool y Atkins, 2000 en Kalff, 2002):

$$K_d = 1.7 / S_{ds}$$

Donde  $K_d$  = coeficiente de extinción lumínica ( $m^{-1}$ )

$S_{ds}$  = transparencia del disco de Secchi (m)

### *Química lacustre (nutrimentos)*

Para la realización del análisis de nutrimentos [amonio ( $N-NH_4$ ), nitritos ( $N-NO_2$ ), nitratos ( $N-NO_3$ ), nitrógeno inorgánico disuelto (NID), ortofosfatos ( $P-PO_4$ ) y silicatos ( $Si-SiO_2$ ) (en  $\mu mol L^{-1}$ ), se siguió la metodología estándar de Strickland y Parsons (1972) adaptados para su uso en un sistema autoanalizador de flujo segmentado (SFA) Skalar Sanplus (FØyn *et al.*, 1981), en el cual fueron instalados los circuitos analíticos correspondientes a las técnicas estándar de más alta resolución para aguas naturales (Grasshof, 1983).

### *Concentración de Clor-a*

La concentración de Clor-a ( $\mu g L^{-1}$ ) se calculó mediante el flujo de fluorescencia natural,  $F_f$ , y la radiación incidente (PAR) las cuales se encuentran fuertemente correlacionadas (Chamberlain *et al.*, 1990) de acuerdo al algoritmo:

$$\text{Clorofila-}a = F_f / \rho_{ac} (PAR) * \Phi_f * E_0(PAR)$$

Donde

$F_f$  = fluorescencia natural

$E_0$  (PAR)= radiación incidente

$^{\circ}ac$ (PAR)= coeficiente de absorción específica (absorción normalizada a la concentración de clorofila)

$\Phi_f$ = campo de fluorescencia de quantum

Estos valores fueron tratados como constantes en el software para PNF-300 con valores de  $0.04m^2mg^{-1}$  y  $0.045mE$  fluorecidos por mE y absorbidos, respectivamente.

La radiación escalar de PAR,  $E_0$  (PAR), es definida como:

$$E_0 (PAR) = \int_{400}^{700} L(\theta, \Phi) d\omega d\lambda$$

Donde

L= radiación

W=ángulo de incidencia del colector (todos a  $4\pi$  para escalar)

$\theta$  y  $\Phi$ = ángulos zenit y azimutal del flujo de radiación solar.

### III.Trabajo de Escritorio

#### *Meteorología*

La estación meteorológica "Nevado de Toluca" se encuentra situada a un costado del volcán del mismo nombre a 4140m s.n.m. ( $19^{\circ}07'N$  y  $99^{\circ}45' E$ ) (García, 1988). Como antecedente climatológico, se utilizaron variables climatológicas registradas en el Sistema Meteorológico Nacional desde 1964 al 2000. Las variables medidas consideradas fueron precipitación total mensual

(mm), evaporación (mm), días de granizo (número de días) y temperatura (°C). Estas fueron correlacionadas con los parámetros estudiados en el presente estudio (nutrimentos, pH, conductividad, temperatura y Clor-a).

### *Física lacustre*

A partir de los diagramas tiempo-profundidad de las isopletras de oxígeno, temperatura y PAR, se estimaron  $Z_{eu}$  y  $Z_{mix}$  y se relacionaron con la distribución y variación de la concentración de la Clor-a.

### *Concentración integrada de Clor-a*

La concentración de Clor-a fue expresada por unidad de área ( $\text{mg m}^{-2}$ ) ya que el fitoplancton raramente se distribuye de manera homogénea (Payne, 1986). La integración de los valores de las concentraciones de Clor-a a lo largo de la columna de agua se llevó a cabo midiendo el área bajo la curva de distribución de Clor-a en la vertical de acuerdo al método propuesto por Payne (1986); de esta forma se obtuvo el valor integrado de clorofila por unidad de área (Clor-a en  $\text{mg m}^{-2}$ )

### *Análisis de la información*

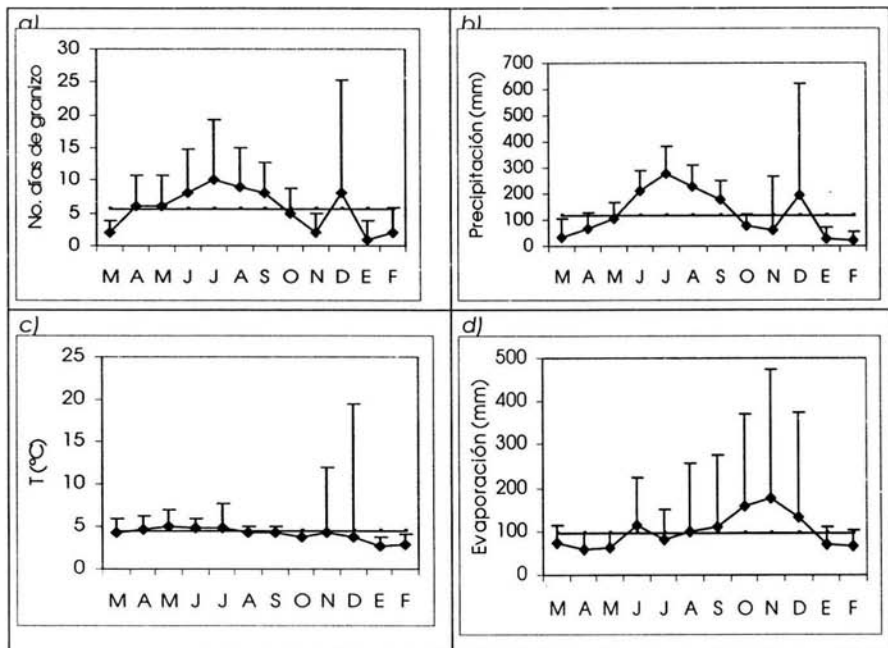
El análisis de la información se realizó utilizando el paquete estadístico *Statistica* (2000). Se realizó una matriz de correlación múltiple entre todas las variables (PAR, SPAR, T°C, OD, pH,  $K_{25}$ , nutrimentos (N- $\text{NO}_3$ , N- $\text{NO}_2$ , N- $\text{NH}_4$ , NID, P- $\text{PO}_4$  y Si- $\text{SiO}_2$ , color,  $Z_{ds}$ ) para determinar las que mayor influencia tuvieron en los cambios de la biomasa fitoplanctónica (Clor-a por volumen ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) e integrada por unidad de área ( $\text{mg m}^{-2}$ ) (Strickland y Parsons, 1972). A excepción del pH, los datos físicos y químicos y la concentración de Clor-a, fueron transformados utilizando  $\log_{(n+1)}$  para eliminar las diferencias derivadas de utilizar diferentes unidades y normalizar su distribución (Green, 1975).

Los resultados serán presentados como: a) *Meteorología*, b) *Física lacustre* ( $Z_{ds}$ , color, extinción lumínica, Clima de luz (SPAR),  $Z_{eu}$  (PAR),  $T^{\circ}C$ , OD, pH,  $K_{2s}$ , c) *Química lacustre* (nutrimentos)  $N-NH_4$ ,  $N-NO_2$ ,  $N-NO_3$ , NID,  $P-PO_4$  y  $Si-SiO_2$ ) y d) *Distribución vertical y variación temporal de la concentración de Clor-a por volúmen y Clor-a integrada*).

## Resultados

## Meteorología

A partir de los datos meteorológicos proporcionados por el SMN (periodo 1964 al 2000) se obtuvo que la temperatura ambiente promedio anual fue de  $4.5 \pm 1.151^{\circ}\text{C}$  con una máxima en julio de  $4.99^{\circ}\text{C}$  y una mínima en enero de  $2.6^{\circ}\text{C}$ . La precipitación promedio anual fue de  $118.71 \pm 164.76\text{mm}$ , la máxima se presentó en julio con  $249\text{mm}$  y la mínima en febrero con  $24\text{mm}$ . Los días con granizo presentaron un promedio anual de  $5.89 \pm 3.07$  días, la máxima se presentó en julio con  $9.95$  días y la mínima en enero con  $1.4$  días. La evaporación promedio anual fue de  $94.5 \pm 135.88\text{mm}$  con una máxima en noviembre de  $178.52\text{mm}$  y una mínima en abril de  $60\text{mm}$  (Fig. 2).



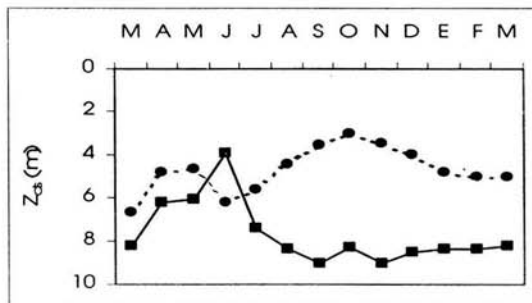
**Figura 2.** Promedio de las variables meteorológicas tomadas en la estación meteorológica "Nevado de Toluca" (1964 a 2000) (Datos proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN)).

**Profundidad del disco de Secchi ( $Z_{ds}$ )**

La profundidad del disco de Secchi presentó un intervalo anual en el lago "El Sol" de 3.03 a 6.7m ( $4.7 \pm 1.01$ m) mientras que en "La Luna" de 6.1 a 9m ( $7.7 \pm 1.4$ m). En "El Sol" se registró la máxima de transparencia en marzo I con 6.7m con una profundidad máxima del lago de 7.4m ( $Z_{max}=7.4$ m) y la mínima en septiembre de 3.03m cuando el lago presentó una profundidad máxima de 7m. "La Luna" presentó la máxima transparencia en noviembre de 9m ( $Z_{max}=9.6$ m) y la mínima en junio de 6.1m ( $Z_{max}=10$ m) (Tabla 1). Existe una tendencia en "La Luna" de aumentar la transparencia a partir de julio mientras que sucede lo contrario en El Sol, donde se observa que tiende a disminuir a partir del mismo mes (Fig. 3).

$Z_{ds}$ (m)	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	4.7	7.7
D.E.	1.0	1.4
Máx.	6.7 (mar. I)	9 (nov. sep.)
Mín.	3.0 (oct.)	6.1 (jun.)

**Tabla 1.** Profundidad del disco de Secchi (m) en "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar, n=13), Nevado Toluca, México.



**Figura 3.** Variación temporal de la transparencia de disco de Secchi ( $Z_{ds}$ ) en los lagos "El Sol" ● y "La Luna" ■ Nevado Toluca, México.

## COLOR

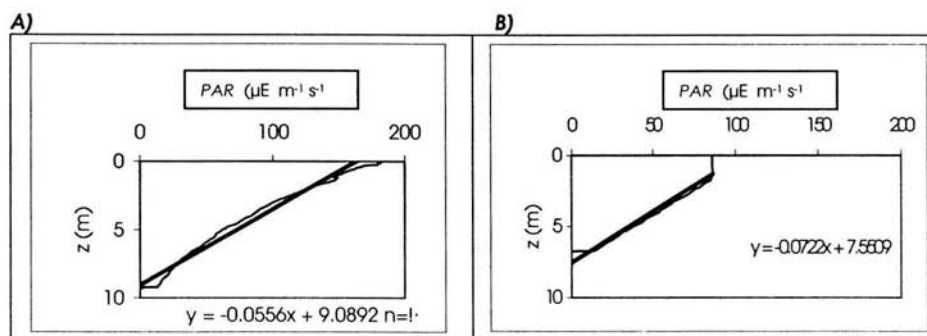
El color del agua en el lago "El Sol" varió a lo largo de todo el año del azul (III) al verde (VIII) de la escala de Forel-Ule, sin embargo el color que predominó fue el color VII (verde), registrado en la primavera y el verano (abril, mayo, agosto, septiembre) mientras que el azul se presentó en marzo I y II.

En "La Luna" se observó que la mayor parte del año (octubre-marzo II, abril y mayo) predominó el color IV (azul) y de junio a agosto se tornó más verde (V).

## EXTINCIÓN LUMÍNICA

Debido al carácter de lagos oligotróficos a ultra-oligotróficos, la tendencia general del coeficiente de extinción en "El Sol" ( $0.225\text{m}^{-1}$ ) (con una relación de  $y = -0.0556(x) + 9.0892$ ), en marzo I (Fig. 4A) y en "La Luna" ( $0.361\text{m}^{-1}$ ) (con una relación de  $y = -0.0722(x) + 7.5509$ , marzo I) (Fig. 4B) fue considerablemente reducido.

En estudios realizados en 26 lagos en los Alpes y los Pirineos, el coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) (filtrados con un radiómetro OUV-500, Biospherical instrument, CA) varió de  $0.17$  a  $2.5\text{m}^{-1}$  con un promedio de  $0.55\text{m}^{-1}$ . "El Sol" y "La Luna" presentaron valores en la porción más baja de este intervalo ( $0.225\text{m}^{-1}$  y  $0.361\text{m}^{-1}$ , respectivamente).



**Figura 4.** Extinción lumínica en la columna de agua en los lagos **A)** "EL Sol" y **B)** "La Luna" ( $n=13$ ) Nevado Toluca, México.



### Clima de luz (SPAR)

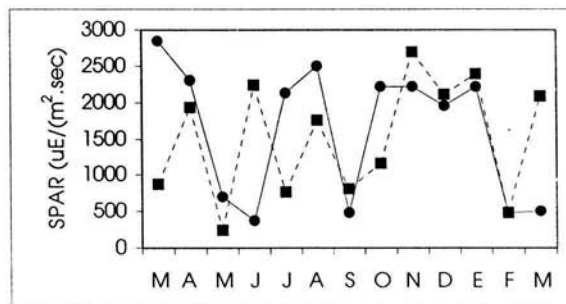
En el lago "El Sol" el promedio anual de la SPAR fue de  $1610 \pm 929 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . La máxima de la SPAR se presentó en marzo I con  $2851 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y la mínima en junio con  $379 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabla 2).

El promedio anual de SPAR en "La Luna" fue de  $1501 \pm 806 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Se observó la máxima en noviembre de  $2689 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y la mínima en mayo con  $248 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabla 2).

Existe una gran variabilidad en el clima de luz tanto en "El Sol" como en "La Luna" (57.70% y 53.89%, respectivamente)(Fig. 5). Es necesario un registro continuo en tiempo para detectar si existen tendencias en esta variable.

SPAR ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	1610	1501
D.E.	929	806
Máx.	2851 (mar. I)	2689 (nov.)
Mín.	379 (jun.)	248 (may.)

**Tabla 2.** Clima de luz (SPAR  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar, n=13), Nevado de Toluca, México.



**Figura 5.** Variación temporal del clima de luz (SPAR  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en ● Sol y La Luna, Nevado de Toluca, México.

### Profundidad del disco de Secchi ( $Z_{sd}$ )

El total de la columna de agua en ambos lagos es considerada como zona eufótica ( $\% < PAR > 1\%$ ) debido a que la PAR en el fondo fue igual o superior al 7% de la PAR superficial. Este comportamiento se atribuye a su carácter de lagos cristalinos oligotróficos a ultra-oligotróficos (Vollenweider y Kerekes (1982).

El promedio anual de la PAR en toda la columna de agua en el lago "El Sol" fue de  $406 \pm 235 \mu E m^{-2} s^{-1}$ . La máxima en el fondo se registró en marzo I y la mínima en septiembre, posiblemente relacionado con el cambio de color azul (IV) a verde (V). Existe una disminución vertical de la PAR en "El Sol" encontrándose en el fondo entre los 7-20% de la PAR superficial (Fig. 6A).

En "La Luna" se registró un promedio anual de  $432 \pm 251 \mu E m^{-2} s^{-1}$ . La máxima en el fondo se presentó en abril-mayo y la mínima en junio y agosto, lo cual al igual que en "El Sol" posiblemente está relacionado con los cambios de color, de azul a más verde (V) en junio y agosto. En el fondo se presentó un rango de 15-60% de la PAR superficial (Fig. 6B).

La diferencia en luminosidad posiblemente se vió afectada por la diferencia de horario en la toma de muestras en cada lago : "El Sol" (9:00 a 11:00 hrs) y "La Luna" (13:00 a 14:00hrs.). Esta diferencia se debió a la capacidad de instrumentación y personal disponible.

