

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología

Universidad Nacional Autónoma de México



**DINÁMICA LIMNOLÓGICA ESTACIONAL E
INTERANUAL DE DOS LAGOS TROPICALES DE ALTA
MONTAÑA: EL SOL Y LA LUNA, NEVADO DE
TOLUCA, MÉXICO.**

T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestra en Ciencias

P r e s e n t a

DIANA IBARRA MORALES

Director de Tesis:

DR. JAVIER ALCOCER DURAND

Comité Tutorial:

DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA

DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ

DR. ALFONSO LUGO VÁZQUEZ

DRA. GLORIA VILA CLARA

México D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatoria

A Francisco Cuéllar Pérez, mi gran amigo y excelente compañero de vida. ¡¡¡La aventura nos aguarda!!!

A mi Leonardo hermoso, a veces azul brillante como el mar en un día de verano y, otras veces, azul oscuro como un mar de tempestad.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría y la realización de este proyecto.

A los siguientes proyectos por su apoyo financiero: Los lagos del Nevado de Toluca, México: centinelas para la detección y análisis del cambio ambiental global [Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC), UNAM, 2012-2014] y Lagos de alta montaña en México. Estudio de la factibilidad para considerar los lagos del Nevado de Toluca, México, como sitios de referencia para la detección y análisis del cambio climático global (*Global Environmental Change*) (Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGAPA-ES209301, UNAM).

Al servicio Meteorológico Nacional (SMN) por proporcionar la información climatológica registrada en la estación meteorológica automática, ubicada en el Nevado de Toluca.

A la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF), Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México por el permiso de acceso y muestreo al Parque Nacional.

Al proyecto de investigación en Limnología Tropical (PILT) de la FES Iztacala por proporcionar los datos con los que se realizó este proyecto.

A las siguientes personas por su apoyo en el campo y/o laboratorio: Dr. Luis A. Oseguera, Brenda Hernández, Clara Delgado, Ma. del Carmen Hernández, Maribel Rojas, Ana Regina Salazar, Citlali Díaz, José Antonio Salas, Vilma S. Ardiles, Nohemí Dimas.

Al personal académico-administrativo del Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por el apoyo brindado de manera eficiente y amable.

A mi director de tesis, Dr. Javier Alcocer Durand por sus valiosos comentarios, por la confianza que depositó en mí para la realización de este proyecto y por defender en todo momento el esfuerzo y trabajo invertidos en el proyecto.

A los miembros de mi comité tutorial, Dres. Alfonso Lugo Vázquez y Margarita Caballero Miranda por el tiempo, la asesoría y guía brindada para la realización de este proyecto. Especialmente le agradezco al Dr. Lugo su paciencia, amabilidad y tiempo dedicado a asesorarme en los aspectos estadísticos de la tesis.

A los Dres. Javier Carmona Jiménez y Gloria Vilaclara Fatjó por su participación como miembros del jurado, lo que implicó la aportación de sus oportunos y acertados comentarios que ayudaron a mejorar mi proyecto de investigación.

A mis papás (Angélica y Juan) y hermanos (Nonantzin, Elisa y Juan) por animarme siempre y apoyarme de diversas maneras en todo lo que hago.

A mis suegros (Ángeles y Fortino) quienes también me han apoyado incondicionalmente.

Al M. en C. Francisco Cuéllar Pérez por el tiempo, desvelos, ideas, regaños y todo el trabajo que invertiste para que terminara con éxito este proyecto.

Índice

Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Estudios limnológicos a largo plazo	10
Justificación.....	14
Hipótesis	14
Objetivo general.....	14
Objetivos particulares	14
Área de estudio	15
Material y Métodos	16
Trabajo de campo	16
Trabajo de Laboratorio	17
Nutrientes	17
Medición de clorofila “a”	17
Trabajo de gabinete	18
Análisis estadísticos	18
Resultados.....	19
Comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica a lo largo de cada uno de los periodos de muestreo lagos en ambos lagos.	19
El Sol 2000-2001.....	19
La Luna 2000-2001	19
El Sol 2006-2007.....	20
La Luna 2006-2007	20
Variaciones en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos ciclos anuales en cada uno de los lagos	23
Parámetros fisicoquímicos de El Sol	23
Temperatura	23
Oxígeno disuelto (OD).....	24
pH.....	25
Conductividad (K ₂₅)	26
Radicación fotosintéticamente activa (PAR).....	27

Nutrientes	28
Biomasa fitoplanctónica de El Sol	35
Concentración de clorofila “a” (Clor-a).....	35
Parámetros fisicoquímicos de La Luna.....	37
Temperatura	37
Oxígeno disuelto (OD).....	38
pH.....	39
Conductividad (K ₂₅)	40
Radicación fotosintéticamente activa (PAR).....	41
Nutrientes	42
Biomasa fitoplactónica de La Luna	49
Concentración de clorofila “a” (Clor-a).....	49
Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos lagos en el periodo de muestreo 2000-2001	51
Temperatura	51
Oxígeno disuelto (OD).....	52
pH.....	53
Conductividad (K ₂₅)	54
Radicación fotosintéticamente activa (PAR).....	55
Nutrientes	56
Nitrógeno como nitritos (N-NO ₂).....	56
Nitrógeno como nitratos (N-NO ₃)	57
Nitrógeno como amonio (N-NH ₄)	58
Nitrógeno inorgánico disuelto (NID).....	59
Fósforo soluble reactivo (P-PSR).....	60
Sílice soluble reactivo (Si-SiSR).....	61
Cociente de Redfield (NID:P-PSR)	62
Comparación de la biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2000-2001	63
Clorofila “a” (Clor-a).....	63
Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos lagos en el periodo de muestreo 2006-2007	65
Temperatura	65
Oxígeno disuelto (OD).....	66

pH.....	67
Conductividad (K ₂₅)	68
Radicación fotosintéticamente activa (PAR).....	69
Nutrientes	70
Nitrógeno como nitritos (N-NO ₂)	70
Nitrógeno como nitratos (N-NO ₃)	71
Nitrógeno como amonio (N-NH ₄)	72
Nitrógeno inorgánico disuelto (NID).....	73
Fósforo soluble reactivo (P-PSR).....	74
Sílice soluble reactivo (Si-SiSR).....	75
Cociente de Redfield (NID:P-PSR)	76
Comparación de la biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2006-2007	77
Concentración de clorofila “a” (Clor-a).....	77
Discusión	79
Estacionalidad	79
Temperatura y cambio climático	79
¿Acidificación o basificación, producto del cambio global?	80
Oxigenación del sistema	83
¿Fósforo y nitrógeno como limitantes en la producción primaria?	83
Mineralización (Sólidos Totales disueltos y K25)	84
Introducción de especies exóticas	85
Conclusiones	86
Bibliografía	87
Anexos.....	94

Resumen

Los lagos de alta montaña se ubican por encima de la cota de vegetación arbórea, que en el caso de los tropicales, alcanza los 3,500 a 4,800 m s.n.m. Son lagos frecuentemente polimícticos y, por su elevada altitud, están sujetos al fuerte impacto de la radiación UV; comúnmente son pobres en materia inorgánica y orgánica disueltas y su pH es ácido. En general, representan sitios remotos y de escasa perturbación antropogénica. Estos cuerpos acuáticos tienden a ser sensibles al cambio global y pueden ser excelentes centinelas del mismo. Sin embargo, para utilizarlos como sensores de dicho cambio es preciso reconocer sus procesos naturales, para distinguirlos de los cambios antrópicos. Por tal motivo, en la presente investigación se caracterizó la variabilidad estacional e interanual de los dos lagos ubicados en el cráter del volcán Nevado de Toluca, El Sol y La Luna, comparando dos ciclos anuales con una separación temporal de 5 años (2000-2001 y 2006-2007). Se midieron variables físicas y químicas (temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, porcentaje de la radiación fotosintéticamente activa que alcanza el fondo y nutrientes), así como la concentración de clorofila "a".

Se detectó un proceso de basificación en ambos lagos, cuya causa no se pudo explicar con base en los parámetros evaluados, ni parece asociado con un cambio climático regional, precipitación ácida o depósito de contaminantes atmosféricos. En el resto de los parámetros analizados se encontró que existen variaciones; sin embargo, estas probablemente son intrínsecas a los procesos limnológicos naturales de cada lago, donde la estacionalidad deriva de la ubicación latitudinal y altitudinal y no al cambio climático regional, ni a posibles impactos antrópicos locales.

Abstract

High mountain lakes are located above the timberline, which in the tropics reaches between 3,500 and 4,800 m a.s.l. They are often polymictic and due to their high altitude received high amounts of UV radiation. Their waters are acidic and with low concentration of dissolved inorganic and organic matter. High mountain lakes are located in remote and undisturbed areas of the planet. Their environmental conditions make these lakes vulnerable to acid rain, air pollutants, and climate change. This “susceptibility” makes them natural sentinels of global change. However, to be used as sensors of global or regional change it is necessary to know their natural variability to be able to differentiate it from the anthropogenic change. We analyzed the seasonal and interannual variability of two tropical, high mountain lakes, El Sol and La Luna, comparing two annual cycles with a temporal separation of 5 years: 2000-2001 and 2006-2007. We measured physical and chemical parameters (temperature, pH, dissolved oxygen, conductivity, percent of photosynthetically active radiation reaching the bottom, nutrients) as well as phytoplankton biomass expressed as chlorophyll *a* concentration.

A basification process in both lakes was detected. The cause could not be explained with the evaluated parameters, not by regional climatic change association, acidic rain or atmospheric pollution deposition. There exists variation in the rest of the analyzed parameters. However, those are probably intrinsic to natural limnological processes of each lake, where seasonality is derived of latitudinal and altitudinal location.

Introducción

Los lagos de alta montaña o alpinos se caracterizan por ubicarse por arriba de la cota de crecimiento de la vegetación arbórea (Figura 1). La altitud de ésta depende de la latitud lo que repercute tanto en la temperatura como la humedad ambiental. La cota de vegetación arbórea se ubica a mayor altitud en latitudes más bajas (Sommaruga, 2001); en latitudes tropicales se localiza entre los 3,500 y los 4,800 metros sobre el nivel del mar (Margalef, 1983). Debido a su elevada altitud, los lagos tropicales de alta montaña tienen condiciones climáticas similares a los lagos templados y árticos. Ejemplos de esto son las bajas temperaturas del agua (3 a 10° en la superficie), la presencia de nieve y, en ocasiones, una capa de hielo que cubre la superficie del lago (Löffler, 1964, Margalef, 1983). Sin embargo, el patrón de radiación solar diario y anual es diferente entre ellos; en los trópicos hay una radiación continua y de intensidad similar durante todo el año, motivo por el cual no se observa una estacionalidad tan marcada como en las regiones templadas (Lewis, 1996).



Figura 1.- Cota de vegetación arbóreas en el volcán Nevado de Toluca ubicado \approx 4,200 m s.n.m.

Los lagos tropicales de alta montaña son ambientes que se caracterizan por tener aguas con bajas temperaturas, es decir entre los 3 y los 10° C, debido a que la mayoría son someros y tienen una circulación frecuente, presentan un régimen térmico más uniforme durante todo el año por lo que se describen como polimícticos ya sea cálidos o fríos. Únicamente algunos lagos

tropicales de alta montaña tales como el Titicaca, presentan una termoclina bien definida debido a su gran profundidad que, en ese caso, es de 107 m en promedio (Thomasson, 1956).

La incidencia de la radiación ultravioleta (RUV) es mayor en este tipo de ambientes debido a que presentan una atmósfera más reducida con baja humedad y bajo contenido de ozono (Löffler, 1964; Sommaruga, 2001). Además, se caracterizan por presentar aguas poco mineralizadas, pH bajo –ácido- y concentración de materia orgánica reducida (Sommaruga, 2001). Sus cuencas están conformadas por una cubierta vegetal muy pobre y suelos poco desarrollados (Granados *et al.*, 2006).

Estudios limnológicos a largo plazo

Está aceptado por la comunidad académica que las respuestas a muchas preguntas ecológicas tales como la respuesta a fuerzas externas como los ciclos climáticos o calentamiento global que se manifiestan en largas escalas de tiempo solo pueden responderse con estudios de largo plazo (Larson, *et al.*, 2007). La mayoría de los trabajos limnológicos realizados hasta el momento en lagos de alta montaña han sido llevados a cabo principalmente en las regiones templadas y alpinas. Comparativamente, son pocos los estudios que hasta ahora se han desarrollado en sistemas acuáticos de alta montaña en zonas tropicales (Casallas y Gunkel, 2001).

En la actualidad diversos grupos realizan seguimiento a largo plazo de cuerpos lacustres. Sin embargo, dado que cada lago presenta características propias determinadas por la latitud, longitud, altitud, profundidad, cuenca de captación, composición química de la misma, origen geológico, resulta complicado contrastar los datos. Sin embargo, son útiles en cuanto a los enfoques de estudio y la interpretación de las variaciones halladas.

Uno de tales proyectos es el liderado por Gary L. Larson, Robert Collier y Mark W. Buktenica en el *crater lake* en el estado norteamericano de Oregon. Ese proyecto integra investigaciones interdisciplinarias físicas, biológicas y geoquímicas de más de 20 años. Con los datos recabados y dentro de los límites de los métodos empleados, no se ha identificado ningún cambio en las condiciones generales de la calidad de sus aguas que corresponda con actividades humanas en el periodo de observación y sugieren que el lago permanece en condiciones prístinas. Es importante destacar que los reportes publicados por este grupo son un excelente ejemplo de cómo el monitoreo a largo plazo es esencial para la comprensión de los ecosistemas y su relación con las actividades humanas.

También está el grupo de Ignacio Granados, Manuel Toro y Ángel Rubio-Romero quienes dieron seguimiento por diez años a la Laguna Grande de Peñalara, España con numerosos estudios. Dentro de sus investigaciones abarcan análisis del sedimento, análisis físicoquímicos en la columna de agua y la biota presente dentro del lago. Esta serie de estudios dio como resultado una caracterización típica de los lagos de alta montaña, es decir, bajas temperaturas (-5 a 20 °C), baja conductividad (10 $\mu\text{S cm}^{-1}$), una baja alcalinidad (40–60 μeq

L⁻¹) y un pH ácido (6.2), esta última característica atribuida a la poca capacidad del agua de amortiguar cualquier alteración.

Un proyecto de mayor alcance es el que representa el proyecto MOLAR (*Mountain Lake Research*) auspiciado por la unión europea (UE). Este proyecto conjunta una red de diversas instituciones y universidades europeas. Se construyó como continuación de otros dos proyectos de largo alcance financiados por la Unión Europea: AL:PE. 1 (Acidificación de lagos de montaña remotos: Paleolimnología y ecología) y AL:PE. 2 (Lagos de alta montaña como indicadores de contaminación del aire y ecología). Los proyectos AL:PE evaluaron el estado de diversos lagos de alta montaña a lo largo de Europa sobre las bases del registro de núcleos sedimentarios e investigaciones químicas y biológicas. El proyecto MOLAR se enfoca en estudios detallados de 23 lagos clasificados como alpinos y subalpinos localizados en regiones alpinas y árticas, en áreas con lechos rocosos calcáreos y de los que se tienen datos de estaciones meteorológicas de al menos 200 años, para proveer datos de alta resolución de sus dinámicas temporales que pueden ser usados para desarrollar y calibrar modelos de predicción. El enfoque de esta investigación ha sido la respuesta al cambio climático en los lagos de alta montaña y es un proyecto modelo para el estudio de estos fenómenos a nivel mundial.

En regiones tropicales destacan los estudios realizados por diversos investigadores en el lago Titicaca. Los investigadores Claude Dejoux y André Ittis recopilaron los principales trabajos científicos elaborados durante un largo tiempo por estudiosos franceses y bolivianos realizados hasta el año de 1991. Si bien estos estudios no se engloban en el marco de un proyecto de largo alcance, abordan diversos enfoques tales como geomorfología y sedimentación, paleohidrología, clima e hidrología, fisicoquímica y comunidades biológicas. Estos estudios arrojaron, entre otras cosas, que el lago titicaca presenta un pH básico con aguas muy poco mineralizadas donde los bicarbonatos predominan. Adicionalmente han reportado una baja concentración de nitrógeno y una concentración de fósforo soluble reactivo de hasta 24 $\mu\text{g L}^{-1}$ que lo cataloga como lago mesotrófico. Y sus concentraciones de clorofila "a" presentan un intervalo de 0,5 a 4 mg L^{-1} .

Si bien no existe un proyecto similar para los lagos del nevado de Toluca, diversos investigadores han realizado esfuerzos independientes, que aportan una base de datos de diversas variables que conforman el conocimiento actual sobre este sistema.

Dentro de los estudios realizados en uno o ambos lagos destacan principalmente las investigaciones relacionadas con fitoplancton. Löffler (1972) incluyó a El Sol en un estudio biogeográfico acerca del plancton en diversos lagos tropicales en el norte de los Andes y Centroamérica; encontró nexos paleogeográficos demostrados por la gran similitud en la composición de especies de algas. Banderas (1984, 1988) estudió la taxonomía y distribución del fitobentos en El Sol encontrando que ciertas especies se encuentran restringidas a determinadas profundidades. Banderas (1994) menciona que las variaciones climáticas tienen un efecto más importante en la estructura de la comunidad fitobentónica del lago El Sol que las variaciones fisicoquímicas del agua. Caballero (1996) encontró que la riqueza y la composición

de especies de especies de diatomeas es mayor en El Sol (19 especies) que en La Luna (9 especies). Lo anterior lo atribuyó a la menor conductividad y pH en La Luna. Alcocer *et al.* (2004) estudiaron la dinámica de la biomasa fitoplanctónica a través de la evaluación de la fluorescencia natural de la clorofila “a” en la columna de agua. En La Luna se observó un perfil homogéneo, mientras que en El Sol se encontró un máximo por encima del sedimento. También reportan que la biomasa fitoplanctónica en La Luna fue significativamente menor que en El Sol.

Adicionalmente se han estudiado las características morfométricas y fisicoquímicas de estos lagos. Alcocer (1980) realizó la caracterización batimétrica, morfométrica y sedimentológica de ambos lagos. En su trabajo reporta que aunque ambos lagos son someros El Sol es mucho mayor en área, volumen y profundidad que La Luna, y que sus sedimentos tampoco son iguales; los lodos predominan en El Sol y las arenas en La Luna. Armienta *et al.* (2000) evaluaron la química acuática de del lago El Sol encontrando valores de conductividad (18 mS/cm), pH (entre 5 y 6), y la concentración de iones sin cambios cuando se los compara con datos de Caballero-Miranda (1996). Lo cual se asoció con la inactividad del volcán. Alcocer *et al.* (2004) encontraron que la columna entera de ambos lagos era zona eufótica puesto que el PAR registrado en el fondo fue > 1% durante todo el año. Con una temperatura media anual de 8.5°C tanto en El Sol como en La Luna y diferencias en la vertical mínimas que indicaban una buena mezcla en la columna de agua de ambos lagos. Encontraron también que ambos lagos tenía agua bien oxigenadas, de pH ácido (4.5-7) similar a lo reportado en nueve lagos ácidos estudiados por el grupo del proyecto MOLAR en 1999. Además de que ambos lagos se caracterizaban por tener bajas concentraciones de sólidos disueltos y nutrientes. Más adelante Armienta *et al.* (2008) caracterizó la composición iónica de estos lagos encontrando ambos lagos tiene una baja alcalinidad y diferencias importantes en la concentración iónica entre El Sol y La Luna.

Por otra parte se han realizado estudios de otras formas de vida presentes en los lagos. Sánchez *et al.* (2004) analizaron la variación del bacterioplancton en ambos lagos encontrando que las densidades bacterianas fueron bajas, menores a las encontradas en otros lagos oligotróficos, con valores de entre 4.3×10^4 y 1.6×10^5 bacterias/m^L, indicando un estado intermedio entre la ultraoligotrofia y la oligotrofia. Donde el bacilo fue el morfotipo más abundante. También encontraron que en El Sol hay una mayor densidad bacteriana que en La Luna. Hernández (2008) describió la dinámica espacial y temporal del seston en ambos lagos. En este estudio se encontró que en El Sol presentó una concentración promedio de 1.53 ± 0.34 mg L⁻¹ la cual fue mayor a la encontrada en La Luna con un valor de 0.65 ± 0.15 mg L⁻¹. Por otra parte Delgado (2008) observó que los compuestos fotoprotectores juegan un papel muy importante para la protección del zooplancton de estos dos lagos ante las elevadas dosis de radiación UV (RUV). También encontró que en ambos lagos el zooplancton realiza un patrón de migración vertical “normal” como una estrategia de protección a la incidencia de RUV, esto es, asciende a la superficie al anochecer y descienden al fondo al amanecer. El zooplancton pigmentado se distribuyó en toda la columna de agua mientras que el hialino lo hizo de media agua hacia el fondo. Finalmente Dimas *et al.* (2008) estudiaron la dinámica zooplanctónica. Encontraron un total de 35 especies distribuidas en ambos lagos. En cuanto a la abundancia y la biomasa

zooplanctónica se encontraron valores mayores en El Sol, lo cual se atribuyó a que en La Luna se presenta una mayor acidez lo que indirectamente limita la disponibilidad de alimento.

Los trabajos anteriores hacen evidente que a pesar de que El Sol y La Luna se encuentran en la misma zona influenciados por las mismas condiciones, las diferencias entre ellos son numerosas. Por lo que surge la pregunta de si podrían responder de manera diferente al impacto humano y a cambios ambientales.

En ese sentido Cuna y cols. (2014) realizaron un estudio paleolimnológico en La Luna que abarca de 1210 a 2010. Sus resultados arrojaron que en el periodo más frío y más seco, que corresponde con el mínimo de Maunder en la actividad solar, presentó especies de cladóceros de agua fría, una de estas fue *Daphnia ephippia*. Identificaron también una tendencia de calentamiento, aproximadamente en el periodo de 1760 a 1910 d.C., caracterizado por un ensamblaje de diatomeas dominado por especies con afinidades por valores de pH mayores a 6. Este ensamblaje, debido al estrés ambiental al que estuvo sometido, difiere del que se encuentra actualmente. No encontraron evidencia clara de cambio ambiental moderno inducido por el hombre por lo que sugieren que el lago La Luna es un sitio ideal en México para monitorear los impactos futuros del cambio global. Dentro de este trabajo se sumó lo encontrado por Zawisza *et al.* (2012) quienes en el análisis de la secuencia de sedimentos encontraron 5 especies de cladóceros. Observaron que la comunidad de cladóceros estuvo dominada por especies litorales. Encontraron que la especie *Ilyocryptus nevadensis* es endémica. El cambio más notable en el ensamble de cladóceros fue observado entre los años 1683–1780, periodo que se correlacionó con la pequeña edad de hielo. Los resultados arrojaron que el estado “moderno” de Lago La Luna ha permanecido sin cambios desde hace 400–500 años. Posteriormente Cuna (2015) reportó lo encontrado en el estudio paleolimnológico realizado en El Sol, donde la edad para la muestra más antigua fue de 250 d. C. En este estudio se identificaron dos etapas que se interpretan como de pH menos ácido. La primera al inicio del registro (100-750 d.C.) la cual concuerda con evidencias de niveles lacustres bajos, que correlacionan con periodo que se conoce con la “sequía Maya”. La segunda etapa se reconoce después de 1900 d. C., como el resultado de la introducción de Trucha asociado con la tendencia actual hacia el calentamiento y con un incremento notable en 2010 de su estado trófico.

Los estudios paleolimnológicos son muy importantes y útiles para obtención de información de gran calidad acerca de lo acontecido en el pasado, sin embargo es importante también la información que se obtiene mediante las técnicas de la Limnología clásica debido a que permite medir en tiempo real algunos factores que difícilmente se pueden estimar en los sedimentos. Un ejemplo de ello es la concentración de fósforo en un cuerpo de agua en un momento o periodo determinado.

El hacer una comparación entre diferentes momentos del tiempo de las variables fisicoquímicas y biológicas de El Sol y de La Luna podría complementar la información acerca de los impactos humanos o de las variaciones naturales dentro de este tipo de ambientes.

Justificación

Los cuerpos de agua de las regiones de alta montaña se cuentan entre los sitios más remotos y, en general, con menor perturbación antrópica del planeta; sin embargo y a pesar de lo apartado de su ubicación, ni siquiera estas regiones se encuentran exentas de las amenazas producto del cambio global (p. ej., la precipitación ácida, los contaminantes atmosféricos tóxicos o el cambio climático). Los lagos localizados en estas regiones son especialmente sensibles a los factores de cambio global. Debido a esta sensibilidad, los lagos de alta montaña no solo son vulnerables al cambio ambiental, sino que tienden a ser excelentes sensores del mismo. Pero para poder afirmarlo con seguridad, es preciso reconocer primero la variabilidad natural en sus procesos fisicoquímicos y biológicos, para distinguirlos de aquellos cambios inducidos antrópicamente.