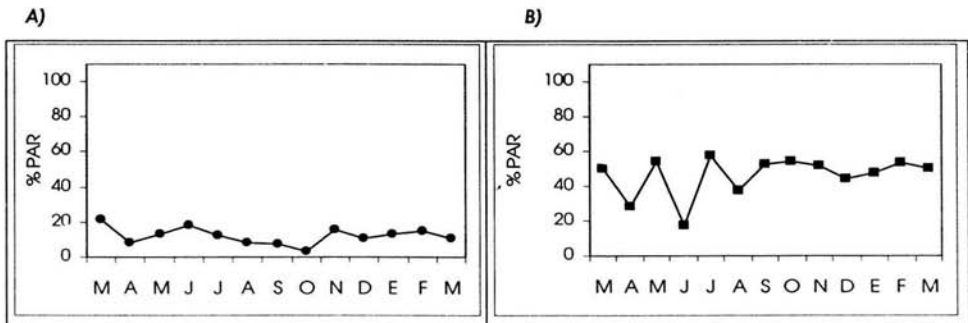


Figura 6. Variación del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en tiempo en el fondo de los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

## **Temperatura**

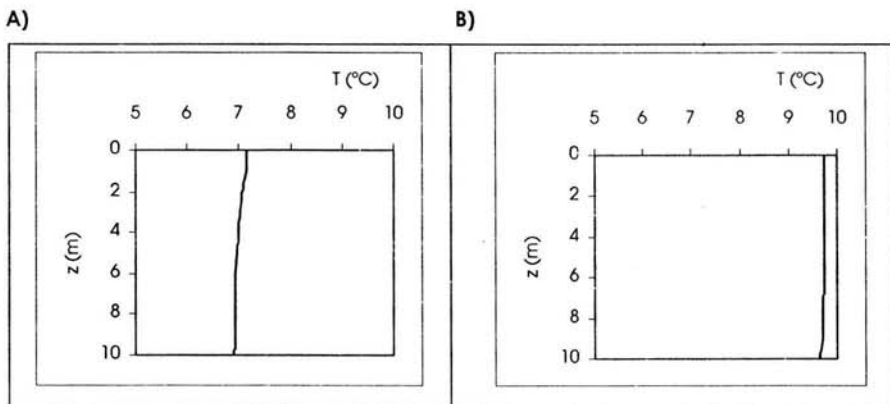
En el lago "El Sol" la temperatura promedio anual del agua fue de  $8.5 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$  registrándose la máxima en septiembre con  $10.82^{\circ}\text{C}$  y la mínima en enero con  $5.24^{\circ}\text{C}$  (Fig. 9A y Tabla 3). La diferencia máxima entre la superficie y el fondo se encontró en marzo II con  $0.63^{\circ}\text{C}$  y la mínima en mayo con  $0.04^{\circ}\text{C}$  (Fig. 7A, Tabla 3).

La temperatura promedio anual del agua en "La Luna" fue de  $8.5 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ , presentándose la máxima en julio con  $10.84^{\circ}\text{C}$  y la mínima en enero con  $5.76^{\circ}\text{C}$  (Fig. 9B y Tabla 3). La diferencia máxima entre la superficie y el fondo se registró en abril con  $2.71^{\circ}\text{C}$  y la mínima en diciembre con  $0.02^{\circ}\text{C}$  (Fig. 7B, Tabla 3).

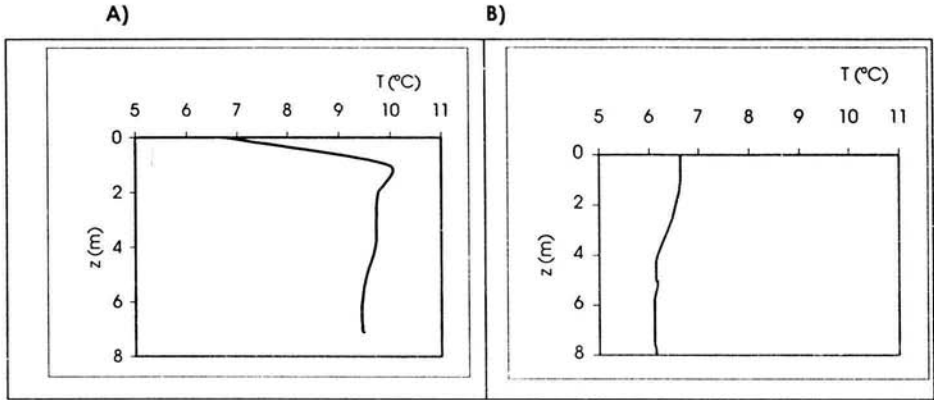
En "El Sol" se observó que producto de una continua y eficiente mezcla del cuerpo de agua y a la someridad del lago no existe estratificación ni termoclina (Fig. 8A y B). En La Luna durante los meses marzo I y II, abril, julio, agosto, septiembre, octubre, enero y febrero se presentó el desarrollo de una estratificación muy débil que en promedio presentó una diferencia entre la superficie y el fondo de  $1.28^{\circ}\text{C}$ . (Fig. 8A y B). Esta diferencia puede deberse a la diferencia en el horario de muestreo el cual fue dos horas más tarde en este lago (13:00 a 14:00hrs). Sin embargo, esta diferencia es despreciable ya que ésta no es suficiente para producir el desarrollo de una termoclina, por lo que se considera a ambos lagos "polimícticos cálidos continuos".

T (°C)	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	8.55	8.57
D.E.	1.95	1.73
Máx.	10.82(sep.)	10.84 (jul.)
Mín.	5.24 (ene.)	5.76 (ene.)
$\Delta T^{\circ}\text{C}$ máx.	0.63 (mar.)	2.71 (abr.)
$\Delta T^{\circ}\text{C}$ mín.	0.04 (may.)	0.02 (dic.)

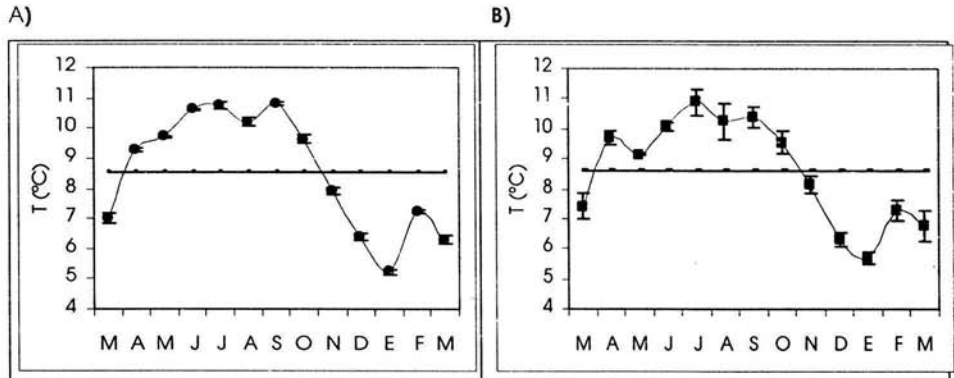
**Tabla 3.** Temperatura del agua en los lagos "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar,  $\Delta$ máx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo,  $\Delta$ mín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo, n=13), Nevado de Toluca, México.



**Figura 7.** Comparación de la diferencia vertical máxima (marzo 11 **A**) y mínima (mayo **B**) de temperatura en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.

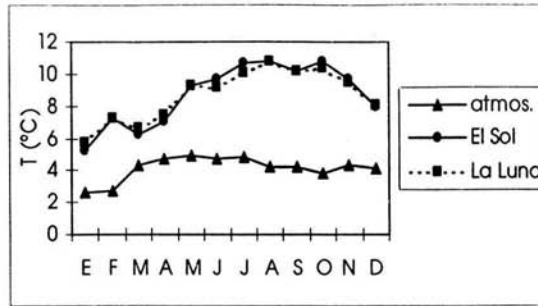


**Figura 8.** Comparación de la diferencia vertical máxima abril A) y mínima diciembre B) vertical de temperatura en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.



**Figura 9.** Variación de la temperatura del agua en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

Con base en los datos obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional del año 1964 al 2000, se encontró que la temperatura promedio mensual máxima atmosférica se presentó en mayo con  $12.1^{\circ}\text{C}$  mientras que la mínima en noviembre con  $4.23^{\circ}\text{C}$  (Fig. 10). Estos datos son coincidentes con los datos reportados para el agua de los lagos en el presente estudio de máximos y mínimos en primavera-verano y el invierno, respectivamente (Fig. 9A y B).



**Figura 10.** Variación de la temperatura del agua en los lagos "El Sol" y "La Luna" (2000 a 2001) y atmosférica en el Nevado de Toluca (1964 a 2000) (Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

### Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto se encontró cercano a la saturación la mayor parte del año en ambos lagos. El promedio anual de OD en El Sol fue de  $6.819 \pm 0.67 \text{mg L}^{-1}$  (94.831% de saturación), con una concentración máxima en noviembre  $7.736 \text{mg L}^{-1}$  (107.5%) y una mínima en junio de  $5.764 \text{mg L}^{-1}$  (84.07%)(Figs. 11A y B, Tabla 4). Se observó que a partir de septiembre, las concentraciones de OD comenzaron a aumentar hasta alcanzar la máxima en noviembre y manteniéndose hasta marzo II por arriba de los  $6 \text{mg L}^{-1}$  (88.49%)(Fig. 11A). La máxima diferencia vertical se presentó en agosto de  $0.31 \text{mg L}^{-1}$  (4.52%) y la mínima en enero con  $0.03 \text{mg L}^{-1}$  (0.38%)(Fig 12A).

La Luna presentó un promedio anual  $6.73 \pm 0.84 \text{mg L}^{-1}$  (94.831% de saturación), con una concentración máxima en marzo II de  $8.68 \text{mg L}^{-1}$  (115.62%) y una mínima en septiembre con  $5.89 \text{mg L}^{-1}$  (86.111%)(Fig. 11A y B; Tabla 4). Se observó que a partir de octubre, las concentraciones de OD comenzaron a aumentar hasta alcanzar la máxima en marzo II. Se observó un aumento considerable en diciembre (Fig. 11A y B). Las temperaturas bajas registradas durante enero con  $5.76^\circ\text{C}$  y el resto del invierno coincidieron con las concentraciones máximas de OD (marzo II con  $8.68 \text{mg L}^{-1}$ ) mientras que las temperaturas máximas registradas en julio con  $10.84^\circ\text{C}$  se correlacionaron negativamente con las concentraciones mínimas de OD en septiembre con

5.898mg L<sup>-1</sup>. La diferencia máxima en los valores en la vertical de la columna de agua se registró en agosto con 0.76mg L<sup>-1</sup> (10.97%) y la mínima en marzo I y abril con 0.01mg L<sup>-1</sup> (0.136%)(Fig. 13A y B).

OD (mg L <sup>-1</sup> )	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	6.89 (94.83%)	6.73 (93.87%)
D.E.	0.67	0.84
Máx.	7.74 (107.5%)(nov.)	8.68 (115.62%)(mar II.)
Mín.	5.76(84.07%)(jun.)	5.89 (86.11%)(sep.)
ΔOD máx.	0.31(4.52%)(ago.)	0.76 (10.97%) (ago.)
ΔOD mín.	0.03(0.38%)(ene.)	0.01 (0.13%)(mar I. abr.)

**Tabla 4.** Concentración de OD en "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar, Δmáx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo, Δmín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo, n=13), Nevado de Toluca, México.

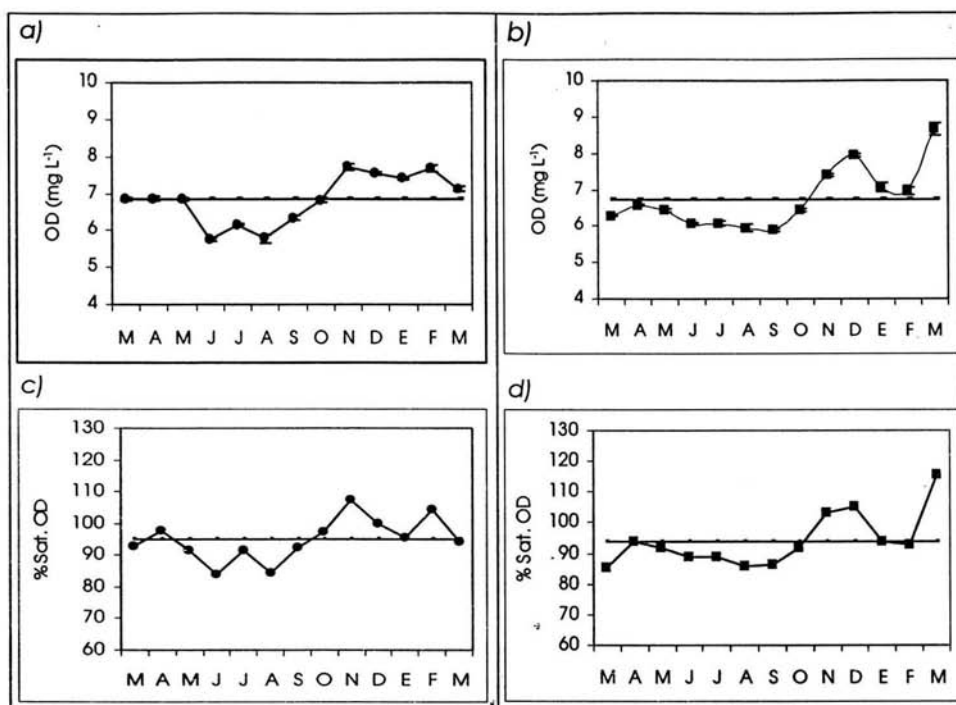


Figura 11. Variación temporal de OD (a y b) (mg L<sup>-1</sup>) y porcentaje de saturación (c y d) en el lago A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

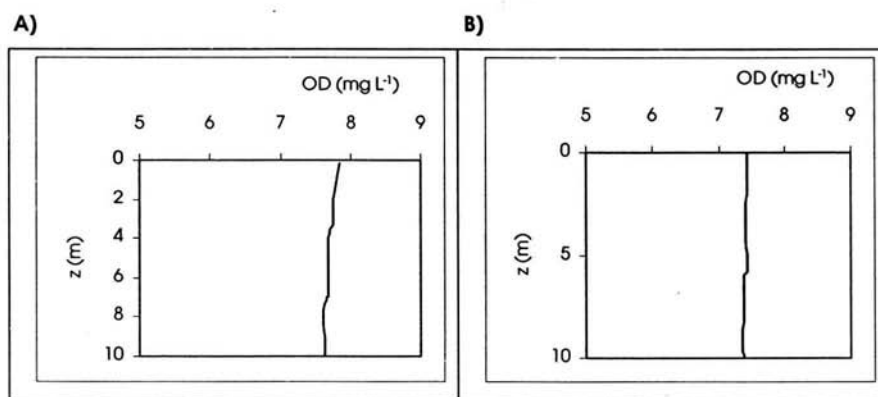
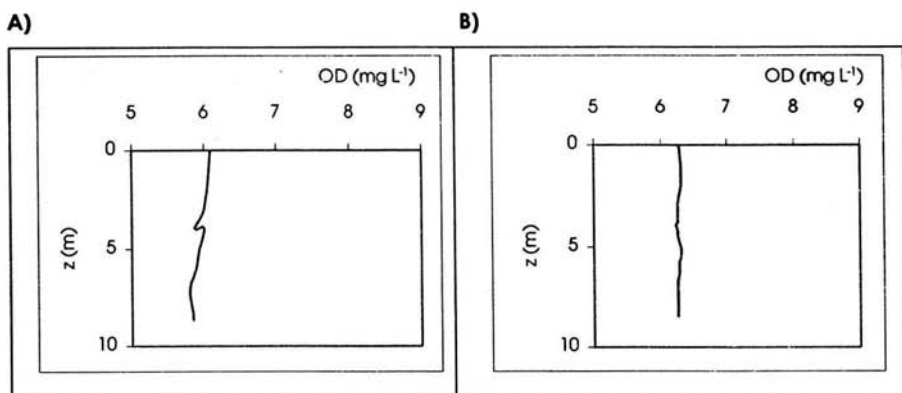


Figura 12. Comparación de la diferencia vertical máxima (junio A) y mínima (enero B) de OD (mg L<sup>-1</sup>) en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.