Hipótesis

Por ser lagos de alta montaña, ubicados por encima de la cota de vegetación arbórea, y por sus características fisicoquímicas, El Sol y La Luna son sensibles al cambio climático y al efecto de los contaminantes atmosféricos, como ha sido encontrado en otros lagos de alta montaña. Por lo anterior, se espera que El Sol y La Luna presenten evidencias de cambio climático regional.

Objetivo general

Reconocer si existen y cuáles son las posibles alteraciones inducidas por el cambio global, regional o local, en los lagos tropicales de alta montaña El Sol y La Luna, Nevado de Toluca, México, mediante la comparación del comportamiento estacional (intra-anual) e interanual de dos ciclos, 2000-2001 y 2006-2007.

Objetivos particulares

- 1.- Caracterizar el comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica a lo largo de cada uno de los periodos anuales (2000-2001 y 2006-2007) en cada uno de los lagos.
- 2.- Reconocer las variaciones ocurridas entre ambos ciclos anuales con cinco años de separación en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica en cada uno de los lagos.
- 3.- Comparar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos lagos en cada uno de los ciclos anuales.

Área de estudio

El volcán Nevado de Toluca está ubicado a 19°09' N y 99°45' O, a 23 km en dirección suroeste de la ciudad de Toluca (Figura 2); con una elevación de 4 680 m s.n.m. (Macías, 2005). Es un volcán estromboliano constituido por andesitas y dacitas calcialcalinas (Bloomfield y Valastro, 1974; García-Palomo *et al.*, 2002; Armienta *et al.*, 2000). La formación de su estructura moderna se inició hace aproximadamente 0.1 Ma con la emisión de productos dacíticos que dieron lugar a actividad de tipo explosiva (Macías *et al.*, 1997a; García-Palomo *et al.*, 2002). Durante los últimos 50 000 años ha tenido una actividad muy intensa; su última erupción fue hace aproximadamente 3 300 ¹⁴C años AP (Macías *et al.*, 1997a; Macías, 2005). Los flancos de su cráter son los vestigios de actividad glacial (depósitos de morrenas y glaciares rocosos) ocurrida durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno (Aceves-Quezada, 1996). El cráter del Nevado de Toluca está truncado, tiene una forma elíptica con un diámetro de 2x1.5 Km. En el interior del cráter existen dos lagos (El Sol y La Luna) a una altitud de 4200 m s.n.m., separados por un domo dacítico central conocido como “El Ombligo” (Macías, 2005).



Figura 2.- Ubicación geográfica de los lagos cráter El Sol y La Luna, Nevado de Toluca, México (Tomada y modificada de Google Earth y Google Maps).

El Sol tiene una superficie de 237,321 m², una profundidad máxima de 15m y una profundidad promedio de 6m, mientras que La Luna tiene una superficie de 31,083m², una profundidad máxima de 10m y una profundidad promedio de 5m (Alcocer *et al.*, 2004). Ambos lagos son oligotróficos con baja concentración de nutrientes, transparentes y de baja mineralización (Sánchez *et al.*, 2004). Los lagos se localizan a latitud tropical (19° N) pero por su elevada altitud presenta un clima frío de tundra alta y en las faldas del volcán semifrío húmedo. La temperatura media anual es de 4.28°C con un intervalo de 2.88 en febrero a 5.88°C en abril (Alcocer *et al.*, 2004). La precipitación anual es de 1,227mm y La evaporación anual media es de 970.8 mm (Datos del periodo 1951-2010; estación 15062 Nevado de Toluca, Servicio Meteorológico Nacional).

Debido al balance de precipitación y evaporación ambos lagos se clasifican como astáticos perennes, es decir que con base en dicho balance su nivel de agua aumenta o disminuye pero sin llegar a secarse (Alcocer *et al.*, 2004). Además de la evaporación también hay pérdidas debidas a las infiltraciones. Los aportes hídricos son debidos a la lluvia en verano, la nieve en el invierno y el agua de deshielo en primavera. (Sánchez *et al.*, 2004).

El tipo de vegetación cercana a los lagos es muy escasa, típica de la tundra alta y del tipo zacatonal alpino, compuesta por algunas especies de musgos, pastos y líquenes (Rzedowski, 1981; Banderas *et al.*, 1991). En las laderas del volcán y debido a las infiltraciones se encuentra helechos, líquenes y musgos principalmente, estos reverdecen en el verano debido a la humedad del ambiente (Sánchez *et al.*, 2004).

Material y Métodos

Trabajo de campo

Se estableció una estación de muestreo en la zona central y más profunda de cada uno de los lagos. Se realizaron muestreos mensuales durante dos ciclos anuales separados por un lapso de cinco años. El primer periodo abarcó de marzo de 2000 a marzo de 2001 y el segundo periodo abarcó de agosto de 2006 a octubre de 2007.

En cada salida de campo se realizaron las siguientes mediciones:

- a) Perfiles verticales metro a metro de temperatura (T°), oxígeno disuelto (O.D.), conductividad estandarizada a 25°C (K_{25}) y pH. Los parámetros se midieron utilizando una sonda multiparamétrica (*Datasonde 4, Hydrolab*) unida a una caja controladora (*Surveyor 4*).
- b) Medición del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que llegó al fondo mediante un perfilómetro de fluorescencia natural (*Biospherical PNF-300*).
- c) Medición de nutrientes (N, P y Si). Para el análisis de nutrientes se tomaron muestras de agua a tres profundidades: Superficie (a un metro por debajo de la superficie), media agua (a la mitad de la columna de agua) y fondo (a un metro por encima del fondo). En el periodo de marzo de 2000 a marzo de 2001 se obtuvieron con ayuda de botella muestreadora tipo *Niskin* de 1.5 litros; en el periodo de 2006 a 2007 con una botella muestreadora de 5 L *UWITEC*. Cada muestra se pasó inmediatamente a través de un filtro de membrana de $0.45\ \mu\text{m}$ de apertura de poro (*Millipore*). El filtrado se repartió en dos frascos plásticos de 30 ml de capacidad cada uno. Se les adicionó un par de gotas de cloroformo para neutralizar la actividad bacteriana hasta el momento del análisis y se mantuvieron en frío y oscuridad para su transporte al laboratorio.

d) Biomasa fitoplanctónica expresada a través de la concentración de la clorofila “a”. De las mismas muestras de agua tomadas como se indica en el apartado anterior, se almacenaron 500 ml en frascos de vidrio. Estos fueron mantenidos en frío y oscuridad durante su transporte al laboratorio.

Trabajo de Laboratorio

Nutrientes

Las concentraciones de nitritos (N-NO₂), nitratos (N-NO₃), amonio (N-NH₄), nitrógeno inorgánico disuelto (NID), fósforo soluble reactivo (P-PSR) y Sílice Soluble Reactivo (Si-SiSR) fueron analizados en un autoanalizador de flujo segmentado (Skalar).

Medición de clorofila “a”

Se filtraron volúmenes de 250 ml a través de un filtro de fibra de vidrio (*Whatman GF/F*) con apertura de poro nominal de 0.7 µm. Posteriormente, se extrajo la clorofila “a” con 10 ml de acetona al 90%. El periodo de extracción no fue inferior a 12 h ni mayor a 24 h permaneciendo en oscuridad y refrigeración.

El extracto se centrifugó a 16,000 g durante 10 minutos. Las lecturas del sobrenadante se realizaron en un fluorómetro (*Turner Designs, 10-AU*) previamente calibrado. El análisis siguió el método 445.0 de la *United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory* (Arar y Collins, 1997). Las lecturas se convirtieron a µg L⁻¹ de clorofila “a” utilizando el algoritmo de la siguiente ecuación:

$$C_{s,u} = \frac{(C_{e,u} \times \text{Volumen extraído (L)} \times \text{FD})}{\text{Volumen muestreado (L)}}$$

Donde:

C_{s,u} = concentración de clorofila “a” (µg L⁻¹) en la muestra de agua.

C_{e,u} = concentración de clorofila “a” (µg L⁻¹) no corregida en la solución extraída y analizada

Volumen extraído (L) = volumen de la extracción antes de ser diluida.

FD = factor de dilución.

Volumen muestreado (L) = volumen de toda la muestra de agua.

Trabajo de gabinete

Los datos obtenidos de las mediciones de los parámetros ambientales (OD, T°C, pH, K₂₅ y PAR), nutrientes (N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, NID, P-PSR y Si-SiSR) y biomasa fitoplanctónica (Clor-a) se asentaron en hojas de cálculo utilizando el programa Excel. Con esos datos se elaboraron gráficos de la dinámica presentada a lo largo de los periodos de muestreo con ayuda del programa Sigma Plot versión 10.0. Para las comparaciones entre ciclos y entre lagos se realizaron gráficos de caja y bigote con ayuda del programa SPSS versión 18.

Análisis estadísticos

Para confirmar si los lagos eran polimícticos se realizó un análisis de varianzas ANDEVA con un intervalo de confianza del 95% en la vertical de la columna de agua para los datos de OD y T°C en ambos ciclos anuales y ambos lagos. Al no existir diferencias significativas se tomaron los valores de la vertical como réplicas para los análisis estadísticos de cada objetivo.

Para realizar la comparación intra-anual se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un intervalo de confianza del 95% para cada parámetro. Para saber si los datos presentaban una estacionalidad correspondiente a los periodos de lluvias y secas se realizó un análisis de cúmulos con los valores de algunos parámetros fisicoquímicos del agua (T°C, O.D., K₂₅, pH y PAR). Para realizar este análisis se introdujeron los parámetros expresados en escala logarítmica con el método jerárquico asociativo con el coeficiente de correlación como medida de similitud. Para verificar si los grupos formados por el análisis de cúmulos se asocian con periodos de lluvias o secas, se utilizaron los datos meteorológicos de marzo de 2000 a marzo de 2001 y de agosto de 2006 a octubre de 2007, mismos que fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (Anexos 1 y 2).

Para analizar si se presentaron cambios entre los dos ciclos anuales en cada uno de los parámetros, en primer lugar se verificó si los datos se ajustaban a la distribución normal con la ayuda de las pruebas Kolmogorov-Smirnov (para $n > 30$) o Shapiro Wilk (para $n < 30$). En las comparaciones en las que los datos se ajustaron a la normal, se analizó su homocedasticidad con la prueba F de Fisher; cuando las varianzas fueron homogéneas se realizaron por medio de *t de student* con un intervalo de confianza del 95%. Cuando los datos no se ajustaron a la normal o las varianzas no fueron homogéneas se compararon mediante la prueba *U de Mann-Whitney* con un intervalo de confianza del 95%.

Para analizar si existían cambios entre los lagos El Sol y La Luna en cada uno de los parámetros, se realizó el mismo tratamiento estadístico descrito en el párrafo anterior. Posteriormente se calculó el área de la cuenca de captación de cada lago, para contextualizar las diferencias encontradas entre lagos, con la ayuda de los programas Google Earth y Free Map Tools.

Resultados

Comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica a lo largo de cada uno de los periodos de muestreo lagos en ambos lagos.

Para la caracterización del comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica a lo largo de cada uno de los periodos anuales (2000-2001 y 2006-2007) se realizó un análisis estadístico con la prueba ANDEVA. El análisis dio como resultado que todos los parámetros en ambos periodos de muestreo y en ambos lagos presentaron diferencias significativas entre los valores promedio de cada mes ($p < 0.05$). Por tal motivo, se procedió a realizar un análisis de cúmulos con los siguientes parámetros: T°C, O.D., K₂₅, pH y PAR, para ver cómo se agrupan y si las agrupaciones corresponden a lo esperado para los periodos de lluvias y secas presentes en ambientes tropicales (zona de vientos del este, caracterizados por lluvias en verano, o monzónicas). Los resultados son los siguientes:

El Sol 2000-2001

El análisis de cúmulos en este lago formó dos grupos. El primero abarca de abril a octubre de 2000, meses concuerdan con la temporada de mayor precipitación en la zona (> 24 mm) y también las temperaturas más elevadas ($> 4^{\circ}\text{C}$, Anexo 1). Este grupo presenta los valores más elevados de NID, así como los más bajos en PSR; también contiene los valores más altos ($> 4 \mu\text{g L}^{-1}$) y más bajos ($< 1 \mu\text{g L}^{-1}$) de Clor-*a*. El segundo grupo está integrado por los meses de noviembre de 2000 a marzo de 2001, así como el mes de marzo de 2000. Estos meses concuerdan con la época más fría y seca de la zona, con valores $\leq 4^{\circ}\text{C}$, con excepción del mes de abril que presentó una temperatura de 4.6°C y una precipitación en la zona < 24 mm (Anexo 1). En este grupo se encuentran los mayores valores de PSR, así como los menores valores de NID, con excepción del mes de noviembre de 2000 cuando este parámetro presenta el valor más elevado de todo el periodo de muestreo. En este agrupamiento los valores de la Clor-*a* son intermedios (Figura 3 A).