**Figura 13.** Comparación de la diferencia vertical máxima (septiembre **A**) y mínima (marzo y abril **B**) de OD en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.

## pH

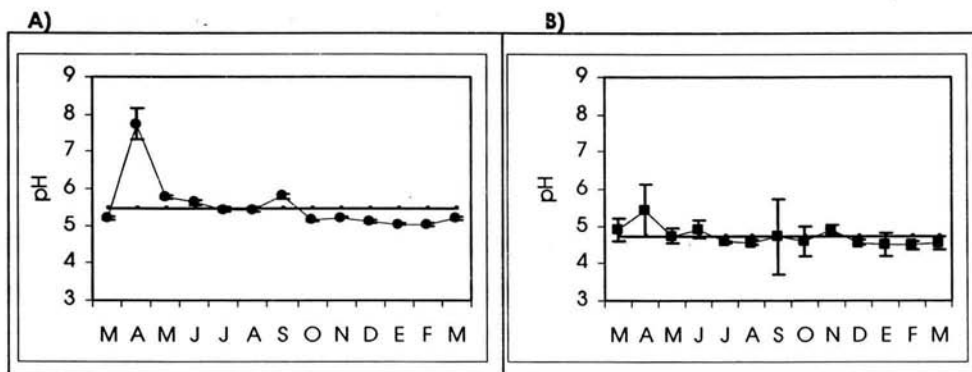
El lago "El Sol" presentó un promedio anual de *pH* de  $5.48 \pm 0.373$ , con un máximo en mayo de 6.48 y un mínimo en marzo II de 5.0. Se observó en el lago "El Sol" un comportamiento bimodal donde a partir de marzo I aumenta hasta alcanzar el máximo en abril (7.8) donde así mismo se presentó la variabilidad vertical máxima. Posteriormente el *pH* desciende presentándose un ligero incremento en septiembre para luego mantenerse sin variación el resto del ciclo. Durante todo el muestreo, "El Sol" mostró una tendencia más hacia la neutralidad que "La Luna" (menor a 8 mayor a 5) (Fig. 14A). Sin embargo ambos lagos presentaron un comportamiento temporal de *pH* similar (Fig. 14B). La diferencia máxima vertical entre superficie y fondo fue de 1.17 en abril mientras que en octubre no se presentó ninguna diferencia (Tabla 5):

El promedio anual de *pH* en "La Luna" fue de  $4.71 \pm 0.257$ , presentando el máximo en abril con 5.42 y el mínimo en febrero con 4.48 (Tabla 5). Se observó que La Luna presentó una mayor variabilidad vertical respecto a "El Sol". Los valores de *pH* en La Luna fueron más ácidos (<5.5) que en "El Sol". Se presentó un comportamiento donde a partir de marzo I aumenta alcanzando una variabilidad vertical considerable en abril (del orden de 1 unidad) mientras que

la máxima variabilidad vertical se registró en septiembre (con una de diferencia de 2 unidades). La diferencia máxima vertical entre superficie y fondo fue de 1.01 en septiembre y la mínima con 0.03 en julio (Tabla 5.)

pH	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	5.48	4.71
D.E.	0.373	0.257
Máx.	7.8 (abr.)	5.42 (abr.)
Mín.	5.08 (mar II.)	4.48 (feb.)
$\Delta$ pH máx.	1.17 (abr.)	1.01 (sep.)
$\Delta$ pH mín.	0.00 (oct.)	0.03 (jul.)

**Tabla 5.** pH en "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar,  $\Delta$ máx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo,  $\Delta$ mín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo, n=13), Nevado de Toluca, México.



**Figura 14.** Variación temporal del pH en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

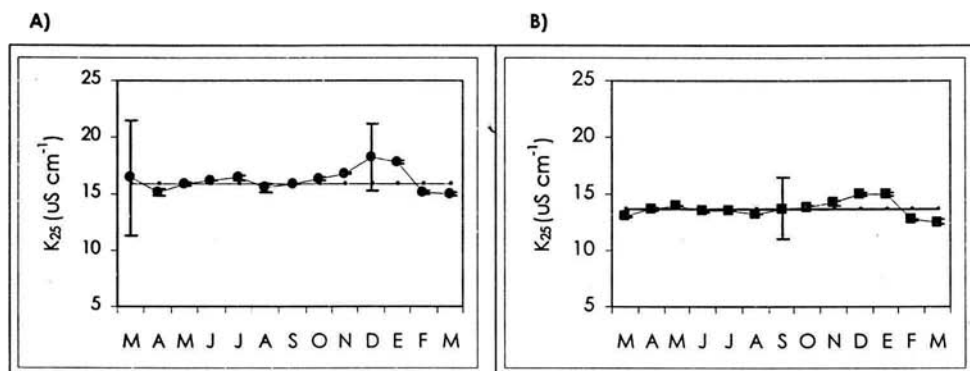
## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ) promedio anual en el lago "El Sol" fue de  $15.912 \pm 0.97 \mu\text{S cm}^{-1}$ . La conductividad máxima se registró en diciembre con  $18.275 \mu\text{S cm}^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $14.958 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Tabla 6). Para el caso de "El Sol" se registró una tendencia a aumentar a partir de abril hasta alcanzar la máxima en diciembre donde también se presentó la máxima variabilidad vertical (Fig. 15A). Los resultados permiten reconocer que existe una homogeneidad vertical en la columna de agua. La diferencia máxima se presentó en abril y agosto con  $1.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ , mientras que en junio y septiembre no se registraron diferencias (Tabla 6).

El promedio anual de conductividad en "La Luna" fue de  $13.694 \pm 0.74 \mu\text{S cm}^{-1}$ . La máxima se presentó en enero con  $15.017 \mu\text{S cm}^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $12.563 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Se observó que en "La Luna" presentó un incremento constante, donde los valores aumentaron a partir de octubre hasta alcanzar su valor máximo en enero con  $15.016 \mu\text{S cm}^{-1}$ . En septiembre se registró la variabilidad vertical mayor (Fig. 15B). La diferencia vertical máxima se registró en septiembre con  $2.732 \mu\text{S cm}^{-1}$ . En mayo, junio y febrero no se registró ninguna diferencia (Tabla 6). Las diferencias registradas en la columna de agua en ambos lagos son tan despreciables que éstos pueden ser atribuibles a la precisión del método de medición.

$K_{25}$ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	15.91	13.69
D.E.	0.971	0.74
Máx.	18.275 (dic.)	15.012 (ene.)
Mín.	14.985 (mar II.)	12.566 (mar II.)
$\Delta K_{25}$ máx.	1.1 (abr.ago.)	2.7 (sep.)
$\Delta K_{25}$ mín.	0.0 (jun. sep.)	0.0 (may.jun.feb.)

**Tabla 6.** Conductividad ( $K_{25}$ ) en El Sol y La Luna (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar,  $\Delta$ máx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo,  $\Delta$ mín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo), Nevado de Toluca, México.



**Figura 15.** Variación temporal de la conductividad en los lagos El Sol (A) y La Luna (B), Nevado de Toluca, México.

## **Química lacustre (nutrimentos)**

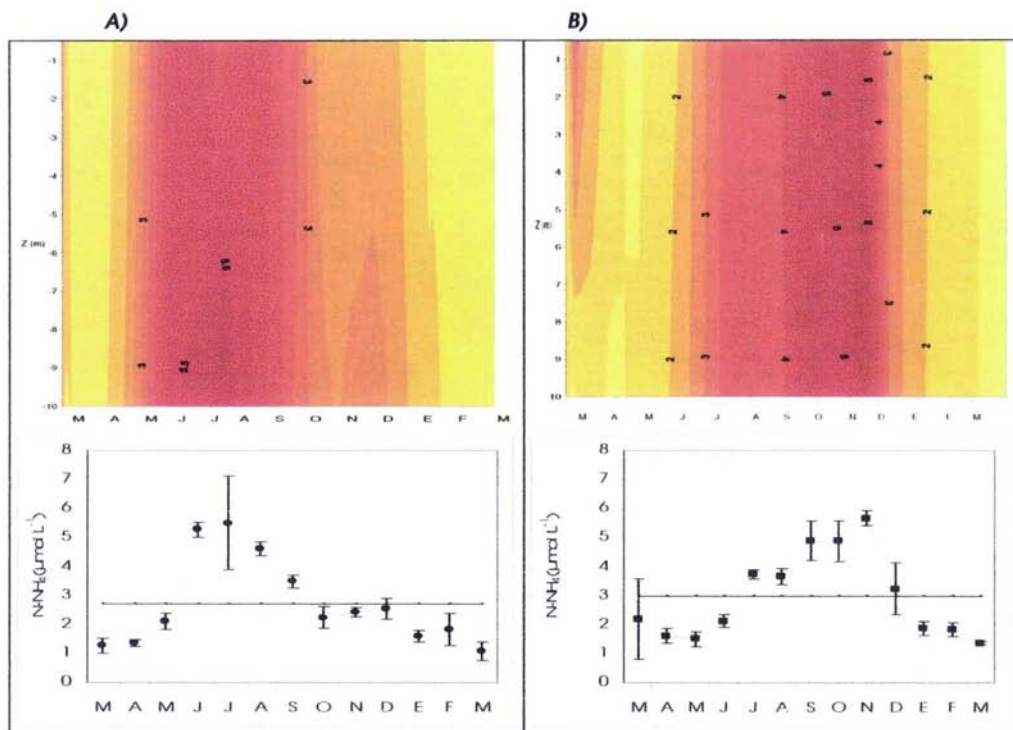
### **Amoniaco ( $N-NH_4$ )**

El promedio anual de la concentración de  $N-NH_4$  en "El Sol" fue de  $2.71 \pm 1.55 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en julio con  $5.51 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $1.07 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima entre superficie y fondo se presentó en julio de  $3.03 \mu\text{mol L}^{-1}$  mientras que la mínima se registró en abril con  $0.11 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). "El Sol" mostró un comportamiento unimodal, donde es a partir de abril cuando comenzó a aumentar, consiguiendo la concentración máxima total en julio (donde se presentó la variabilidad vertical máxima), alcanzando su valor más bajo en marzo II (Fig. 16A).

El promedio anual de la concentración de  $N-NH_4$  en "La Luna" fue de  $2.97 \pm 1.509 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en noviembre con  $5.67 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $1.36 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima en la concentración de  $N-NH_4$  entre la superficie y el fondo se presentó en marzo I con  $2.38 \mu\text{mol L}^{-1}$  mientras que la mínima fue en febrero con  $0.03 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). "La Luna" presentó un comportamiento unimodal registrándose un aumento en la concentración  $N-NH_4$  a partir de junio, alcanzando la concentración máxima en noviembre y la mínima en marzo II (Fig. 16B).

<b>"El Sol"</b>	<b>N-NH<sub>4</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>N-NO<sub>2</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>N-NO<sub>3</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>NID</b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>P-PO<sub>4</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>Si-SiO<sub>2</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )
Prom.	2.71	0.19	4.71	2.53	0.151	14.18
D.E.	1.551	0.232	3.122	2.725	0.112	23.712
Máx.	5.51(jul.)	0.91(nov.)	9.87 (nov.)	13.21(nov.)	0.29(nov.)	52.67(feb.)
Mín.	1.07(mar II.)	0.04(feb.mar II.)	0.09 (mar II.)	1.203(mar II.)	0.02(jul.)	0.84(dic.)
$\Delta$ Máx.	3.03(jul.)	0.18 (nov.)	1.96 (ene.)	3.21(nov.)	0.36(nov.)	15.86(ene.)
<b>"La Luna"</b>	<b>N-NH<sub>4</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>N-NO<sub>2</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>N-NO<sub>3</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>NID</b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>P-PO<sub>4</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	<b>Si-SiO<sub>2</sub></b> ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )
Prom.	2.97	0.05	22.61	8.54	0.11	0.62
D.E.	1.509	0.046	2.363	10.243	0.1	1.081
Máx.	5.67(nov.)	0.20(ene.)	25.89(ene.)	29.51(nov.)	0.33(nov.)	3.86(ene.)
Mín.	1.36(mar II.)	0.02(abr.-mar II.)	19.9(ago.)	21.63(abr.)	0.01(ago.)	0.12(oct.)
$\Delta$ Máx.	2.38(mar I.)	0.03(oct.)	6.23(abr.)	0.65(nov.)	0.25(nov.)	1.36(ene.)
$\Delta$ Mín.	0.03(feb.)	0.0(abr.may.nov. mar II.)	0.07(oct.)	0.42(abr.)	0.0(may- ago.)	0.02(dic.)

**Tabla 7.** Concentración de nutrientes (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar, NID= nitrógeno inorgánico disuelto,  $\Delta$ máx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo,  $\Delta$ mín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo, n=13) en los lagos "El Sol" y "La Luna", Nevado de Toluca, México.

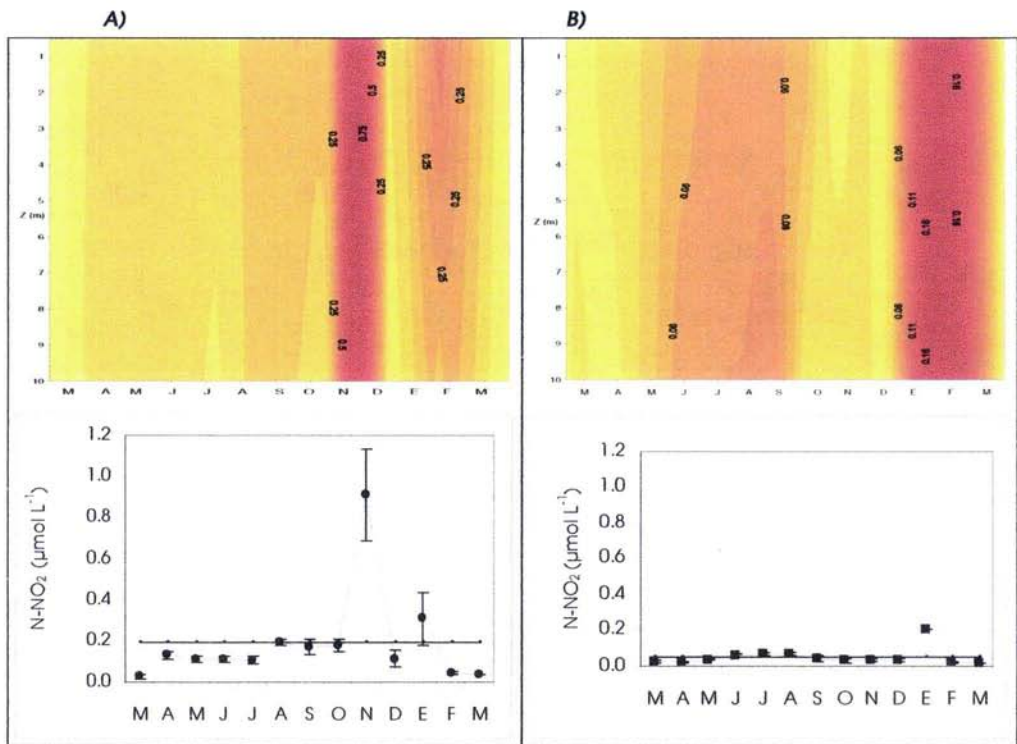


**Figura 16.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de  $N-NH_4$  ( $\mu mol L^{-1}$ ) en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

### Nitritos ( $N-NO_2$ )

El promedio anual de la concentración de  $N-NO_2$  en el lago "El Sol" fue de  $0.19 \pm 0.232 \mu mol L^{-1}$ . La concentración máxima se registró en noviembre con  $0.91 \mu mol L^{-1}$  mientras que la concentración mínima se registró en febrero y marzo II con  $0.04 \mu mol L^{-1}$ . La diferencia máxima de  $N-NO_2$  entre la superficie y el fondo se registró en noviembre con  $0.18 \mu mol L^{-1}$  mientras que en diciembre no existieron diferencias (Tabla 7). Se presentó un comportamiento bimodal, donde a partir de abril, las concentraciones de  $N-NO_2$  comenzaron a aumentar ligeramente hasta alcanzar la concentración y la variabilidad vertical máxima en noviembre con  $1.0 \mu mol L^{-1}$ . En enero se observó un aumento brusco en las concentraciones con  $0.31 \mu mol L^{-1}$  (Fig. 17A).