La Luna 2000-2001

El análisis de cúmulos en este lago forma dos grupos de meses (Figura 3 B). El primero abarca de mayo a noviembre de 2000 y febrero de 2001. La mayoría de los meses de este grupo concuerdan con las precipitaciones más elevadas de la zona (≥ 25 mm) y las temperaturas más altas ($> 4^{\circ}\text{C}$), con excepción del mes de febrero de 2001 (Anexo 1).

El segundo grupo incluye los meses de diciembre de 2000, enero y marzo de 2001, los cuales corresponden a la temporada más fría y seca de la zona, con temperaturas $<4^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones ≤ 25 mm (Anexo 1). El NID no fue muy variable a lo largo de todo periodo de muestreo y no se aprecian diferencias importantes entre grupos; en el primer grupo se incluyen los meses que presentan los valores mayores y menores, tanto del PSR como el cociente de Redfield; en el segundo, valores intermedios. La Clor-*a* no sigue ningún patrón claro, pues en ambos grupos hay valores bajos, intermedios y altos, entre 0.3 y $1.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 3).

El Sol 2006-2007

El análisis de cúmulos dio como resultado dos grupos. Uno de estos va de agosto de 2006 a febrero de 2007, el cual concuerda con un periodo transicional donde tanto las temperaturas como la precipitación van decayendo hasta permanecer por tres meses en un periodo de bajas temperaturas ($< 4^{\circ}\text{C}$) y baja precipitación (< 15 mm; Anexo 2). El otro grupo engloba a los meses de marzo a octubre de 2007. Este grupo corresponde a un periodo donde comienza a aumentar tanto la precipitación como la temperatura hasta alcanzar los valores más altos en el periodo de muestreo tanto en temperatura ($> 4.5^{\circ}\text{C}$) como en precipitación (> 50 mm). En el grupo que va de marzo a octubre de 2007 tanto el NID como el PSR presentaron un comportamiento similar con un intervalo muy variable (13.5 ± 1.3 a 108.5 ± 62.2 en NID y 2.5 ± 0.39 a 32.6 ± 5.4 en PSR). En el otro grupo los valores de PSR también presentaron una gran variabilidad, por el contrario los valores de NID fueron muy homogéneos y muy bajos ($< 20 \mu\text{g L}^{-1}$) lo que dio como resultado una disminución aún mayor en el cociente de Redfiel presentando valores en su mayoría menores a 2. Los valores de la Clor-*a* fueron mayores a $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en la mayoría de los meses en el grupo comprendido por agosto de 2006 a agosto de 2007 y menores a $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en la mayoría de los meses del grupo integrado por marzo a abril de 2007 (Figura 4 A).

La Luna 2006-2007

El análisis de cúmulos en La Luna arrojó los mismos dos grupos formados para El Sol en este mismo año, es decir, de agosto de 2006 a febrero de 2007 y de marzo a octubre de 2007 con las mismas características meteorológicas descritas en el apartado anterior (Anexo 2). En ninguno de los dos grupos se observa un patrón claro en cuanto al NID y PSR. En ambos grupos la mayoría de los valores fueron superiores a $100 \mu\text{g L}^{-1}$ en NID y menores a $4 \mu\text{g L}^{-1}$ en PSR dando como resultado que a lo largo del periodo de muestreo el nutriente limitante fuera el fósforo con excepción en el mes de noviembre de 2006. En este mes, ubicado en el primer grupo, se registró una disminución importante de NID y además un aumento, también considerable, de PSR por lo que únicamente en este mes el nutriente limitante fue el nitrógeno. En el primer grupo la mayoría de los promedios mensuales de Clor-*a* estuvieron por debajo de los $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ y en el segundo grupo la mayoría de los valores fueron superiores a $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 4 B).

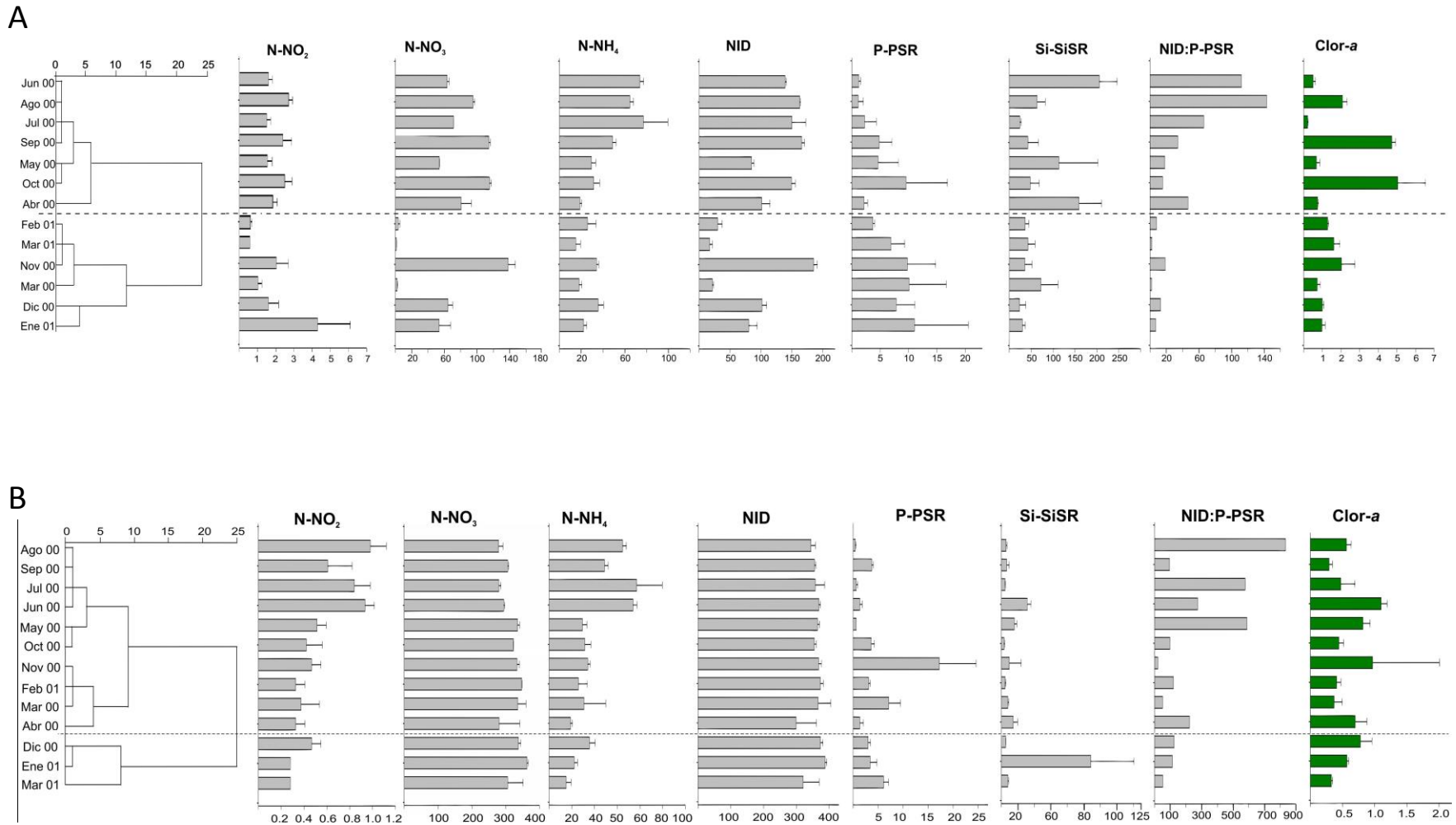


Figura 3.- Comportamiento de los nutrientes y la clorofila “a” en el análisis de cúmulos de los parámetros ambientales. A) El Sol 2000-2001. B) La Luna 2000-2001.

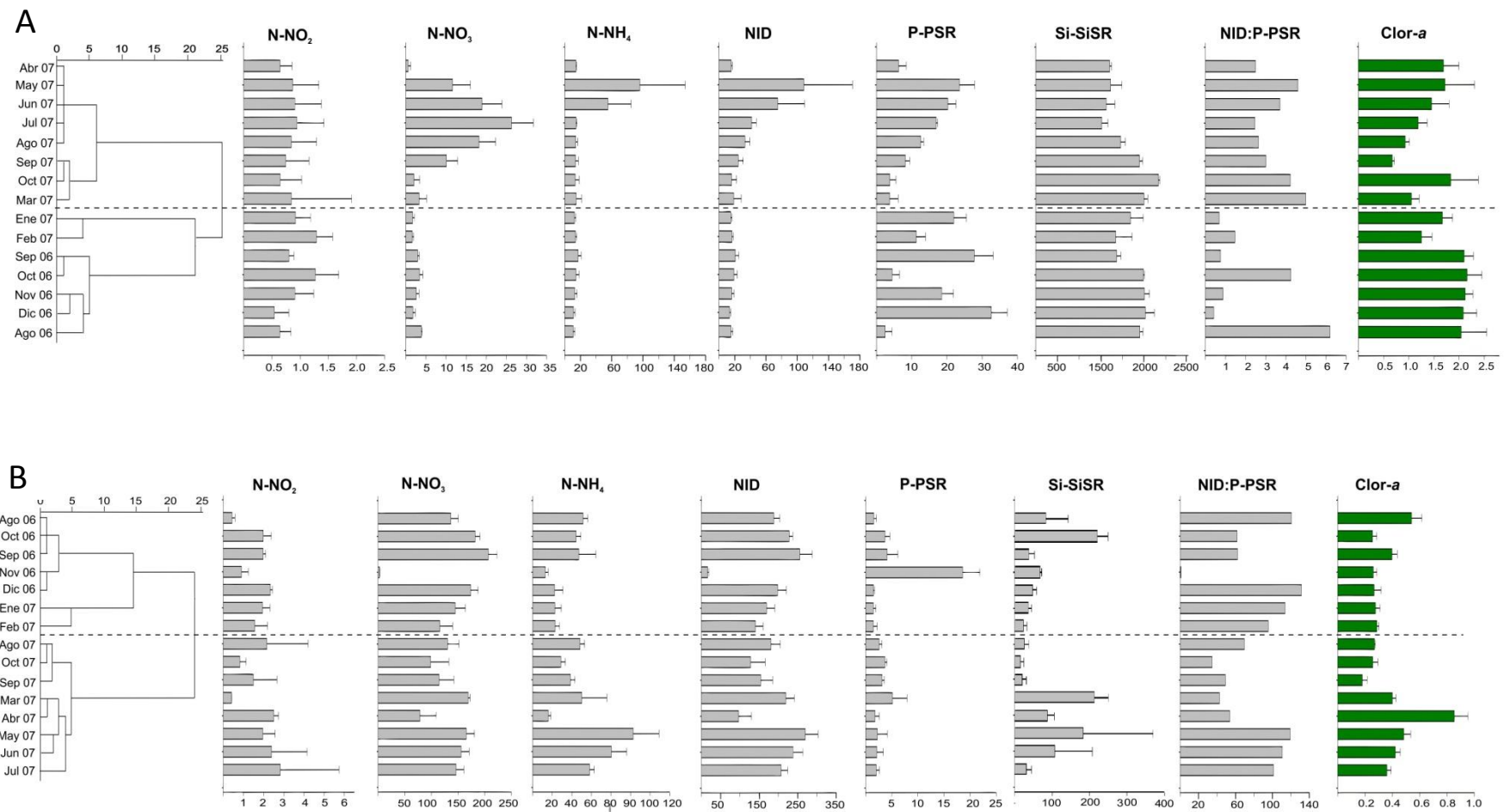


Figura 4.- Comportamiento de los nutrientes y la clorofila "a" en el análisis de cúmulos de los parámetros ambientales. A) El Sol 2006-2007. B) La Luna 2006-2007.

Variaciones en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos ciclos anuales en cada uno de los lagos

Parámetros fisicoquímicos de El Sol

Temperatura

Los valores registrados para este parámetro presentan una distribución similar en los periodos de muestreo. Los valores más altos en ambos periodos se registraron en los meses de junio a septiembre y los más bajos se observaron de noviembre a marzo. En 2000-2001 el intervalo fue de 5.25 ± 0.08 a $10.81 \pm 0.13^\circ\text{C}$ en enero de 2001 y julio de 2000 respectivamente, con una media anual de $9.2 \pm 1.5^\circ\text{C}$. En 2006-2007 el intervalo fue de $3.85 \pm 0.08^\circ\text{C}$ en febrero de 2007 a $10.28 \pm 0.20^\circ\text{C}$ en agosto de 2006, con una media anual de $8.1 \pm 1.9^\circ\text{C}$ (Figura 5A).

El análisis estadístico arrojó que no existieron diferencias entre la temperatura registrada en el periodo 2000-2001 y la registrada en 2006-2007 ($p > 0.05$). Es decir, que este parámetro no cambió durante el periodo de cinco años (Figura 5B). La temperatura del agua no varió en El Sol.

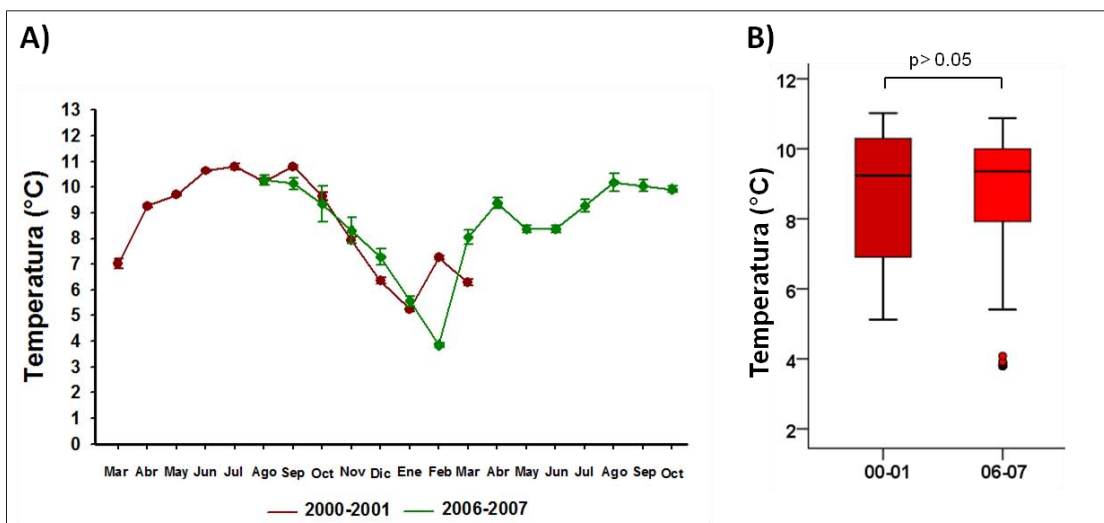


Figura 5.- A) Dinámica de la temperatura del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la temperatura del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=162$, 06-07 $n= 192$).

Oxígeno disuelto (OD)

Los datos obtenidos para este parámetro muestran variación entre los periodos de estudio, con valores relativamente más altos en el periodo 2006-2007; en 2000-2001 los valores más bajos se presentaron de junio a agosto, y en 2006-2007 el registro más bajo fue en el mes de septiembre; sin embargo, ambos periodos presentan sus valores más altos en los meses de noviembre a febrero. En 2000-2001 el intervalo fue de 5.75 ± 0.04 a 7.74 ± 0.07 mg L⁻¹ en junio y noviembre de 2000, respectivamente. La media anual fue de 6.6 ± 0.6 mg L⁻¹. En 2006-2007, el intervalo fue de 6.19 ± 0.1 mg L⁻¹ en septiembre de 2006 a 8.5 ± 0.08 mg L⁻¹ en febrero de 2007, con un promedio anual de 7.36 ± 0.7 mg L⁻¹ (Figura 6A).a

El análisis estadístico arrojó que existe diferencia entre la concentración de oxígeno registrada entre ambos periodos ($p < 0.05$). Por esa razón se afirma que la concentración de oxígeno disuelto en el lago El Sol aumentó 0.7 ± 0.1 mg L⁻¹ del periodo 2000-2001 al 2006-2007 (Figura 6B), es decir, el Sol incrementó su oxigenación en un 6%.

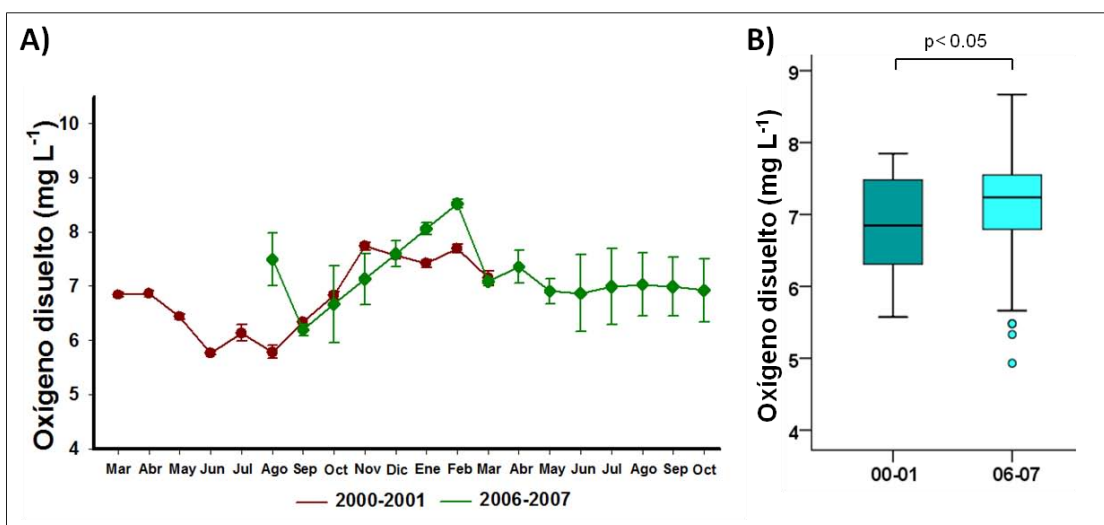


Figura 6.- A) Dinámica del oxígeno disuelto del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del oxígeno disuelto del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=162$, 06-07 $n=192$).

pH

Los valores que se registraron de pH en este lago muestran una dinámica diferente entre los periodos de muestreo. Se aprecia que los únicos meses que coinciden son septiembre de 2000 y septiembre de 2006 con valores de 5.63 ± 0.03 y 5.70 ± 0.02 , respectivamente. En el ciclo anual de marzo de 2000 a marzo de 2001 se presenta un pH ácido con valores de 4.9 ± 0.03 a 6.1 ± 0.2 en febrero de 2001 y abril de 2000 respectivamente. Por el contrario, en el ciclo anual de agosto de 2006 a octubre de 2007 se presenta un cambio importante de pH, con valores que van desde ácidos con 5.7 ± 0.02 en septiembre de 2006, a valores claramente básicos (8.8 ± 0.68) en julio de 2007; de abril a julio los valores fueron muy cercanos a nueve (Figura 7A).

El análisis estadístico arrojó que existe diferencia en los registros de pH entre los periodos de muestreo ($p < 0.05$). De eso se desprende que el pH subió 1.2 ± 0.9 unidades del periodo 2000-2001 al 2006-2007 (Figura 7B). El Sol se tornó un 29% más básico.

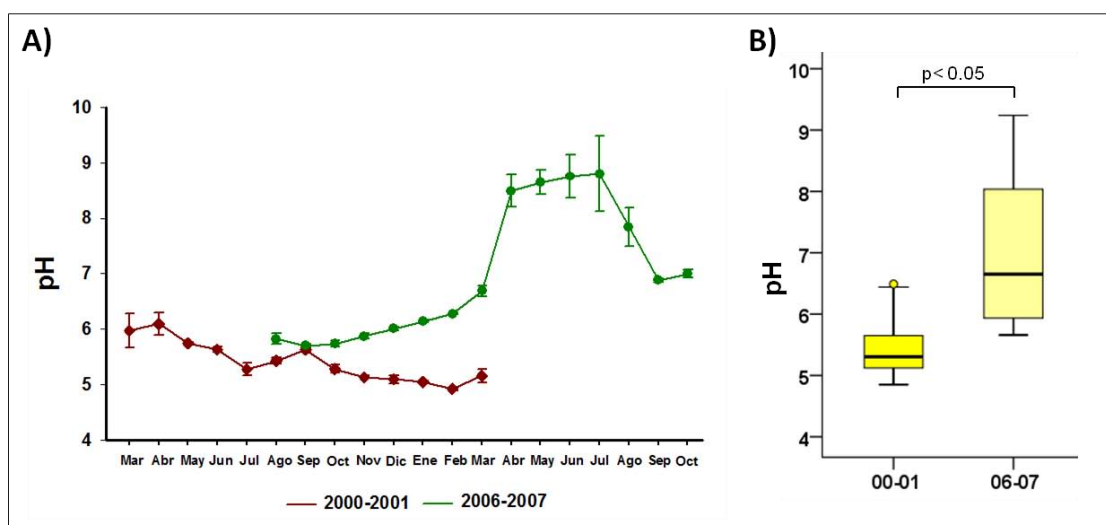


Figura 7.- A) Dinámica del pH del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del pH del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 n=162, 06-07 n= 192).

Conductividad (K_{25})

Los registros de conductividad en El Sol muestran dinámicas disímiles en cada periodo de muestreo. Se observa que los valores en el segundo periodo de muestreo fueron mayores. En el ciclo anual de 2000-2001 tuvo valores de 14.6 ± 0.05 a $17.7 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en marzo de 2000 y enero de 2001, respectivamente, con una media anual de $16 \pm 0.7 \mu\text{S cm}^{-1}$. En el ciclo anual de 2006-2007 las mediciones fueron mayores, con valores de $44 \pm 0 \mu\text{S cm}^{-1}$ en febrero de 2007 a $65.7 \pm 0.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ en octubre de 2006, con una media de $58.1 \pm 6.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 8A).

El análisis estadístico mostró que existe diferencia entre los valores registrados en ambos periodos de muestreo ($p < 0.05$). Es decir, que la conductividad en el lago El Sol fue superior en el periodo 2006-2007, con una diferencia entre periodos de $42.1 \pm 5.5 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 8B). El Sol aumentó en mineralización en un 260%.

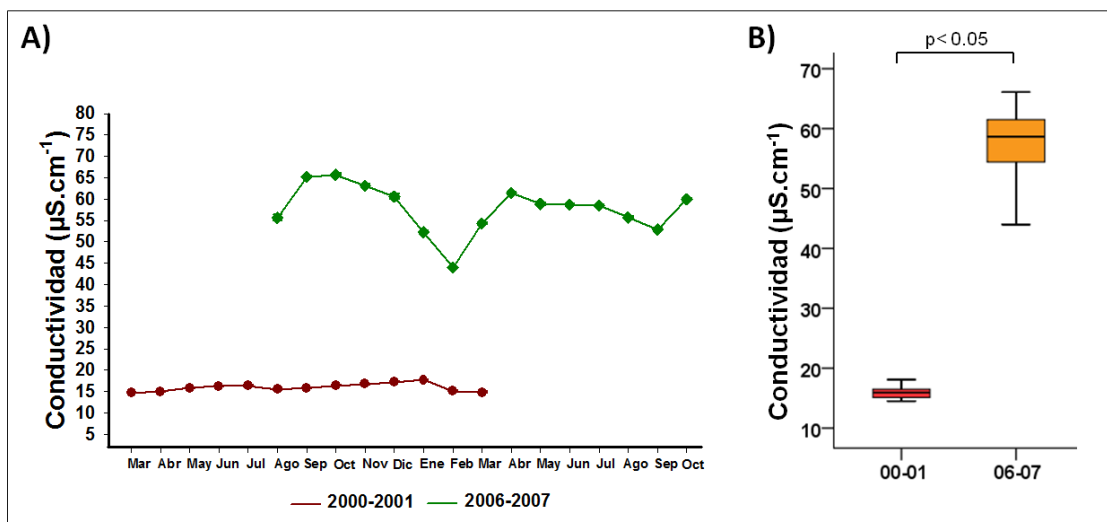


Figura 8.- A) Dinámica de la conductividad del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la conductividad del agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=162$, 06-07 $n=192$).