El promedio anual de la concentración de  $N\text{-NO}_2$  en "La Luna" fue de  $0.05 \pm 0.046 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en enero con  $0.20 \mu\text{mol L}^{-1}$  mientras que la mínima se registró en abril, febrero y marzo II con  $0.02 \mu\text{mol L}^{-1}$ . En la mayor parte del año, no se registraron diferencias verticales entre la superficie y el fondo (abril, mayo, noviembre-marzo II). La máxima diferencia vertical de las concentraciones de  $N\text{-NO}_2$  fue en octubre con  $0.03 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). Se observó un comportamiento temporal estable variando de  $0.02$  a  $0.07 \mu\text{mol L}^{-1}$  de marzo I a agosto. Se registraron dos aumentos; el primero de mayo a agosto por debajo de los  $0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$  y el segundo aumento fue puntual y se presentó en enero (Fig. 17B).



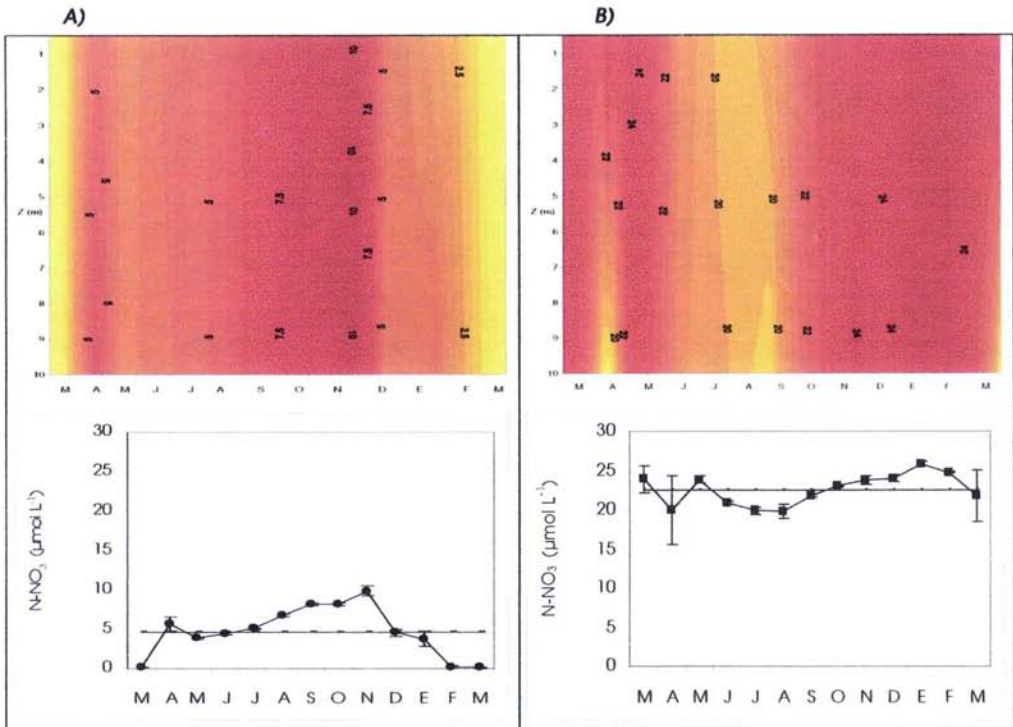
**Figura 17.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de  $N\text{-NO}_2$  ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en los lagos **A)** "El Sol" y **B)** "La Luna", Nevado de Toluca, México.



### **Nitratos (N-NO<sub>3</sub>)**

El promedio anual de la concentración de N-NO<sub>3</sub> en el lago "El Sol" fue de  $4.71 \pm 3.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en noviembre con  $9.87 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $0.09 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima promedio entre superficie y fondo se registró en enero con  $1.96 \mu\text{mol/L}$  mientras que en julio no se registraron diferencias (Tabla 7). "El Sol" se comportó de manera bimodal, observándose el primer aumento en abril para luego presentar la concentración máxima en noviembre y después descender (Fig. 18A).

El promedio anual de la concentración de N-NO<sub>3</sub> en "La Luna" fue de  $22.61 \pm 2.36 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en enero con  $25.89 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en agosto con  $19.9 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia vertical máxima en la concentración de N-NO<sub>3</sub> entre superficie y fondo fue de  $6.23 \mu\text{mol L}^{-1}$  en abril y la mínima se registró en octubre con  $0.07 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). Las concentraciones de este nutriente en "La Luna" fueron considerablemente mayores que en "El Sol" ( $16.47$  a  $26.11 \mu\text{mol L}^{-1}$  y  $0.08$  a  $10.26 \mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente). Las concentraciones de N-NO<sub>3</sub> mostraron una tendencia a aumentar a partir de agosto hasta alcanzar la máxima en enero (Fig. 18B).

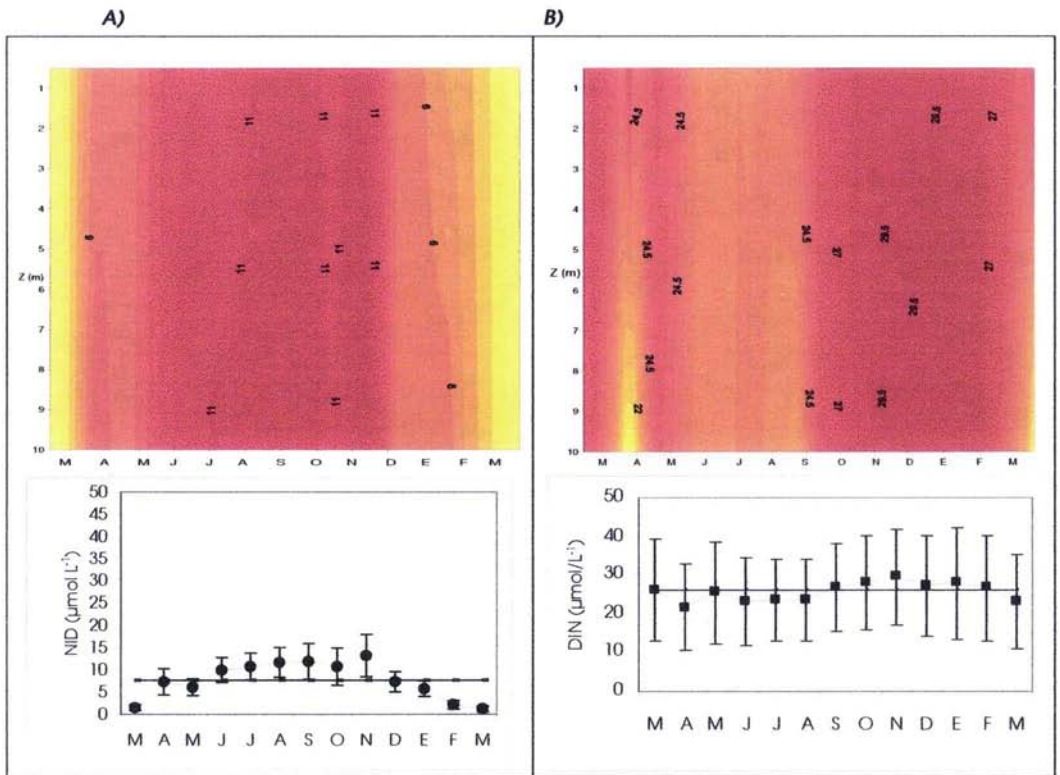


**Figura 18.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de  $N-NO_3$  ( $\mu mol L^{-1}$ ) en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

### **Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)**

La concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago "El Sol" presentó un promedio anual de  $2.538 \pm 2.725 \mu mol L^{-1}$ . La concentración máxima se registró en noviembre con  $13.21 \mu mol L^{-1}$  y la mínima en marzo II con  $1.203 \mu mol L^{-1}$ . La diferencia máxima entre la superficie y el fondo se presentó en noviembre con  $3.21 \mu mol L^{-1}$  mientras que la mínima se registró en marzo II con  $0.45 \mu mol L^{-1}$  (Tabla 7). Se observó un comportamiento unimodal donde a partir de abril se presentó un incremento paulatino hasta alcanzar un máximo en noviembre donde también se encontró la variación vertical máxima (Fig. 19A).

“La Luna” presentó un promedio anual en la concentración de *NID* de  $8.543 \pm 10.243 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La máxima concentración se registró en noviembre con  $29.51 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en abril con  $21.63 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia vertical máxima entre superficie y fondo se presentó en noviembre con  $0.65 \mu\text{mol L}^{-1}$  mientras que la mínima en abril con  $0.42 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). En “La Luna” se observó una mayor concentración de *NID* en comparación con “El Sol” (“La Luna” varió de 21.63 a 29.51 y “El Sol” de 1.203 a  $13.21 \mu\text{mol L}^{-1}$ ). En “La Luna” se presentó un aumento de *NID* a partir de junio hasta alcanzar la concentración máxima en noviembre (Fig. 19B).

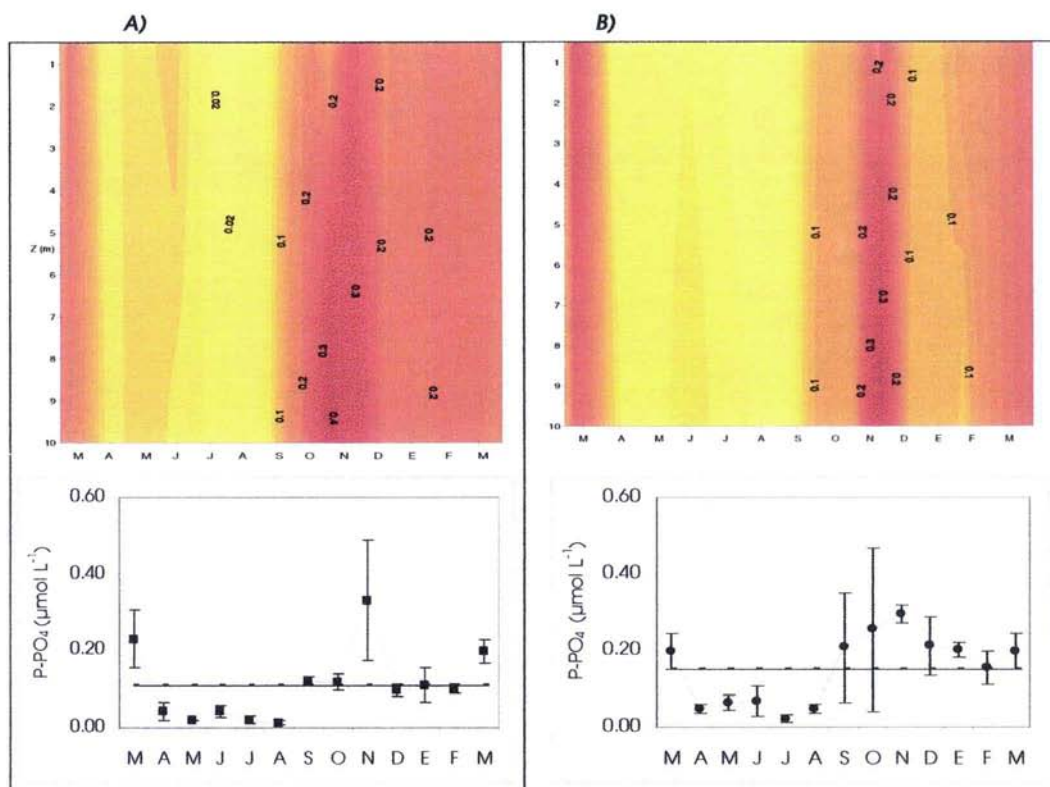


**Figura 19.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de *NID* ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en los lagos A) “El Sol” y B) “La Luna”, Nevado de Toluca, México.

### **Ortofosfatos ( $P-PO_4$ )**

El promedio anual de la concentración de  $P-PO_4$  en el lago "El Sol" fue de  $0.15 \pm 0.11 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La máxima concentración se registró en noviembre con  $0.29 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en julio  $0.02 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima de  $P-PO_4$  entre superficie y fondo se registró en octubre con  $0.36 \mu\text{mol L}^{-1}$ . No se registraron diferencias en agosto (Tabla 7). "El Sol" presentó una distribución unimodal, con un aumento a partir de agosto alcanzando la concentración máxima en noviembre. En septiembre, octubre y diciembre se registró la mayor variación vertical (Fig. 20A).

El promedio anual de la concentración de  $P-PO_4$  en "La Luna" fue de  $0.11 \pm 0.10 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La máxima concentración se presentó en noviembre con  $0.33 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en agosto con  $0.01 \mu\text{mol L}^{-1}$ . Se observaron incrementos menores marzo I y II de  $0.23$  y  $0.20 \mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente de forma similar a lo encontrado en "El Sol". La diferencia máxima entre superficie y fondo fue en noviembre con  $0.35 \mu\text{mol L}^{-1}$  y no existieron diferencias en mayo y agosto (Tabla 8). El  $P-PO_4$  en La Luna mostró una distribución unimodal al registrarse un incremento de este nutrimento a partir de septiembre y alcanzando la concentración máxima en noviembre cuando se presenta la variación máxima vertical (Fig. 20B).

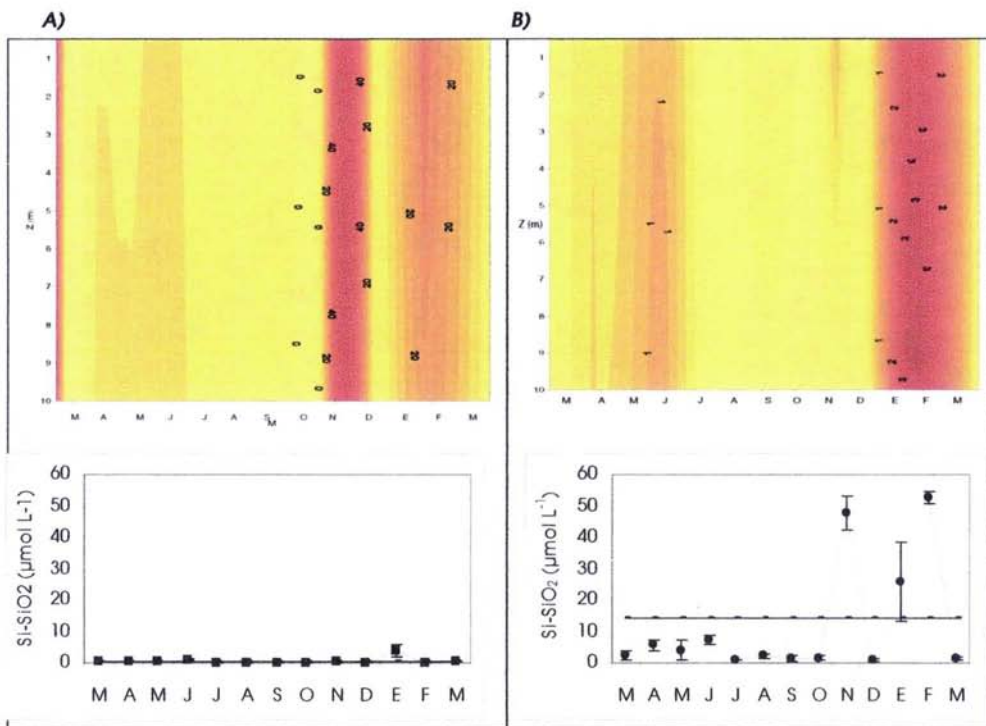


**Figura 20.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de  $P-PO_4$  ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

### **Silicatos ( $Si-SiO_2$ )**

El promedio anual de la concentración de  $Si-SiO_2$  en el lago "El Sol" fue de  $14.182 \pm 23.71 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en febrero con  $52.67 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en diciembre con  $0.84 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima de  $Si-SiO_2$  entre superficie y fondo se registró en enero con  $15.86 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en julio con  $0.11 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Tabla 7). Adicionalmente al máximo, se registró un aumento importante en noviembre. La variación vertical más importante se presentó en enero (Fig. 21A).

El promedio anual de la concentración de  $Si-SiO_2$  en "La Luna" fue de  $0.623 \pm 1.081 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración máxima se registró en enero con  $3.86 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima en noviembre con  $0.05 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La diferencia máxima de  $Si-SiO_2$  entre superficie y fondo se registró en enero con  $1.36 \mu\text{mol L}^{-1}$  y la mínima se presentó en octubre con  $0.12 \mu\text{mol L}^{-1}$ . La concentración de  $Si-SiO_2$  se mantuvo estable a lo largo del año (Fig. 21B). La concentración de  $Si-SiO_2$  en "La Luna" fue considerablemente mayor que en "El Sol" (14:1, respectivamente.) (Tabla 7).



**Figura 21.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de  $Si-SiO_2$  ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

## Distribución de biomasa fitoplanctónica [Clor-*a*] en la columna de agua

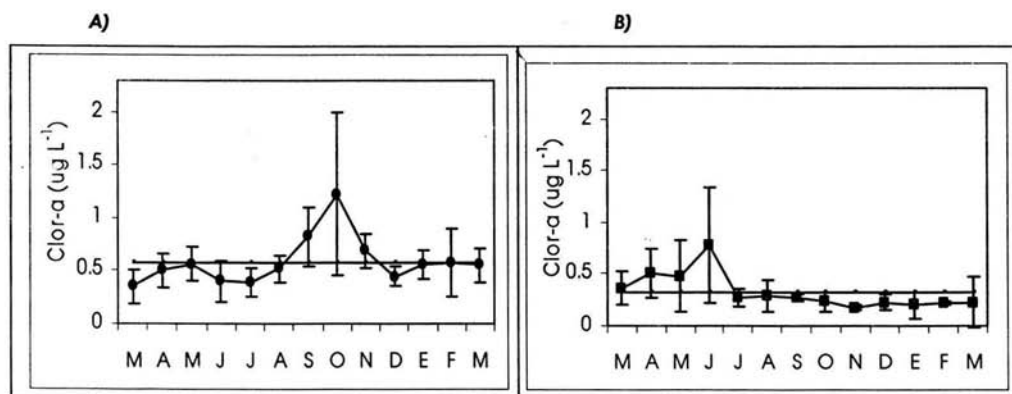
El lago "El Sol" mostró un promedio anual de la concentración de Clor-*a* de  $0.5785 \pm 0.323 \mu\text{g L}^{-1}$ . La concentración máxima se registró en octubre con  $1.225 \mu\text{g L}^{-1}$  y la mínima en marzo I con  $0.3478 \mu\text{g L}^{-1}$  (Tabla 9). En el comportamiento temporal de la concentración de Clor-*a* en "El Sol", se observaron tres aumentos. El primero se registró de abril a mayo ( $0.5645 \mu\text{g L}^{-1}$ ), el segundo de agosto octubre donde alcanzó la concentración máxima ( $1.223 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y finalmente, de enero a febrero ( $0.5732 \mu\text{g L}^{-1}$ ). El máximo probablemente está asociado al aporte de nutrientes (NID) de las lluvias de verano (Fig. 22A). Lo anterior se comprueba con la correlación positiva y significativa entre el NID y la Clor-*a* ( $R=-0.599$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ) Gráficamente el comportamiento temporal de las concentraciones de  $\text{N-NH}_4$  coinciden con la precipitación pluvial de la época cálida húmeda de verano.

El promedio anual de la concentración de Clor-*a* en "La Luna" fue de  $0.3251 \pm 0.264 \mu\text{g L}^{-1}$ . La concentración máxima se presentó en junio con  $0.779 \mu\text{g L}^{-1}$  y la mínima en noviembre con  $0.171 \mu\text{g L}^{-1}$  (Tabla 9). Respecto a la variación temporal, "La Luna" presentó un comportamiento unimodal. El aumento se presentó a partir de marzo hasta alcanzar en junio la concentración máxima ( $0.779 \mu\text{g L}^{-1}$ ), la cual coincide con la variación vertical máxima. A partir de julio, las concentraciones de Clor-*a* se mantuvieron bajas y constantes en un rango de  $0.201-0.434 \mu\text{g L}^{-1}$  (Fig. 22B).

La variación temporal de la biomasa fitoplanctónica en "La Luna" se correlacionó con la variación mensual de la PAR y el pH positiva y significativamente ( $R=0.645$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$  y  $R=0.583$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ , respectivamente) mientras que con la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y la transparencia  $Z_{ds}$ , se correlacionó negativa y significativamente ( $R= -0.599$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$  y  $R= -0.96$ ;  $P=0.05$ ;  $n=13$ , respectivamente).

Clor-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	"El Sol"	"La Luna"
Prom.	0.578	0.325
D.E.	0.323	0.264
Máx.	1.225(oct.)	0.779 (jun.)
Mín.	0.347(mar. I)	0.171 (nov.)
$\Delta$ Máx.	0.717 (abr.)	1.453 (jun.)
$\Delta$ Mín.	0.029 (feb.)	0.04 (sep.)

**Tabla 9.** Concentración de Clor-a en los lagos "El Sol" y "La Luna" (Prom.= promedio, D.E.= desviación estándar,  $\Delta$ Máx.= diferencia vertical máxima entre superficie y fondo,  $\Delta$ Mín.= diferencia vertical mínima entre superficie y fondo, n=13), Nevado de Toluca, México.

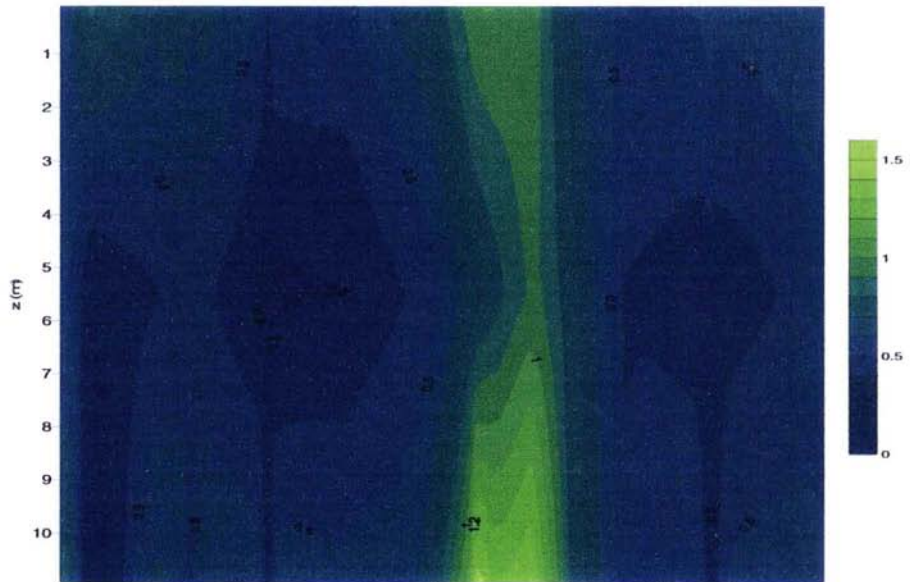


**Figura 22.** Variación temporal de la concentración de Clor-a por volumen ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

La diferencia vertical máxima en el lago "El Sol" se registró en abril con  $0.717\mu\text{g L}^{-1}$  mientras que la mínima se registró en febrero con  $0.029\mu\text{g L}^{-1}$  (Tabla 8). En general "El Sol" exhibió en casi todos los perfiles de abril a marzo II, un aumento en la concentración de Clor-a cercano al fondo (Fig. 23). Se observó que las

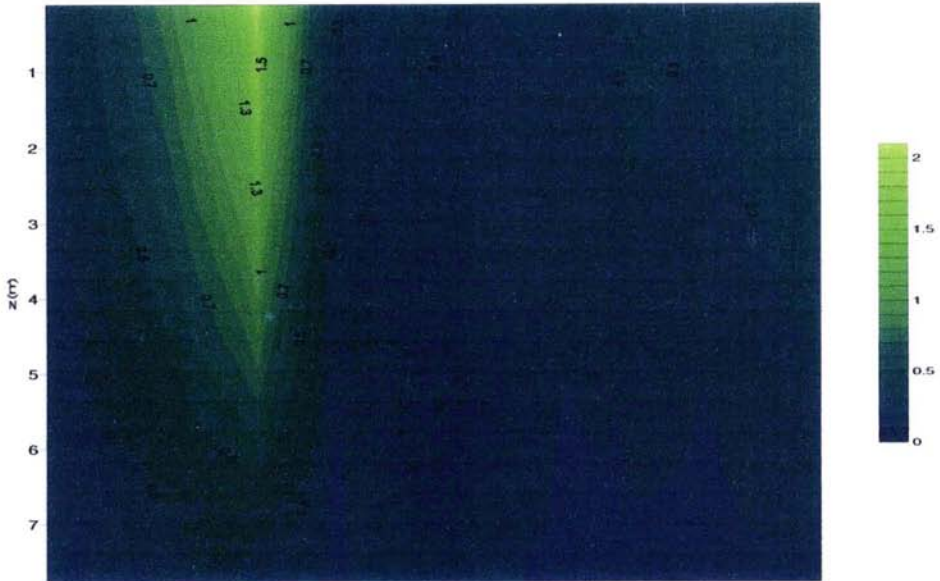


concentraciones mínimas de Clor-*a* en el gradiente vertical son a profundidad media (marzo I, mayo-julio y diciembre-febrero).



**Figura 23.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de la concentración de Clor-*a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en el lago "El Sol", Nevado de Toluca, México.

De marzo I a junio "La Luna" presentó una mayor variación en las concentraciones de Clor-*a* en el gradiente vertical. La diferencia máxima vertical entre superficie y fondo se registró en junio con  $1.453\mu\text{g L}^{-1}$ , mientras que la mínima se presentó en septiembre con  $0.04\mu\text{g L}^{-1}$ . En general, se encontraron mayores concentraciones en la parte superior de la columna de agua que en el fondo. (Fig. 24).



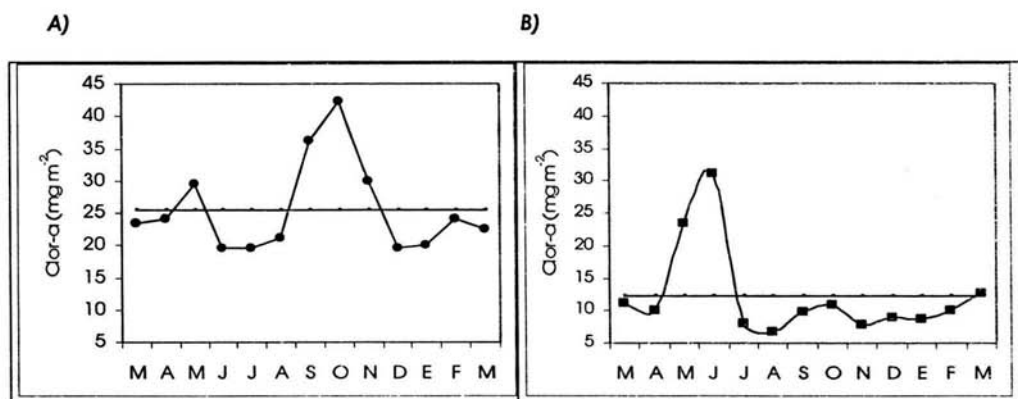
**Figura 24.** Diagramas de profundidad-tiempo de isopletas de la concentración de Clor-*a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en el lago "La Luna", Nevado de Toluca, México.

### ***Clor-a total integrada***

Las concentraciones de Clorofila "a" total integradas por unidad de área en el lago "El Sol" fueron de  $25.55 \pm 7.074 \text{mg m}^{-2}$ . La concentración máxima se registró en octubre con  $42.24 \text{mg m}^{-2}$  mientras que la mínima se presentó en junio con  $19.64 \text{mg m}^{-2}$ . En "El Sol" se observó un comportamiento trimodal en cuanto a la distribución temporal de biomasa fitoplanctónica de forma similar a la descrita para la Clor-*a* en volúmen. El primero se registró en mayo ( $29 \text{mg m}^{-2}$ ), el segundo aumento comenzó a partir de julio hasta octubre ( $42.24 \text{mg m}^{-2}$ ) y el último aumento se registró en febrero ( $24.12 \text{mg m}^{-2}$ ). Las concentraciones mínimas fueron muy similares y se presentaron en junio ( $19.64 \text{mg m}^{-2}$ ), julio ( $19.68 \text{mg m}^{-2}$ ) y diciembre ( $19.68 \text{mg m}^{-2}$ ) (Fig. 25A).

El promedio anual en "La Luna" fue de  $12.294 \pm 6.997 \text{mg m}^{-2}$ . La máxima concentración de Clor-*a* por área se presentó en junio con  $31.12 \text{mg m}^{-2}$  y la

mínima en agosto con  $6.72\text{mg m}^{-2}$ . A partir de agosto se presentó una ligera tendencia a incrementar la concentración de Clor-a (Fig. 25B). Los aumentos registrados en ambos lagos "El Sol" y "La Luna", coinciden estacionalmente con el inicio de la primavera y la época cálida húmeda en verano, respectivamente.



**Figura 25.** Variación temporal de la concentración de Clor-a integrada ( $\text{mg m}^{-2}$ ) en los lagos A) "El Sol" y B) "La Luna", Nevado de Toluca, México.

## Discusión

### *Física lacustre*

Con base en la profundidad del disco de Secchi y la concentración de Clor-*a*, "El Sol" puede ser caracterizado como oligotrófico ( $Z_{ds}= 4.7\text{m}$ ) y "La Luna" como ultra-oligotrófico ( $Z_{ds}= 7.7\text{m}$ ); ambos presentan un promedio anual de Clor-*a* menor a  $1.0\mu\text{g L}^{-1}$  y una máxima inferior o igual a  $2.5\mu\text{g L}^{-1}$  (Vollenweider y Kerekes, 1982), lo que confirma lo establecido anteriormente.

En algunos estudios (p.e., Hutchinson y Loffler, 1956; Loffler, 1960), los lagos tropicales en zonas de alta montaña húmeda ("Páramos"), se han descrito como permanentemente "oligotermales" (circulación frecuente), por lo que han sido denominados "polimícticos-fríos" ( $-2$  a  $3.5^{\circ}\text{C}$ ). Sin embargo, según Alcocer *et al.* (2004), los lagos de "El Sol" y "La Luna" además de presentar la característica de mezclarse frecuentemente y presentar mayor estabilidad, éstos presentan temperaturas elevadas, ausencia de periodos de congelamiento y estratificación según lo demuestran los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto, donde no se observó ni termoclina ni oxiclina, por lo que se les han denominado "polimícticos continuos cálidos". En "El Sol" se presentó un intervalo mínimo en la diferencia de temperatura en el gradiente vertical, comportamiento común en lagos someros, transparentes, no alimentados por glaciares templados de alta montaña (Sommaruga *et al.*, 1999; Sommaruga y García-Pichel, 1999; Winder y Spaak, 2001).

Los lagos de alta montaña presentan bajas concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD), por lo que la atenuación de la radiación solar en la columna de agua es atribuible principalmente a la presencia de fitoplancton (Sommaruga, 2001). En este caso, las concentraciones presentes de biomasa fitoplanctónica podrían estar reduciendo la transparencia del lago. En "El Sol" y "La Luna" se observó que las concentraciones máximas de Clor-*a* en ambos

lagos coinciden con el comportamiento de las mínimas de transparencia obtenidas mediante el disco de Secchi ("El Sol" en octubre y "La Luna" en junio). Con base al análisis de correlación (Strickland y Parsons, 1972), la profundidad del disco de Secchi se encuentra correlacionada significativamente con la variación anual de la biomasa fitoplanctónica en ambos lagos ( $R=0.791$ ;  $P=0.05$ ;  $n=13$  para "El Sol" y  $R= -0.95$ ;  $P= 0.05$ ;  $n=13$  para "La Luna"). En "El Sol" las concentraciones máximas de Clor-*a* se presentaron en octubre al mismo tiempo que se registró la transparencia mínima (3m) por lo que la distribución de la biomasa fitoplanctónica en ese mes (fondo) no explica la extinción luminosa en la columna de agua mientras que en "La Luna" la correlación fue positiva y significativa debido a que la máxima concentración de Clor-*a* se encuentra distribuida en junio preferentemente en el estrato superior, por lo que la transparencia tendió a disminuir. En el resto del ciclo (julio-marzo II) donde las concentraciones se mantuvieron muy bajas y constantes, "La Luna" presentó una transparencia casi total.