Radicación fotosintéticamente activa (PAR)

Los valores del PAR que llega al fondo fueron más altos en el periodo 2000-2001, con un intervalo de 3 a 27% en octubre y marzo de 2000, y con un promedio anual de $11 \pm 6\%$. En el periodo 2006-2007 el intervalo fue de 0 en agosto de 2006 a 6% en abril de 2007, respectivamente. Su promedio fue de $2 \pm 1\%$ (Figura 9A).

El análisis estadístico confirmó que hubo un mayor porcentaje de la SPAR que alcanzó el fondo del algo en el ciclo anual 2000-2001 ($p < 0.05$) con respecto al 2006-2007 con una diferencia de $9 \pm 5\%$ (Figura 9B).

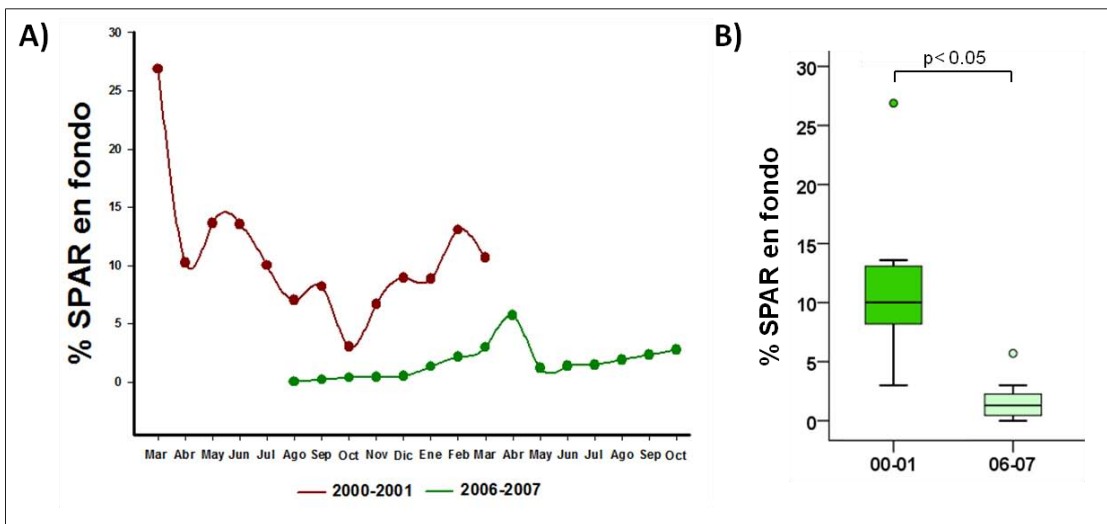


Figura 9.- A) Dinámica del %SPAR en fondo del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del %SPAR en fondo del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 n=13, 06-07 n= 15).

Nutrientes

Nitrógeno como nitritos (N-NO₂)

Este parámetro mostró dinámicas diferentes en cada periodo de muestreo. En 2000-2001 los valores fueron más altos. En el periodo 2006-2007, los valores de N-NO₂ decayeron, estando todos por debajo de 1 µg L⁻¹. El periodo 2000-2001 presentó un intervalo de 0.56 ± 0 µg L⁻¹ en marzo de 2001 a 4.3 ± 1.8 µg L⁻¹ en enero de 2001, el promedio anual fue de 1.85 ± 0.41 µg L⁻¹. En el periodo de 2006-2007 las mediciones fueron más bajas con valores de 0.54 ± 0.26 a 1.29 ± 0.29 µg L⁻¹ en diciembre de 2006 y febrero de 2007, respectivamente y un promedio de 0.85 ± 0.21 µg L⁻¹ (Figura 10A).

El análisis estadístico arroja diferencias en las concentraciones promedio obtenidas en cada periodo de muestreo (p<0.05). La concentración de N-NO₂ disminuyó 1 ± 0.2 µg L⁻¹ para el periodo 2006-2007, con una reducción del 54% (Figura 10B). Esta disminución no resulta importante en términos limnológicos debido a que los valores definidos para los nitritos en ambientes oligotróficos van de los 0 a los 500 µg L⁻¹ (Esteves, 1998).

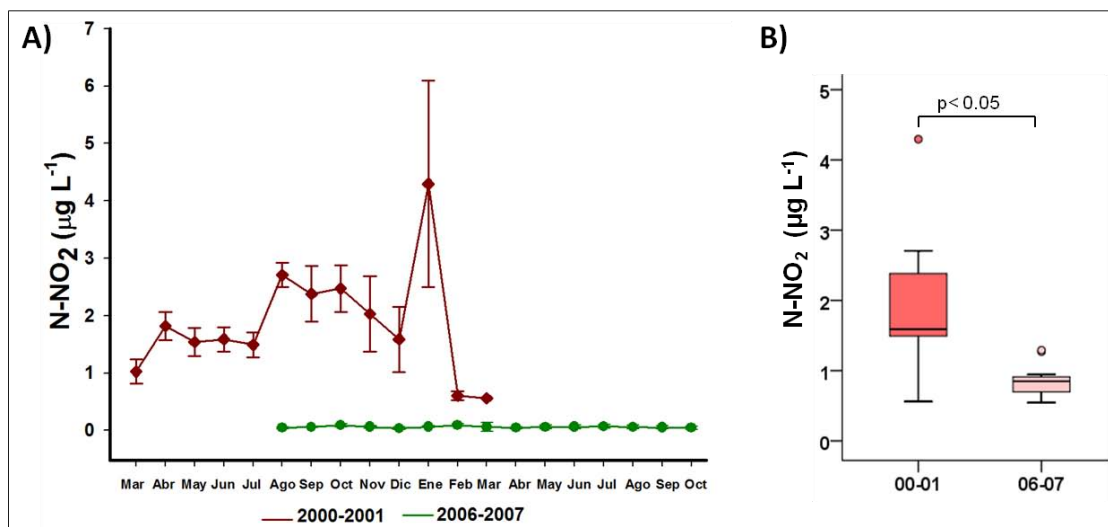


Figura 10.- A) Dinámica del N-NO₂ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del N-NO₂ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 n=78, 06-07 n= 45).

Nitrógeno como nitratos (N-NO₃)

Las dinámicas presentadas por la concentración de N-NO₃ son muy disimiles en ambos periodos de muestreo. Únicamente coinciden los valores registrados en los meses de febrero y marzo. Se encontraron en concentraciones más elevadas en el periodo 2000-2001 con valores de hasta $138.2 \pm 8.74 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de noviembre de 2000, el valor más bajo fue de $1.26 \pm 0.24 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 y su promedio anual fue de $66 \pm 44.3 \mu\text{g L}^{-1}$. En el periodo 2006-2007 el valor más alto fue de $26.28 \pm 5.43 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio de 2007, el valor más bajo fue de $0.6 \pm 0.62 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de abril de 2007 y el promedio anual fue de $7.27 \pm 8 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 11A).

El análisis estadístico arroja que existe diferencia entre ambos periodos de muestreo en la concentración de N-NO₃ de $58.73 \pm 36.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ($p < 0.05$). Con una disminución del 89% en el segundo periodo anual (figura 11B). Esta diferencia no parece representar un cambio en el estatus trófico del lago ya que ambos valores estuvieron por debajo de lo reportado para lagos oligotróficos en este nutriente ($1000 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998).

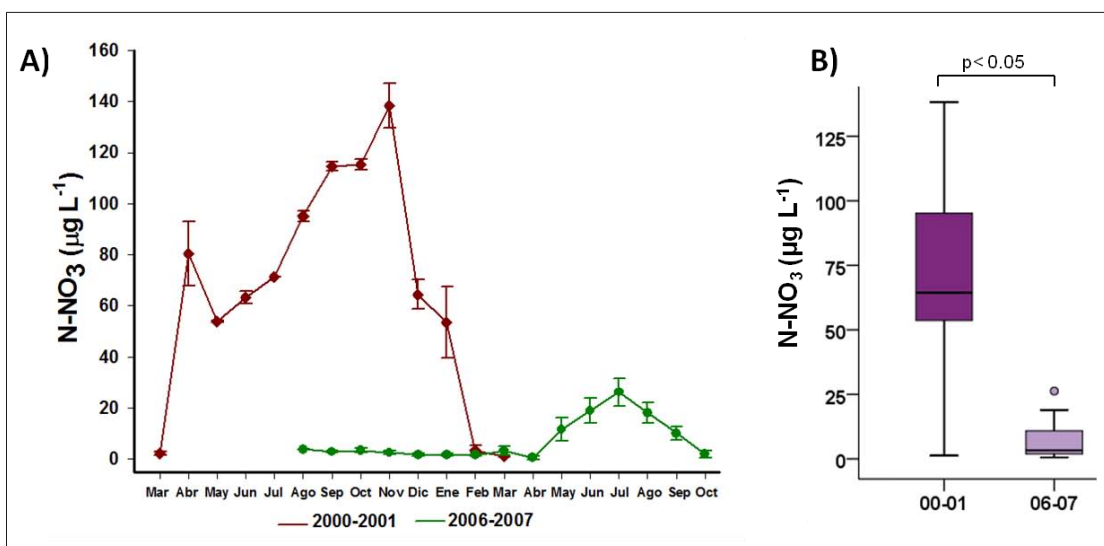


Figura 11.- A) Dinámica del N-NO₃ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del N-NO₃ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 n=78, 06-07 n= 45).

Nitrógeno como amonio (N-NH₄)

La dinámica de la concentración de N-NH₄ presentó un comportamiento disímil entre los periodos de muestreo. En general el periodo 2006-2007 presenta valores más pequeños y en el periodo 2000-2001 existe una mayor variación entre los datos. El intervalo en 2000-2001 fue de $15.03 \pm 4.35 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 a $77.1 \pm 22.53 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio de 2000 y con una media de $38.06 \pm 21.4 \mu\text{g L}^{-1}$. En el ciclo anual 2006-2007 el intervalo fue de $10.9 \pm 2.11 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2006 a $96 \pm 57.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007 y su media anual fue de $21.94 \pm 23.1 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 12A).

El análisis estadístico arrojó que hubo diferencia significativas entre los valores registrados en ambos ciclos ($p < 0.05$), de ahí se desprende que la concentración de N-NH₄ disminuyó en el lago $14.12 \pm 1.7 \mu\text{g L}^{-1}$. Esa disminución fue de 42% (figura 12B). Esta diferencia tampoco representó un cambio en el estatus trófico del lago ya que ambos valores estuvieron dentro del intervalo reportado en este nutriente para lagos oligotróficos. ($0 - 300 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998).

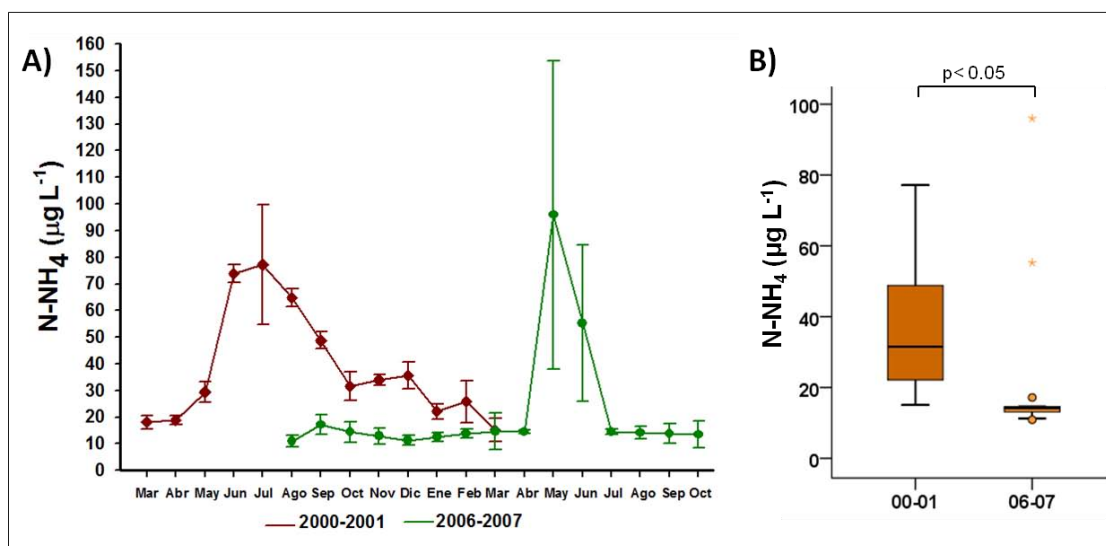


Figura 12.- A) Dinámica del N-NH₄ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del N-NH₄ en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 n=78, 06-07 n= 45).

Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

Las dinámicas presentadas por la concentración de N-NO_3 son muy disimiles en ambos periodos de muestreo. Únicamente coinciden los valores registrados en los meses de marzo de 2001 y 2007. Se registraron concentraciones más elevadas en el periodo 2000-2001 con un valor mínimo de $16.85 \pm 4.59 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de marzo de 2001 y un valor máximo de $185.03 \pm 5.95 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de noviembre de 2000, su media anual fue de $106 \pm 57.7 \mu\text{g L}^{-1}$. En el periodo 2006-2007 el valor más bajo fue de $13.58 \pm 1.48 \mu\text{g L}^{-1}$ en diciembre de 2006, el más alto fue de $108.5 \pm 62.18 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de mayo de 2007, con un promedio de $30.06 \pm 26.9 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 13A).

El análisis estadístico arrojó como resultado que existen diferencias estadísticas en los valores registrados de la concentración de NID en ambos periodos de muestreo ($p < 0.05$), con una disminución de $76.64 \pm 30.8 \mu\text{g L}^{-1}$ en el segundo ciclo anual (figura 13B). El Sol mostró una reducción en NID del 72%. A pesar de la disminución encontrada en este parámetro ambos valores están dentro de lo reportado para lagos oligotróficos ($\leq 360 \mu\text{g L}^{-1}$; Larson, 1996).

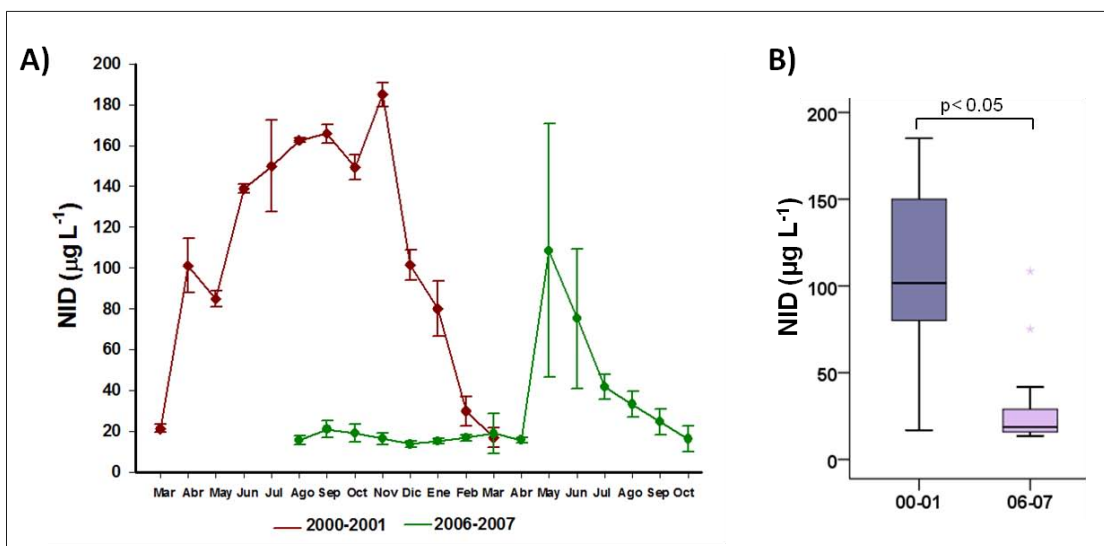


Figura 13.- A) Dinámica del NID en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del NID en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=78$, 06-07 $n=45$).

Fósforo soluble reactivo (P-PSR)

La dinámica de la concentración de del PSR muestra ser disímil entre los periodos de muestreo, con concentraciones más altas en 2006-2007. En el ciclo 2000-2001 el valor más bajo fue de $1.14 \pm 0.89 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2000 y el más alto de $11.05 \pm 9.48 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero de 2001 y, su media anual fue de $5.8 \pm 3.6 \mu\text{g L}^{-1}$. En el periodo de 2006-2007 se observan concentraciones en un intervalo de 2.49 ± 1.9 a $32.6 \pm 4.50 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto y diciembre de 2006, respectivamente, su promedio anual fue de $14.3 \pm 9.6 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 14A).

El análisis estadístico confirma que la concentración de P-PSR se incrementó en 2006-2007 ($p < 0.05$), este aumento fue de $8.5 \pm 6 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 14B). El Sol se enriqueció en P-PSR un 147%. Debido a lo reportado por Wetzel (1992) para lagos de ultra oligotróficos a oligotróficos ($< 5 \mu\text{g L}^{-1}$), entre oligotróficos y mesotróficos (5 a $10 \mu\text{g L}^{-1}$) y de mesotróficos y eutróficos); además de lo reportado por Larson (1996) para lagos oligotróficos ($\leq 12 \mu\text{g L}^{-1}$); el enriquecimiento en fósforo resulta de gran relevancia debido a que muestra una tendencia a cambiar su estatus trófico de oligotrófico a mesotrófico.

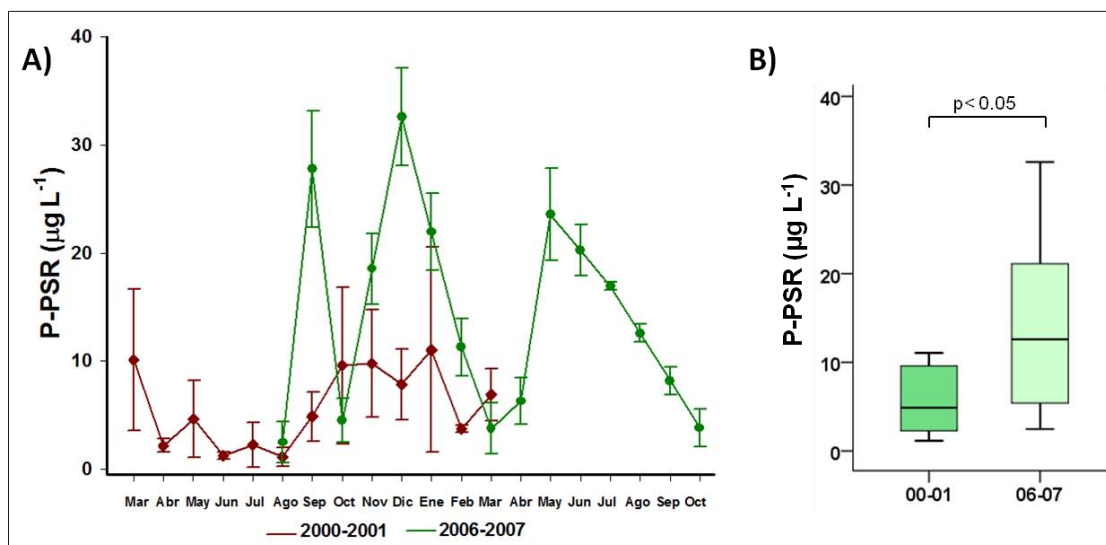


Figura 14.- A) Dinámica del P-PSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del P-PSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=78$, 06-07 $n=45$).

Sílice soluble reactivo (SiSR)

La dinámica de concentración de SiSR es diferente entre ambos periodos de estudio. Los datos obtenidos en el periodo 2006-2007 son comparativamente más altos que los obtenidos en 2000-2001. El intervalo de concentraciones en 2000-2001 va desde 23.50 ± 14.02 hasta $205.6 \pm 51.39 \mu\text{g L}^{-1}$ en diciembre y junio de 2000 respectivamente, con un promedio anual de $68.9 \pm 56.6 \mu\text{g L}^{-1}$. En 2006-2007 el intervalo fue desde $1,522.72 \pm 142.18$ hasta $2,829.56 \pm 31.06 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio y octubre de 2007 respectivamente, con un promedio de $2,138.2 \pm 409 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 15A).

El análisis estadístico muestra que la concentración de SiSR fue mayor en el periodo 2006-2007 ($p < 0.05$) que en 2000-2001. El incremento de la media fue de $2,069.31 \pm 352.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 15B). El Sol se enriqueció en Si-SiSR un 3000% en concordancia con la litología de la zona.

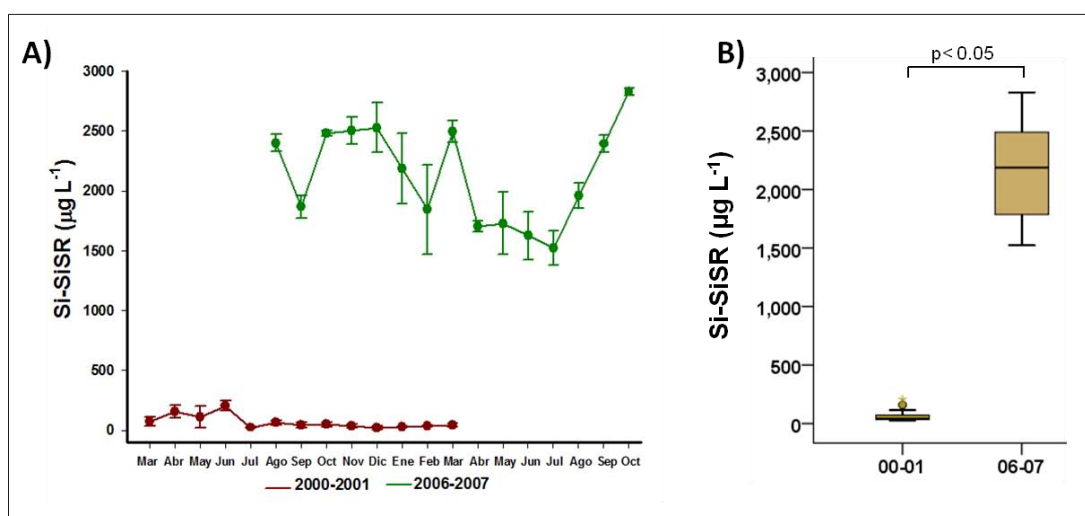


Figura 15.- A) Dinámica del SiSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del SiSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=78$, 06-07 $n=45$).

Cociente de Redfield (NID:P-PSR)

La dinámica de este parámetro muestra valores más altos en el ciclo anual 2000-2001. Los valores más cercanos entre ciclos de muestreo se registraron en los meses de febrero a marzo. 2000-2001 tuvo un intervalo de 2 a 143 en marzo y agosto de 2000, respectivamente y el promedio anual fue de 37 ± 44 . En el periodo 2006-2007 el intervalo fue de 0.4 a 6 en diciembre y agosto de 2006, respectivamente y su promedio fue de 3 ± 2 (figura 16A).

El análisis estadístico arrojó que el NID:P-PSR disminuyó de 2000-2001 a 2006-2007 ($p < 0.05$) con una diferencia de 34 ± 42 (figura 16B). En El Sol el nutriente limitante cambió de ser el fósforo en 2000-2001 a ser el nitrógeno en 2006-2007. Esto debido al consumo y, por lo tanto, disminución del N-NO_3 y al aumento importante en PSR.

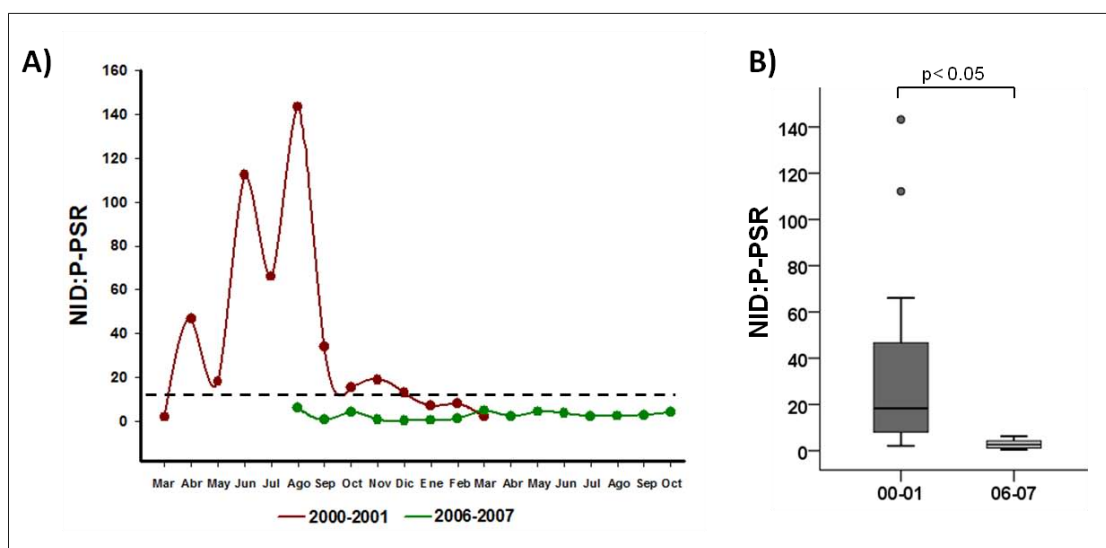


Figura 16.- A) Dinámica del NID:P-PSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. La línea punteada marca la relación N:P (16:1). B) Diagrama de caja y bigote del NID:P-PSR en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=78$, 06-07 $n=45$).