Paralelamente a lo que se conoce del efecto que tienen los procesos de acidificación de los lagos de alta montaña por precipitación ácida, el papel de éste en la química y sus efectos en la limnología ha sido ampliamente estudiado (p.e., como factor limitante en la distribución del fitoplancton) (Barbieri *et al.*, 1999). La acidez que presentaron "El Sol" (5.48) y "La Luna" (4.7) (similar a lo encontrado para ocho lagos ácidos (4.9 a 6.0), estudiados por el MOLAR Water Chemistry Group (1999), se debe en principio al tipo de material volcánico de la cuenca donde se encuentran suelos menos desarrollados y delgados (Zobrist y Drever, 1989); sin embargo, la presencia de lluvias ácidas generadas por actividades antropogénicas incrementan el grado de acidez "natural" (p.e., las exportaciones de materiales nitrogenados ( $N-NO_3$ ) y sulfatos ( $S-SO_4$ ) producto de la mineralización y oxidación de nitrógeno y azufre, respectivamente) como se ha sido descrito en otros estudios realizados en lagos templados de alta montaña en los Alpes suizos (EMERGE, MOLAR, RECOVER: 2010) (Rogora, 2003; Mosello *et al.*, 1999, 2000; Barrett *et al.*, 2000). En "La Luna" se observó que la

variación temporal de biomasa fitoplanctónica y el pH se encuentran correlacionados positiva y significativamente ( $R=0.583$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ).

La conductividad en el lago "El Sol" ( $16.191\pm 0.971\mu\text{S. cm}^{-1}$ ) y "La Luna" ( $13.692\pm 0.741\mu\text{S. cm}^{-1}$ ) es menor a la registrada para 35 lagos en el Valle de Ossola y Sesia (Alpes centrales suizos) los cuales presentan un promedio anual de  $25\mu\text{S. cm}^{-1}$  (Rogora *et al.*, 2003), pero similar a los reportados para 11 lagos asociados en el "Grupo III" por MOLAR-Water Chemistry Group (1999) con 10.2-21.8 $\mu\text{S. cm}^{-1}$ . En el gradiente vertical en "El Sol" y "La Luna" se observó que la conductividad fue levemente menor en el fondo con  $13.636\mu\text{S. cm}^{-1}$  (6.849%) en los meses de septiembre y octubre, posiblemente asociado al aporte de lluvia al sistema.

#### *Química lacustre*

El área de captación es uno de los factores más importantes que definen el suministro de nutrimentos a un lago. Los lagos de alta montaña usualmente poseen una cuenca de captación reducida por lo que generalmente son sitios de baja productividad y por lo tanto dependientes de los aportes alóctonos (p.e., precipitación pluvial, ríos, precipitación de partículas atmosféricas (Thomasson, 1956)).

En los hábitats acuáticos de alta montaña los nutrimentos son el recurso más importante para la distribución, reproducción y productividad de la comunidad fitoplanctónica (Gunkel y Casallas, 2002a). Dentro de éstos, el fósforo es el elemento que se encuentra disponible en menor cantidad, por lo que frecuentemente es considerado como el nutrimento limitante controlador de la productividad en estos ecosistemas. Como se ha demostrado, la adición de pequeñas cantidades de fósforo genera un incremento inmediato de la producción (Teubner, 2003). Estudios recientes realizados en lagos tropicales y algunos tropicales de alta montaña (p.e., el Lago San Pablo (Gunkel y Casallas, 2002b)), contradicen ésta afirmación al describir al nitrógeno como el factor limitante en el aumento de la bioproductividad de los lagos.

De acuerdo a la propuesta de Redfield (1958) (N:P 16:1) calculada con base en  $(N-NO_3/P-PO_4)$  para "El Sol" y "La Luna", ambos lagos se encuentran limitados por el fósforo ( $N:P > 16$ ). El enriquecimiento en nitrógeno encontrado en "El Sol" y particularmente en La Luna se encuentra posiblemente relacionado a la correlación negativa hallada entre pH y los nitratos (Barbieri *et al.*, 1999). Adicionalmente, la presencia de aluminio, elemento común en lagos volcánicos, puede estar inhibiendo de manera parcial el metabolismo algal como lo establecen Hinder *et al.* (1999) para los lagos Jori II y IV y Langsee en lo Alpes suizos. La precipitación atmosférica de compuestos nitrogenados también incrementa su concentración como ha sido reportado para otros lagos de alta montaña (p.e., Catalán *et al.*, 1994; Tait y Thaler, 2000).

Ambos lagos se presentaron correlaciones significativas entre la Clor-*a* y el nitrógeno: en el lago "El Sol" positiva con el  $N-NO_3$  ( $R = 0.557$ ,  $P = 0.01$ ;  $n = 13$ ), mientras que en "La Luna" fue negativa con el  $NID$  ( $R = -0.599$ ,  $P = 0.01$ ;  $n = 13$ ). En el caso de "La Luna" la respuesta puede estar en que, como se mencionó con anterioridad, el bajo *pH* combinado con la presencia de aluminio inhibe el metabolismo de las algas impidiendo la asimilación de nitratos, lo cual explicaría la correlación negativa. La correlación positiva y significativa entre la Clor-*a* y el *pH* ( $R = 0.583$ ,  $P = 0.05$ ;  $n = 13$ ) en "La Luna", proporciona evidencia a favor de esta última conjetura. La correlación presentada por en "El Sol" entre la variación de la biomasa fitoplanctónica y la concentración de  $N-NO_3$  fue positiva y significativa ( $R = 0.557$ ;  $P = 0.01$ ;  $n = 13$ ) tal vez por el efecto contrario que provocó su carácter de lago menos ácido (5.48).

De acuerdo con Nauwerk (1980), mientras más oligotrófico sea un lago, la cantidad de biomasa fitoplanctónica tiende a disminuir (máx.:mín. <30:1); este es el caso de "El Sol" (máx.:mín. = 4:1) y "La Luna" (máx.:mín. = 3:1). El mismo autor establece que el curso de la variación estacional de la biomasa fitoplanctónica, en lagos oligotróficos se vuelve suave a lo largo del tiempo mismo comportamiento presentado en ambos lagos al presentarse

aparentemente una variación temporal muy pequeña ("El Sol" máx=1.225 $\mu\text{g L}^{-1}$  y mín=0.347 $\mu\text{g L}^{-1}$  y "La Luna" máx=0.779 $\mu\text{g L}^{-1}$  y mín=0.171 $\mu\text{g L}^{-1}$ ).

#### *Distribución de la biomasa fitoplanctónica*

Los lagos de alta montaña tanto templados como tropicales exhiben una variación amplia en la concentración de Clor-*a* (Tabla 9). En los templados varía desde 0.034  $\mu\text{g L}^{-1}$  en lago La Caldera, España (Martínez, 1980) hasta 16.0 $\mu\text{g L}^{-1}$  en el lago Hagelseewli, Suiza (Goudsmith *et al.*, 2000); por otro lado, los lagos en latitudes más bajas presentan una variación entre 0.171 $\mu\text{g L}^{-1}$  en "La Luna", Nevado de Toluca, México y 19.0 $\mu\text{g L}^{-1}$  en el lago San Pablo, Ecuador (Gunkel, 2000).

Tanto el algo "El Sol" (promedio anual de  $0.524 \pm 0.323\mu\text{g L}^{-1}$ , máxima de 1.225 $\mu\text{g L}^{-1}$  y mínima de 0.347  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) como "La Luna" (promedio anual de  $0.364 \pm 0.264\mu\text{g L}^{-1}$ , máxima de 0.779 $\mu\text{g L}^{-1}$  y mínima de 0.171 $\mu\text{g L}^{-1}$ ) presentan concentraciones más parecidas a las de los lagos templados de alta montaña, tal y como se aprecia en la Tabla 9. Las concentraciones presentadas por "El Sol" y "La Luna" son considerablemente más bajas comparadas con aquéllas reportadas para otros lagos tropicales de alta montaña, todos ellos más profundos, como el lago San Pablo (10 a 20 $\mu\text{g L}^{-1}$ , Gunkel, 2002), lago Grande (2.6 a 8.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ , Wurtsbough *et al.*, 1985) y el lago Titicaca (1.1 a 6.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ , Wurtsbough *et al.*, 1985).

La concentración máxima de Clor-*a* en el lago "El Sol" se presentó en octubre (1.225  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Este aumento en la biomasa fitoplanctónica, permitió a su vez un incremento en la abundancia de zooplancton que condujo a una disminución de la misma para el siguiente mes. El proceso se revirtió contra los organismos zooplanctónicos en marzo II al terminarse las reservas alimenticias, junto con un cambio drástico en las condiciones de luz, temperatura y turbulencia. No es sino hasta principios de la primavera cuando el fitoplancton comienza a recuperarse y aumentar su densidad (Alcocer *et al.*, 2004). Este comportamiento recuerda el estudio realizado por Nauwerck (1980) en lagos de



alta montaña-árticos donde la máxima concentración de biomasa fitoplanctónica se presenta en la época cálida húmeda de verano, relacionado al aumento de temperatura, incidencia solar, aumento de precipitación y cantidad de nutrimentos. Lo anterior permite aceptar la hipótesis acerca de que la variación temporal de Clor-*a* presenta un máximo en la época de lluvias, coincidiendo con un incremento en la concentración de algunos nutrimentos.

La biomasa fitoplanctónica en "La Luna" se mantuvo relativamente constante de agosto a marzo II con ligeros aumentos en agosto y diciembre. Aún a pesar de que existen condiciones propicias para el desarrollo fitoplanctónico (p.e., disponibilidad de nutrimentos), la presión que posiblemente ejerce el aumento en la densidad de los depredadores zooplanctónicos sobre la comunidad fitoplanctónica en esta época controla su desarrollo (Alcocer *et al.*, 2004). Las concentraciones de Clor-*a* mostraron valores mayores a partir de marzo I hasta alcanzar la máxima concentración en junio, mientras que en los meses subsecuentes, no se observó variación considerable, sino hasta marzo II cuando comenzó a aumentar nuevamente.

Ambos lagos presentaron en julio un descenso drástico de la biomasa fitoplanctónica. Según (Alcocer *et al.*, 2004) el pH menor de 5 y posiblemente, la presión ejercida por el zooplancton, son los factores que influyen de manera importante en este comportamiento, particularmente en "La Luna" en la cual presentó un pH menor (4.7).

Las concentraciones de Clor-*a* integradas por unidad de área ("El Sol" 19.63 a 42.24mg m<sup>-2</sup> "La Luna" 6.72 a 31.12mg m<sup>-2</sup>) son mayores que las encontradas en lagos templados de alta montaña como La Caldera, España, con 0.7 a 1.13mg m<sup>-2</sup> (Martínez, 1980), sin embargo son menores que en los lagos monomícticos profundos tropicales como es el caso de el Titicaca, con 40 a 120mg m<sup>-2</sup> (Lázaro, 1981).

Lago	Altitud (m s.n.m.)	Región	Mín.	Máx.	Referencia
La Caldera (España)		Templado	0.034	0.34	Martínez, 1980
"La Luna" (México)	4300	Tropical	0.171	0.779	Este estudio
"El Sol" (México)	4300	Tropical	0.347	1.225	Este estudio
Waegital (Suiza)		Templado	0.3	2.7	Schanz <i>et al.</i> , 2001
Milchsee (Alpes)		Templado	0.1	4.6	Tait y Taler, 2000
Jōri III (Alpes Suizos)	3060	Templado	0.4	5.0	Hinder <i>et al.</i> , 1999
Morenito (Argentina)		Templado	5.0	5.0	Queimaliños, 2002
Titicaca (Perú-Bolivia)	3817	Tropical	1.1	6.0	Wurtsbaugh <i>et al.</i> , 1985
Lago Inferior (Suiza)	2074	Templado	1.5	6.7	Simona <i>et al.</i> , 1999
Lago Grande (Perú-Bolivia)	3817	Tropical	2.6	8.0	Wurtsbaugh <i>et al.</i> , 1985
Lago Iseo (Italia)	1559	Templado	4	6	Giardino <i>et al.</i> , 2001
Alpes Austríacos	2890	Templado	0.2	10.6	Sommaruga <i>et al.</i> , 1999
Lago Langsee (Alpes)		Templado	0.1	14.5	Tait y Taler, 2000
Hagelseewii (Suiza)		Templado	2	16.0	Goudsmit <i>et al.</i> , 2000
San Pablo (Ecuador)	2660	Tropical	10.0	19.0	Gunkel, 2000
Lagos Tatra (Eslovaquia)	2145	Templados	0.01	23	Vynhalek <i>et al.</i> , 1994
Apeninos (Italia)	1775	Templado	0.17	39.5	Viaroli <i>et al.</i> , 1999

**Tabla 10.** Comparación de las concentraciones de Clor- $\alpha$  ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) reportadas en lagos tropicales y templados de alta montaña.

Se esperaría que la someridad y los fuertes vientos en los lagos "El Sol" y "La Luna" promovieran corrientes convectivas que dieran por resultado la mezcla del cuerpo de agua y con ésta, a una distribución homogénea del fitoplancton en el gradiente vertical. Sin embargo, factores como la alta transparencia del agua, la mayor concentración de nutrimentos cercanos a los sedimentos y la mayor estabilidad de condiciones ambientales encontradas hacia el fondo, inducen el establecimiento diferencial del fitoplancton hacia capas más profundas donde la actividad fotosintética tiene mejores condiciones para llevarse a cabo (Thomasson, 1956; Schneider y Mauser, 1996; Simona *et al.*, 1999). Por lo anterior, las máximas concentraciones de biomasa fitoplanctónica localizadas cercanas al fondo son características de lagos transparentes de alta montaña no alimentados por glaciares (Pechlaner, 1971; Tizler y Bindloss, 1980; Barbieri *et al.*, 1999; Sommaruga *et al.*, 2000 y Sommaruga y García-Pichel, 1999; Simona *et al.*, 1999).

Este comportamiento responde a la necesidad del fitoplancton por establecerse en zonas donde eviten, por lo menos parcialmente, los efectos estresantes o nocivos que produce el exceso de radiación solar, especialmente de la RUV (p.e., 290-400nm, UV-B 290-320nm, UV-A320-400nm), lo cual ha demostrado ser un factor ambiental inhibitorio crucial en los organismos acuáticos de los lagos templados de alta montaña (Sommaruga, 2001). La radiación afecta directamente las tasas de crecimiento y reproducción, enzimas fotosintéticas de almacenamiento y otras proteínas celulares, pigmentos fotosintéticos y asimilación de nitrógeno ( $N-NO_3$ ). Es por ello que los organismos acuáticos de ecosistemas de alta montaña han desarrollado estrategias para reducir el daño producido por la radiación como es la migración vertical activa hacia zonas más protegidas y, por otro lado, cambios asociados al metabolismo como la acumulación de diferentes compuestos que absorban directa o indirectamente los rayos UV (Sommaruga y Psenner, 1997).

Tizler y Bindloss (1980) establecen que en los lagos polimícticos transparentes (p.e.,  $Z_{max} < Z_{eu}$ ), es de esperarse una distribución vertical

fitoplanctónica uniforme en la columna de agua. No obstante, si bien en "La Luna" el perfil de distribución de Clor-a fue mayor en el estrato superior (marzo I a julio) y homogéneo el resto del año (agosto a febrero), en "El Sol" se observó un incremento de Clor-a cercano al fondo como se mencionó anteriormente. Alcocer *et al.* (2004) explican este incremento por la presencia combinada de células hundidas de fitoplancton y de algas filamentosas bentónicas de la familia *Oscillatoriaceae*. La presencia de las algas bentónicas puede ser producida por el transporte desde la zona somera litoral hacia el fondo del lago, donde se observa una gran abundancia. Se observó que la PAR y la variación de la biomasa fitoplanctónica en "La Luna" están correlacionados al presentar una correlación positiva y significativa ( $R=0.645$ ;  $P=0.01$ ;  $n=13$ ).

La distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica en "La Luna" fue más o menos homogénea durante la mayor parte del año (agosto a marzo II) y en el estrato superficial durante un corto periodo (marzo I a julio), por lo que la hipótesis sobre la distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica establecida no se cumplió. Para el caso del lago "El Sol", se acepta parcialmente ya que se observó una distribución preferencial de la biomasa fitoplanctónica en el fondo en la época cálida húmeda de verano (abril a noviembre). Sin embargo, las causas de la diferencia en la distribución vertical en la columna de agua y la variación temporal de la biomasa fitoplanctónica en estos dos lagos ubicados a la misma altitud (4230m s.n.m.) con características fisicoquímicas similares y en condiciones climáticas iguales, son al momento desconocidas. De acuerdo a estudios previos, realizados por Sarma *et al.* (1996) con 34 especies de rotíferos (zooplancton) y a Caballero-Miranda (1996) con diatomeas, se establece que la composición biológica de especies en "El Sol" y "La Luna" es diferente. La diversidad de algas en el lago "El Sol" esta compuesta por diferentes familias como *Demidiaceae*, *Oedogoniaceae*, *Zygnemataceae*, *Oscillatoriaceae*, y *Chaetophoraceae* y una gran variedad de clorofitas bénticas mientras que para el lago "La Luna" aún se tiene el listado de especies. Esta diferencia en cuanto a la composición de especies fitoplanctónicas puede ser la explicación

a las diferencias en la distribución diferencial de la biomasa fitoplanctónica en los lagos "El Sol" y "La Luna".

## Conclusiones

- Los lagos "El Sol" y "La Luna" son lagos de alta montaña "típicos", esto es transparentes ( $Z_{ds} > 6\text{m}$ ;  $K_d = 0.225$  a  $0.336\text{m}^{-1}$ ), fríos ( $8.5^\circ\text{C}$ ), bien oxigenados ( $7\text{mg L}^{-1}$ , 94% de saturación), ácidos (4 a 6), baja conductividad (13 a  $16\ \mu\text{S cm}^{-1}$ ) y de ultra-oligotróficos a oligotróficos ( $\text{Clor-a} < 2.5\ \mu\text{g L}^{-1}$ ).
- La concentración de biomasa fitoplanctónica -expresada como Clor-a- encontrada en los lagos "El Sol" ( $0.578 \pm 0.3239\ \mu\text{g L}^{-1}$ , donde  $\text{mín}=0.347$  y  $\text{máx}=1.225\ \mu\text{g L}^{-1}$ ) y "La Luna" ( $0.325 \pm 0.2649\ \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $\text{mín}=0.171$  y  $\text{máx}=0.779\ \mu\text{g L}^{-1}$ ) es más baja que la registrada en otros lagos tropicales de alta montaña (p.e., San Pablo en Ecuador ( $\text{mín}=10.0\ \mu\text{g L}^{-1}$  y  $\text{máx}=19.0$ ) y Lago Grande y Titicaca en Perú-Bolivia ( $\text{mín}= 2.6$  y  $\text{máx}= 8.0\ \mu\text{g L}^{-1}$ ); sin embargo resultan más parecidos a los lagos templados de alta montaña como La Caldera (España) ( $\text{mín}=0.034$  y  $\text{máx}=0.34$ ), Waegital (Suiza) ( $\text{mín}=0.3$  y  $\text{máx}=2.7\ \mu\text{g L}^{-1}$ ) y Milchsee (Alpes) ( $\text{mín}=0.1$  y  $\text{máx}=4.6\ \mu\text{g L}^{-1}$ ), Jori III ( $\text{mín}=0.4$  y  $\text{máx}=5.0\ \mu\text{g L}^{-1}$ ) y Langsee (Alpes) ( $\text{mín}= 0.1$  y  $\text{máx}=14.5\ \mu\text{g L}^{-1}$ ).
- La distribución vertical e la biomasa fitoplanctónica en el lago "El Sol" presentó un ligero incremento por arriba de los sedimentos en el fondo del lago, asociado a la presencia de algas fitoplanctónicas en el fondo y algas bentónicas filamentosas. Por el otro lado, la distribución fue generalmente e homogénea en el perfil de la columna de agua en "La Luna" (agosto a marzo II) y mayor en el estrato superficial de marzo a julio.
- Las concentraciones de Clor-a integradas por unidad de área presentadas en "El Sol" ( $25.55 \pm 7.07\text{mg m}^{-2}$ ,  $\text{mín}=19.64$  y  $\text{máx}=42.24\text{mg m}^{-2}$ ) y "La Luna" ( $12.294 \pm 6.997\text{mg m}^{-2}$ ,  $\text{mín}=6.72$  y  $\text{máx}=31.12\text{mg m}^{-2}$ ) son mayores que las encontradas en lagos templados de alta montaña como la Caldera (España) ( $0.7$  a  $1.13\text{mg m}^{-2}$ ), no obstante son menores que en los lagos tropicales de alta montaña como es el caso del Titicaca (Perú)( $40$  a  $120\ \text{mg m}^{-2}$ ).

- "El Sol" mostró la máxima concentración de biomasa fitoplanctónica en octubre y "La Luna" en junio, coincidiendo con la época cálida de lluvias de verano y el deshielo de la primavera, respectivamente. En "El Sol" se observaron otros dos aumentos en las concentraciones de biomasa fitoplanctónica, el primero de ellos simultáneo al de "La Luna". Estos incrementos en las concentraciones de biomasa fitoplanctónica, se encontraron correlacionados positivamente con la concentración de los nitratos y del nitrógeno inorgánico disuelto, respectivamente.

## Agradecimientos

- A la DGAPA UNAM proyectos IN209301 y IN209302 por el apoyo con la beca de licenciatura brindada durante sus etapas 12 y 13 y financiamiento parcial para el desarrollo de este proyecto.
- Al Sistema Meteorológico Nacional del Estado de México por la información registrada en la Estación Meteorológica Nevado de Toluca, periodo 1964-2000.
- A la CEPANAF, Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México, por permitir el acceso al Parque Nacional Nevado de Toluca para llevar a cabo el muestreo.
- Al Proyecto de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, por proporcionar toda la infraestructura necesaria para desarrollar este trabajo de tesis.
- Al Dr. Javier Alcocer Durand, director de esta tesis por permitirme participar en el proyecto junto con él, por todo su apoyo teórico, práctico y emocional que me permitió sacar adelante este largo proyecto y por haber sido un gran impulsor en mi carrera como futura limnóloga. Le admiro por ser el más destacado limnólogo en México y el mundo y enfocar sus esfuerzos en la ampliación de los recursos hidrológicos prioritarios de nuestro país.
- Al la Dra. Elva Escobar Briones por ser una mujer a la que admiro por su dedicación, experiencia, tenacidad y excelencia académica de reconocimiento internacional, y sobre todo por ser pionera en el ámbito oceanográfico en México. Agradezco su invitación a la campaña oceanográfica SIGSBEE-7 en la cual aprendí tanto gracias a su paciencia y profesionalismo.
- Al M. en C. Luis Oseguera
- Al Dr. Enrique Cantoral
- Al Dr. Alfonso Lugo
- Al Dr. Martín Merino y al Biól. Sergio Castillo (Instituto de Ciencias del



Mar y Limnología, UNAM) por haber llevado a cabo los análisis de nutrimentos utilizados en esta tesis.

- A los M. en C. Citlali Díaz, Laura Peralta, Luis Oseguera y Antonio Salas por la ayuda para la recolección biológica y de las muestras de agua; y a Eduardo Nájera por el trabajo con los datos y ayuda técnica.

*Personales...*

- A la benemérita Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ciencias, al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología los cuales me brindaron el privilegio y el honor de aprender en sus aulas.
- A la Dra. Rosa Luz Tavera y al Dr. Eberto Novelo por haberme inducido en el arte de la ciencia e inculcado en mí la preocupación por las aguas continentales en mi país y en el mundo.
- Al Dr. Georges Dreyfus, Dra Rocío Salceda, Dr. Zenón Cano, Dr. Efraín Tovar, Dra. Alicia Negrón, Dr. Antonio Lazcano, Dra. Hortensia González, Dra. Edna Suárez, Mta. Aurora Zlotnik, Mta. Marta González, Dra. Patricia Ramos, Dr. Manuel Miranda, Dr. Raúl Cárdenas, Dr. Guillermo Salgado, M. En C. Maciel R., Dr. Francisco Sour y Dra. Sara y a todo el demás personal académico y administrativo, por ser todos ellos grandes personas que enaltecen a nuestra Universidad y a esta tan prestigiosa Facultad; de quienes estamos muy orgullosos ya que contribuyeron personalmente de manera decisiva a mi formación como estudiante y como ser humano.
- "A mi mamita que le gusta bailar el son..." por representar el amor más puro y dedicado. Ella y nadie más merece esta dedicatoria por ser la promotora y patrocinadora de mis aspiraciones, sueños y dedicaciones (entre ellas el haber asistido a la Universidad). Le agradezco ser una imagen a quien admiro totalmente por ser mujer, maestra, mi mejor amiga y la mejor madre y padre del mundo.
- "Con agua transparente, pero con cuerpo ¡Cuidado!" porque te puede comer el corazón....". Este pequeño trabajo es fruto de un año de esfuerzo el cual se lo dedico a mi entrañable padre quien sembró tierras fértiles que permitieron la culminación de una cosecha onerosa. Honestidad, firmeza, lealtad y amor revolucionario son las enseñanzas más hermosas que recibí.

- "Ay Nicaragua Nicaragüita, la flor más linda de mi querer, abonada con la bendita Nicaragüita, sangre de viriangel...", a mi papá...descansa en paz...
- A mi amada Nube Blanca, pajita dorada...por tu solidaridad incondicional y los años maravillosos que pasé a tu lado....al príncipe guerrero y al niño del dedo inteligente...una esperanza..."
- Si me dijeras pide un deseo, te pediría un ramo de nubes...Bandjala y duniaki Geu Geu", por los maravillosos momentos que hemos pasado juntos y los que faltan...
- A mi abuelita Nehely, Dulce, Geña, Peque, Tía Rosy por ser todas ellas importantes pilares familiares.
- A la locura del CEDART y l@s grandes ami@s Jochi, Polla roris, Mariana, Roris roker, Ulises, Deni y Yair.
- A mis mejores amigas a quienes agradezco los millones de risas, viajes, lágrimas, orejas, críticas, bailes, locuras, desveladas y amor incondicional... Danielita, Fern, Gaby, Cronch, Ximena...
- A mis compañer@s y amig@s de la Facultad con quienes compartí una etapa inolvidable Boneko, Alessandra, Father Universe, El Buen Hermano Boné, Alejandra, Libertad, Antuan, José, Neto, Margarito, Pipiruches, Carolina, Emmanuel, Yael, Mariel, Adriana, Mariana, Yssel, Ixchel, Martín-sillo, Alina, Mariana K., Leonora, Joselyn, Karlita, la Culichi, Alejandra, Fernandino Camachi, Bernon, Citali, Andrea, Fernandito, Yosune, Ponchibonos, Rafa, Sumo, Betok, Olmo, Anita, Carlo, Sope, Santiagui, Yosune...
- Adair, Lucero, Rafacha...mi segunda familia y a quienes agradezco infinitamente su apoyo y su envidiable forma de amar.
- Ana Bananas, Renata, Olivia, Suzzane, Alejandra, Nour-dinne, Antuan y Jumex y demás brigada montrealense con quienes compartí este hermoso viaje de intercambio.
- A la vida y al caballo de la libertad con todo mi amor...Lo logramos amiga!!!!!!!

**Referencias**

(formato de *Hydrobiología*)

Alcocer, D. 1980. Aportaciones limnológicas al estudio del "Lago del Sol" y "Lago de la Luna", Nevado de Toluca, Edo. De México. Tesis de Licenciatura. U.A.M.I., 18 p.

Alcocer, J., Oseguera, L.A., Escobar, E., Peralta, L., Lugo, A. 2004. Phytoplankton biomass and water chemistry in two in two high mountain lakes in Central México. *Datos no publicados*.

Armienta, M.A., De la Cruz Reyna, L., Macías, J.L. 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *J. Volcan. Geo. Res.* 97:105-125.

Arriaga, L., Aguilar, V., Alcocer, J., Jiménez, R., Muñoz, E., Vázquez, E. (Coords.). 1998. Regiones hidrológicas prioritarias: fichas técnicas y mapa (escala 1:4000000). CONABIO. México. 142 pp + 1 mapa.

Banderas-Tarabay, A., González-Villela, R., Lanza-Espino, G. 1991. Limnological aspects of a high mountain lake in Mexico. *Hydrob.* 224: 1-10.

Banderas-Tarabay, A., González Villela R. Multivariate Analysis of the Primary Production in a Tropical High-Mountain Lake in México. *Datos no publicados*.

Banderas-Tarabay, A. 1997. Phycoflora of the tropical high-mountain lake El Sol, Central México, and some biogeographical relationships. *Hidrobo.* 354: 17-40.

- Barbieri, A., Veronesi, M., Simona, M., Malusardi, S., Staskrabova, V. 1999. Limnological survey in eight high mountain lakes located in Lago Maggiore watershed (Switzerland). *J. Limnol.* 58(2): 179-192.
- Barker, P., Street-Perrot, A., Perrot, R.A., Ficken, K.J., Swain, D.L. 2000. Diatom paleoproductivity in a high-altitude lake on Mt. Kenya: preliminary results from lake Rutundu. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27: 1003-1007.
- Barret, K., Schaug, J., Bartonova, A., Semb, A., Hjellbrekke, A.G., Hanssen, J.E. 2000. A contribution from CCC to the Re-evaluation of the observed trends in Sulphur and Nitrogen in Europe 1978-1998. EMEP/CCC-REPORT 7/2000, 195 pp.
- Battarbee, R.W. 1994. Diatoms, lake acidification and the surface water acidification programme (SWAP): a review. *Hydrob.* 274: 1-18.
- Becker, A., Bugmann, H. (eds.) 2001. Global Change and mountain regions. The Mountain Research Initiative. IGBP Report 49, GTOS (Report 28, IHDP Report 13. Estocolmo.
- Beniston, M., Díaz, H.F., Bradley, R.S. 1997. Climatic change at high elevation sites: An overview. *Clim. Change.* 36: 233-251.
- Biospherical Instruments Inc. PNF-300. 1996. *Profiling Natural Fluorometer User's Manual.* Biospherical Inc. San Diego, 105 pp.
- Blumthaler, M., Ambach, W., Rehwald, W. 1992. Solar UV-A and UV-B radiation fluxes at two alpine stations at different altitudes. *Theor. Appl. Climatol.* 46: 39-44.
- Caballero-Miranda. 1996. The diatom flora of two acid lakes in central Mexico. *Diat. Res.* 11: 227-240.

- Cabrera, M., López, M., Tartarotti, B. 1997. Phytoplankton and zooplankton response to UV radiation in a high-altitude Andean lake: short-versus long-term effects. *J. Plank. Res.* 19: 1565-1582.
- Catalán, L.C., García, E., Ballesteros, E., Felipe, M. 1994. Nitrogen in the Pyrenean lakes (Spain). *Hydrob.* 274: 17-28.
- Chamberlain, W.S., Booth, C.R., Kiefer, D.A., Morrow, J.H., Murphy, R.C. 1990. Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis and chlorophyll in the sea. *Deep-Sea Res.* 37 (6): 951-973.
- Cruz-Pizarro, L., Reche, I., Carrillo, P. 1994. Plankton dynamic in a high mountain lake (Las Yeguas, Sierra Nevada, Spain). Indirect evidence of ciliates as food source for zooplankton. *Hydrob.* 274: 29-36.
- Ferrier, R.C., Jenkins, A., Wright, R.F., Schopp, W., Barth, H. 2001. Assessment of recovery of surface water from acidification 1879-2000: An introduction to the Special Issue. *Hydro. Earth. Sys. Sci.* 5: 274-282.
- Findlay, D.L., Kasian, S.E.M. 1990. Response of phytoplankton community to controlled partial recovery from experimental acidification. *Canadian Journal of Fish. Aqua. Scs.* 48: 1022-1029.
- Føyn, L., Magnussen, M., Seglem, K. 1981. Automatic analysis of nutrients with on-line data processing. A presentation of the construction and functioning of the systems used at the Institute of Marine Research. *Fisken Hav., Serie B*, 4: 1-39.
- Fott, J., Prazáková, M., Stuchlík, E., Stuchlíková, Z. 1994. Acidification of lakes Sumava (Bohemia) and in the High Tetra Mountain (Slovakia). *Hidrob.* 274: 49-56.
- García, E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática Köppen. E. García. México. 217 pp.

Giardino, C., Pepe, M., Brivio, B.V., Ghezzi, P., Zilioli, E. 2001. Detecting chlorophyll, Secchi Disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat Imagery. *Sc. Tot. Env.* 268 (1-3): 19-29).

González-Villela, R., De la Lanza, G., Banderas-Tarabay, A. 2000. Dynamic models of primary production in a tropical High mountain lake: El Sol, Mexico. In: Aquatic Ecosystem of Mexico. (Eds.) Manahuar *et al.*, Ecovision World Monograph Series. Backhuys Publishers. Leiden. The Netherlands.

Gopal, B.; Wetzel, R.G. (Eds.). 1995. Limnology in the developing countries. Vol. 1. Internat. Association for Limnology, Internat. Scientific Publ., Nueva Dehli.

Goudsmith, G.H., Lemcke, G., Livingstone, D.M., Lotter, A.F., Muller, B., Sturm, M. 2000. Hagelseewli: a fascinating high mountain lake-suitable for paleoclimate studies? *Verh. Int. Verhr Theor. Angew. Limnol.* 27: 1013-1022.

Grasshoff, K. 1983. Methods of seawater Analysis. K. Grasshoff, M. Ehrharaat K., Kremling, R.(eds.) *Verl. Chem., Weinh.* 23:23-26.

Green, R.H. 1975. Sampling design and statistical Methods for Environmental Biologists. John Wiley & Sons. Toronto. 257 pp.

Gunkel, G. 2000. Limnology of an equatorial high Mountain lake in Ecuador, Lago San Pablo. *Limnol.* 30: 113-120.

Gunkel, G. 2002. Limnología de un lago tropical de Alta Montaña, en Ecuador: características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Rev. Biol. Trop.* 51 (2): 381-390.

Gunkel, G., Casallas, J. 2002a. Limnology of an equatorial high mountain lake, Lago San Pablo, Ecuador: The significance of deep diurnal mixing for lake productivity. *Limnol.* 32: 33-43.

Gunkel, G., Casallas, J. 2002b. Limnology of an equatorial high mountain lake, Lago San Pablo, Ecuador: limitation of lake productivity by deep diurnal mixing. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 28: 1818-1823.

Hecky, R.E., Kling, H.J. 1981. The phytoplankton and protozooplankton of the euphotic zone of lake Tanganyika; species composition, biomass, chlorophyll content and spatio temporal distribution. *Limnol. Oceanogr.* 26 (3): 548-564.

Hinder, B., Gabathuler, M., Steiner, B., Hanselmann, K., y Preisig, H. 1999. Seasonal dynamics and phytoplankton diversity in high mountain lakes (Jori lakes, Swiss Alps). *Pelagic food web in mountain lakes. Mountain Lakes Research Program. J. Limnol.* 59: 152-161.

Hutchinson, G.E.; Loffler, H. 1956. The thermal classification of lakes. *Hidrob.* 100: 101-112.

Kalff, J. 2002. *Limnology: inland water ecosystems.* Prentice Hall, Inc. EUA.

Kinzie, R.A., Banaszak, A.T., Lesser, M.P. 1998. Effects of UV on primary productivity in a high altitude tropical lake. *Hidrob.* 385: 23-32.

Kiersch, B., Muhleck, R., Gunkel, G. 2003. Las macrofitas de algunos lagos altoandinos del Ecuador y su posible utilización como bioindicadores. *Rev. Biol. Trop.* 51(4): en prensa

Klausmeier, C.A., Litchman, E. 2001. Algal games: The vertical distribution of phytoplankton in poorly mixed water columns. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1998-2007.

Koinig, K., Kamenik, C., Schmidt, R., Agusti-Panareda, A., Appbleby, P., Lami, A., Prazakova, M., Rose, N., Schnell, A., Tassandri, R., Thompson, R.,

Psenner, R. 2002. Environmental changes in an alpine lake (Gossenkollesee, Austria) over the two centuries: the influence of air temperature on biological parameters. *J. Paleolimnol.* 28: 147-160.

Kopáček, J., Ulrich, K., Hejzlar, J., Borovec, J., Stuchlík, E. 2001. Natural activation of phosphorus by aluminium in atmospherically acidified water bodies. *Wat. Res.* 35 (16): 3783-3790.

Koste, W., Bottger, K. 1989. Rotartorien aus Gewässern Equadors. *Amazonia.* 10: 407-438.

Lami, A., Machedo, A., Guillizzoni, P., Giorgis, A., Masafello, J. 1994. Paleolimnological records of carotenoids and carbonaceous particles in sediments of some lakes in Southern Alps. *Hydrobiol.* 274: 57-64.

Laurion, M., Ventura, J., Catalan, R., Psenner, R., Sommaruga, R. 2000. Attenuation of UV radiation in a mountain lakes : factors controlling the among and within lake variability. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1274-1288.

Lázaro, X. 1981. Biomass, peuplements phytoplantoniques et production primaire idu Lac Titicaca. *Rev. Hidrobiol. Tropic.* 14 (4): 349-380.

Lewis, W. M.Jr., Wibezañ, F.H. 1976. Chemistry, energy flow, and community structure in some Venezuelan freshwaters. *Archiv. Hidrobiol. Suppl.* 50: 142-207.

Lewis, W. M., Jr. 1987. Tropical limnology. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 18: 159-184.

Lewis, W.M. Jr, 1996. Tropical lakes: How latitude makes a difference. In Schiemer, F., y Boland, K.T. (eds.), *Perspectives in Tropical Limnology.* SPB. Amsterdam 43: 43-64.



- Löffler, H. 1960. Limnologische Untersuchungen an chilenischen und Peruvian Binnenge Wassern. *Ark. Geofisik.* 3: 155-254.
- Löffler, H. 1964. The limnology of tropical high-mountain lakes. *Internat. Verh. Internat. Verein. Limnol.* XV: 176-193.
- Löffler, H. 1972. Contribution to the limnology of high mountain lakes in Central America. *Int. Revues. Hidrob.* 57(3): 397-408.
- Marchetto, A., Lami, A. 1994. Reconstruction of pH by chrysophycean scales in some lakes of the Southern Alps. *Hydrob.* 274: 83-90.
- Marchetto, A., Barbieri, A., Mosello R., Tartari, G.A. 1994. Acidification and weathering processes in high mountain lakes in Southern Alps. *Hidrob.* 274: 75-82.
- Marchetto, A., Mosello, R., Psenner, R., Bendetta, G., Boggero, A., Tait, D., Tartari, G.A. 1995. Factors affecting water chemistry of alpine lakes. *Aquat. Sci.* 55: 81-89.
- Martínez, R. 1980. Seasonal variation of phytoplankton biomass and photosynthesis in the high-mountain lake La Caldera (Sierra Nevada, España). In: Dokulil, M., Metz, H., Jewson, D. (eds.), Shallow lakes. *Developments in Hydrobiology. The Hague* 3: 111-119.
- Melack, J.M. 1996. Recent developments in tropical limnology. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 211-217.
- MOLAR Water Chemistry Group. 1999. The MOLAR project: atmospheric deposition and water chemistry. *J. Limnol.* 58 (2): 88-102.
- Mosello, R., Marchetto, A., Brizzion, M.C., Tartari, G.A., Rogora, M. 1999. Plurianual evolution of the hydrochemistry of two alpine lakes (Lake Paione Inferiore and

Lake Paione Superiore, Ossola Valley) in relation to atmospheric loads. *J. Limnol.* 58: 43-49.

Mosello, R., Marchetto, A., Brizzio, M.C., Rogora, M., Tartari, G.A. 2000. The Italian participation in the international cooperative programme on assessment and monitoring of acidification of rivers and lakes (ICP Waters). *J. Limnol.* 59: 47-54.

Murugavel, P., Pandian, T.J. 2000. The effect of altitude on hydrology, productivity and species richness in Kodayar-a tropical peninsular Indian aquatic system. *Hidrob.* 430: 33-57.

Nauwerck, A. 1980. Phytoplankton. In Westlake, D.F. (coord.), Primary production. In: Le Cren, E.D., and Lowe-McConnell, R.H. (eds.), The functioning of freshwater ecosystems. Cambridge University Press. Cambridge. pps 200-203.

Nauwerk, A. 1994. A survey on water chemistry and plankton in high mountain lakes in Northern Swedish Lapland. *Hidrob.* 274: 91-100.

Payne, A.I., 1986. The ecology of tropical lakes and river. Wiley. New York. 301 pp.

Pechlaner, R. 1971. Factors that control the production rate and biomass of phytoplankton in high Mountain lakes. *Mitt. Int. Verein. Limnol.* 19: 125-145.

Psenner, R. 1994. Environmental impacts of freshwaters: acidification as a global problem. *Elsevier Sci. B.V.*34: 345-360.

Psenner, R., Schmidt, R. 1992. Climate driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nat.* 356: 781-783.

Psenner, R., Mosello, R., Boggero, A., Marchetto, A., Wathne, B., Lien, L. 2000. Mountain lake Research (MOLAR): atmospheric deposition and lake water chemistry. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 27: 1008-1012.

Pugnetti, A., Bettinetti, R. 1999. Biomass and species structure of the phytoplankton of a high mountain lake (Lake Paione Superiore, Central Alps, Italy). *J. Limnol.* 58 (2): 127-130.

Queimaliños, C. 2002. The role of phytoplankton size fractions in the microbial food webs in two north Patagonian lakes (Argentina). *Verh. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol.* 28: 1236-1240.

Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Amer. Sci.* 46: 205-221.

Reynolds, C.S. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Ed. Cambridge University Press. Studies in Ecology. 384 pp.

Rhode, W. 1962. Sobre la producción de fitoplancton en lagos transparentes de alta montaña. *Istit. Ital. Idrobiol.* 15: 21-28.

Rogora, M., Mosello, R., Arisci, S. 2003. The effect of climate warming on the hydrochemistry of alpine lakes. *Wat. Air. Soil. Poll.* 148: 347-361.

Rogora, M., Mosello, R.; Marchetto, A. 2004. Long term-trends in the Chemistry of atmospheric deposition in NW Italy: the role of increasing Saharan dust deposition. *Tellus B.* (en iprensa).

Roldán, G. 1992. Fundamentos de limnología neotropical. Ed. Universidad de Antioquia. 529p.

Rzedowski, J. 1981. La vegetación de México. LIMUSA. México. 730 pp..

Sarma S. S., Elías-Gutiérrez M., Serranía C. 1996. Rotifers from high altitude-lakes at Nevado de Toluca Volcanoe. *Hydrob.* 6: 33-38.

Schnider, K.; Mauser, W. 1996. Processing and accuracy of Landsat thematic mapper for lake surface temperature measurement. *J. Rem. Sens.* 11: 2027-2041.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Morales-Puente, P., Arias-Herreia, A., Vallejo-Gómez, E., Jasso-Castañeda, C. 2003. Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico as indicators of paleoenvironments and soil evolution. *V International Symposium and field workshop, Suzdal, Rusia.* 106-107: 169-184.

Simona, M., Barbieri, A., Varonesi, M., Malusardi, S., Straskrabova, V. 1999. Seasonal dynamics in plankton in a mountain lake in the southern Alps (Laghetto Inferiore, Switzerland). *J. Limnol.* 58(2): 169-178.

Schanz, F., Borer, A., Kiefer, B. 2001. Factors influencing the time scale of vertical phytoplankton distribution in a mountain lake (Lake Waegital, Switzerland) *Verh. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol.* 27: 3766-3769.

Sommaruga, R., Psenner, R. 1997. UV radiation in a high Mountain lake of Austrian Alps: air and underwater measurements. *Photochem. Photobiol.* 65: 957-963.

Sommaruga, R., García-Pichel, F. 1999. UV-absorbing mycosporine-like compounds in planktonic and benthic organisms from a high mountain lake. *Archiv. Hydrobiol.* 144 (3): 255-269.

Sommaruga, R., Psenner, R., Schaffner, E., Koinig, A., Sommaruga-Woegrath S. 1999. Dissolved organic carbon concentration and phytoplankton biomass in high mountain lakes of the Austrian Alps: potential effect of climatic warming on UV underwater attenuation. *Artic, Antartic. Alpine Res.* 3: 247-253.

Sommaruga, R. 2001. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *J. Photochem. Photobiol. B: Biology.* 62 (1-2): 35-42.

Stockner, J.G., Shortreed, K.S. 1994. Autotrophic picoplankton community dynamics in pre-alpine lake in British Columbia, Canada. *Hydrob.* 274: 133-142.

Strickland, J., Parsons, T. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin of fisheries Research Board of Canada.* 167: 1-311.

Straskrabová, V., Callieri, C., Carrillom P., Cruz- Pizarro, L., Fott, J., Hertman, P., Macek, M., Medina-Sánchez, J.M., Nedoma, J., Simek, K. 1999. Investigations on pelagic food web in mountain lakes aim and methods. In: Straskrabová, V., Callieri, C., Fott, J. (eds.). Pelagic food web in mountain lakes. Mountain Lakes Research (MOLAR). *J. Limnol.* 58 (2): 88-106.

Tait, D., Thaler, B. 2000. Atmospheric deposition and lake chemistry trends at high mountain site in the eastern Alps. *J. Limnol.* 59: 61-71.

Tartari, A. 1995. Factors affecting water chemistry of alpine lakes. *Aquat. Scs.* 57: 81-89.

Teubner, K. 2003. Phytoplankton, pelagic community and nutrients in a deep oligotrophic alpine lake: ratios as sensitive indicators of the use of P-resources (DRP:DOP:PP and TN:TP:SRS). *Wat. Res.* 37(7): 1583-1592.

Thies, H. 1994. Chemical properties of an acidified humic headwater respect to reducing acidic depositions and expected climate change. *Hydrob.* 274: 143-154.

Thomasson, K. 1956. Reflections on arctic and alpine lakes. *OJKOS.* 7: 1956.

Tizler, M., Bindloss, M.E. 1980. Effects of phytoplankton. In: D.F. Westlake (eds.), Primary production. In: Le Cren, E.D., Lowe-Mc-Conell, R.H. (eds.), The functioning of freshwater ecosystems. Cambridge University Press. Cambridge: 156-161.

Viaroli, P., Ferrari, I., Paris, G., Rosseti, G., Menozzi, G. 1994. Limnological research on northern Appennines lakes (Italy) in relation to eutrophication and acidification risk. *Hydrob.* 274: 155-162.

Vincent, W.F., Rae, R., Laurion, I., Howard-Williams, C., Priscu, J.C. 1998. Transparency of Antarctic lakes to solar UV radiation. *J. Limnol. Oceanogr.* 43: 618-624.

Vollenweider, R.A., Kerekes, J.J. 1982. Eutrophication of waters: monitoring assessment and control. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris. pp.123-200.

Vynhálek, V., Fott, J., Kopacek, J. 1994. Chlorophyll-phosphorous relationship in acidified lakes on the High Tetra Mountains (Slovakia). *Hydrob.* 274: 171-177.

Widmer, C., Richerson, P. 1975. A survey of the biological limnology of Lake Titicaca. *Verh. Int. Verein. Theo. Angew. Limnol.* 19: 1504-1510.

Winder, M., Spaak, P. 2001. Carbon as an indicator of *Daphnia* condition in an alpine lake. *Hydrob.* 442 (1-3): 269-278.

Wotjan, K., Galos, J. 1994. Acidification of small mountain lakes in the High Tetra mountains, Poland. *Hydrob.* 274: 179-182.

Wurtsbaugh, W., Vincent, W., Alfaro-Tapia, R., Vincent, C. 1985. Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, lake Titicaca (Peru/Bolivia). *Freshwat. Biol.* 15: 185-195.

Zobrist, J., Drever, J.I. 1989. Weathering Process in Alpine Watersheds Sensitive to Acidification, In: Proceedings of the EEC workshop Acidification Processes in

Remote Mountain Lakes, *Air Poll. Res. Rep.* Vol. 20. Pallonza. 20-22. Junio 1989. pp  
179-261.