Biomasa fitoplanctónica de El Sol

Concentración de clorofila "a" (Clor-a)

La dinámica de la concentración de Clor-*a*, tomada como medida indirecta de la biomasa fitoplanctónica, muestra comportamientos diferentes entre los periodos de muestreo ya que tanto los valores más altos como los más bajos no coinciden entre periodos. El ciclo anual 2000-2001 presentó mayor variabilidad a lo largo del año, el valor más bajo de Clor-*a* fue de $0.22 \pm 0.03 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio y el valor más alto fue de $5.05 \pm 1.49 \mu\text{g L}^{-1}$ en octubre de 2000, con una media de $1.67 \pm 1.55 \mu\text{g L}^{-1}$. Por otro lado, en el ciclo 2006-2007 el intervalo fue de 0.67 ± 0.04 a $2.16 \pm 0.29 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre de 2007 y octubre de 2006 respectivamente, con un promedio de $1.6 \pm 0.53 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 17A).

El Sol presentó mayor concentración promedio de Clor-*a* en 2000-2001 ($p < 0.05$) con respecto a 2006-2007 con una diferencia de $0.02 \pm 1.02 \mu\text{g L}^{-1}$. La disminución fue del 4% (figura 17B).

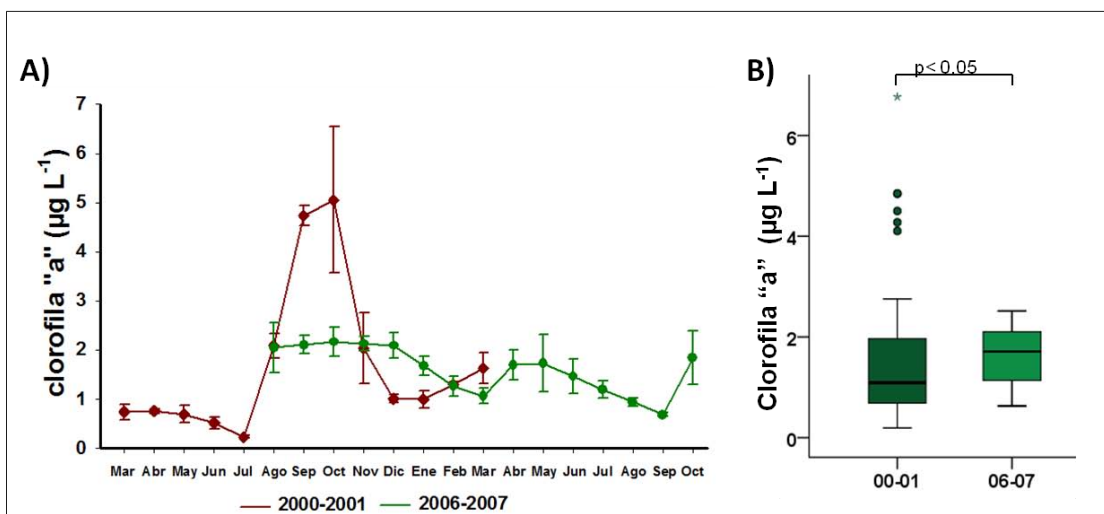


Figura 17.- Dinámica del Clor-*a* en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del Clor-*a* en el agua del lago El Sol en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=39$, 06-07 $n=45$).

En resumen se pudo observar que en El Sol la temperatura fue el único parámetro que no presentó variación entre los dos periodos de muestreo. Del resto de los parámetros evaluados, el pH, OD, K₂₅, P-PSR y Si-SiSR aumentaron en el periodo 2006-2007 respecto al 2000-2001, mientras que el %SPAR, N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, NID y la Clor-*a* disminuyeron para el periodo 2006-2007. Por su parte el cociente NID:P-PSR se invirtió denotando que el nutriente limitante pasó de ser el fosforo en 2000-2001 a ser el nitrógeno en 2006-2007 (Tabla1).

Tabla 1. Valor promedio, mínimo y máximo (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y biomasa fitoplanctónica en el lago El Sol. (Est = Significancia de la prueba estadística, N.S. = No significativo. S = Significativo, Dif = diferencia registrada en el valor promedio entre periodos de muestreo, \uparrow = aumento hacia en segundo periodo de muestreo, \downarrow = disminución hacia el segundo periodo de muestreo).

Variable	2000-2001			2006-2007			Est	Dif	
	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.			
Temp (°C)	9.2 \pm 1.5	5.2 \pm 0.08	10.81 \pm 0.13	8.1 \pm 1.9	3.8 \pm 0.08	10.28 \pm 0.2	N.S.		
OD (mg L ⁻¹)	6.6 \pm 0.6	5.76 \pm 0.04	7.74 \pm 0.07	7.3 \pm 0.7	6.19 \pm 0.1	8.5 \pm 0.08	S	0.7 \pm 0.1	\uparrow
pH	5.5 \pm 0.3	4.93 \pm 0.03	6.1 \pm 0.2	6.7 \pm 1.2	5.7 \pm 0.02	8.8 \pm 0.68	S	1.2 \pm 0.9	\uparrow
K ₂₅ (μS cm ⁻¹)	16 \pm 0.7	14.64 \pm 0.05	17.7 \pm 0.15	58.1 \pm 6.2	44 \pm 0	65.7 \pm 0.27	S	42.1 \pm 5.5	\uparrow
%SPAR en fondo	10 \pm 5	3	26	1 \pm 1	0	5	S	9 \pm 4	\downarrow
N-NO ₂ (μg L ⁻¹)	1.85 \pm 0.41	0.56 \pm 0	4.3 \pm 1.8	0.85 \pm 0.21	0.54 \pm 0.26	1.29 \pm 0.28	S	1 \pm 0.2	\downarrow
N-NO ₃ (μg L ⁻¹)	66.0 \pm 44.3	1.26 \pm 0.24	138.25 \pm 8.74	7.27 \pm 8	0.6 \pm 0.62	26.2 \pm 5.4	S	58.73 \pm 36.3	\downarrow
N-NH ₄ (μg L ⁻¹)	38.06 \pm 21.4	15.03 \pm 4.35	77.13 \pm 22.53	21.94 \pm 23.1	10.9 \pm 2.11	96 \pm 57.9	S	14.12 \pm 1.7	\downarrow
NID (μg L ⁻¹)	106.7 \pm 57.7	16.85 \pm 4.6	185.03 \pm 5.95	30.06 \pm 26.9	13.58 \pm 1.48	108.5 \pm 62.18	S	76.64 \pm 30.8	\downarrow
P-PSR (μg L ⁻¹)	5.8 \pm 3.6	1.14 \pm 0.89	11.05 \pm 9.48	14.3 \pm 9.6	2.49 \pm 1.9	32.6 \pm 4.5	S	8.5 \pm 6	\uparrow
Si-SiSR (μg L ⁻¹)	68.9 \pm 56.6	23.5 \pm 14.02	205.6 \pm 40.67	2,138.21 \pm 409	1,522.7 \pm 142.1	2,829.5 \pm 31.06	S	2,069.31 \pm 352.4	\uparrow
NID:P-PSR	37 \pm 44	2	143	3 \pm 1	0.4	6	S	34.6 \pm 42.6	\downarrow
Clor- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	1.67 \pm 1.55	0.22 \pm 0.03	5.05 \pm 1.49	1.6 \pm 0.53	0.67 \pm 0.04	2.16 \pm 0.29	S	0.02 \pm 1.02	\downarrow

Parámetros fisicoquímicos de La Luna

Temperatura

La distribución de los valores registrados para este parámetro fue similar en los dos periodos de muestreo. Ambos presentaron sus valores más bajos en los meses de diciembre a marzo y sus valores más altos de junio a septiembre. En 2000-2001 el intervalo fue de 5.74 ± 0.2 a 10.85 ± 0.37 °C en enero de 2001 y julio de 2001 respectivamente, su promedio anual fue de 8.5 ± 1.7 °C. En 2006-2007 el intervalo fue de 4.52 ± 0.32 a 10.33 ± 0.28 °C en febrero y julio de 2007 respectivamente, su promedio anual fue de 8.65 ± 1.6 °C (Figura 18A).

El análisis estadístico mostró que no existieron diferencias entre los valores de la temperatura registrada en el periodo 2000-2001 y la registrada en 2006-2007 ($p > 0.05$). La temperatura del agua no varió en La Luna. (Figura 18B).

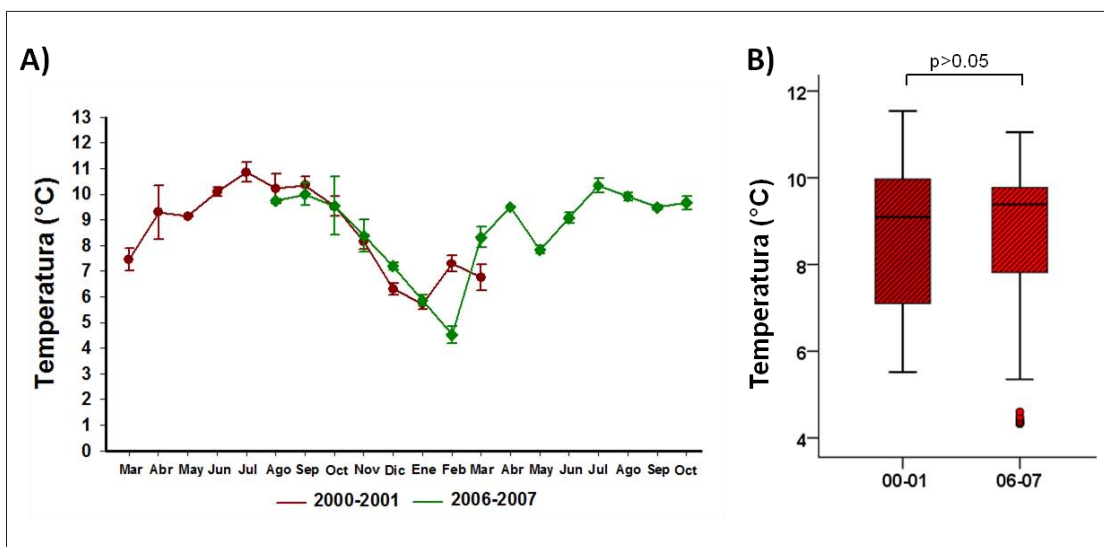


Figura 18.- A) Dinámica de la temperatura del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la temperatura del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=124$, 06-07 $n= 139$).

Oxígeno disuelto (OD)

La dinámica de este parámetro muestra un comportamiento disímil en ambos ciclos anuales, mientras que los valores más altos en el ciclo 2000-2001 se presentaron en los meses de noviembre y diciembre, en el ciclo 2006-2007 tuvo sus valores más altos en enero y febrero. De igual manera los valores más bajos no concordaron, siendo el mes de septiembre el mes con el registro más bajo en 2000-2001 y julio en 2006-2007. En el periodo 2000-2001 se registraron valores de 5.89 ± 0.04 a 8.59 ± 0.79 mg L^{-1} en septiembre de 2000 y marzo de 2001 respectivamente, su promedio anual fue de 6.8 mg L^{-1} . En el periodo de 2006-2007 se registraron valores de 6.22 ± 0.03 a 8.6 ± 0.17 mg L^{-1} en julio y febrero de 2007, con un promedio anual de 7 ± 0.6 mg L^{-1} (Figura 19A).

Al realizar el análisis estadístico se encontró que existen diferencias en la concentración de oxígeno disuelto registrado en ambos periodos con un incremento de 0.2 ± 0.2 mg L^{-1} ($p < 0.05$). La Luna mostró un incremento del 5% en la concentración de OD en el segundo periodo de muestreo (Figura 19B).

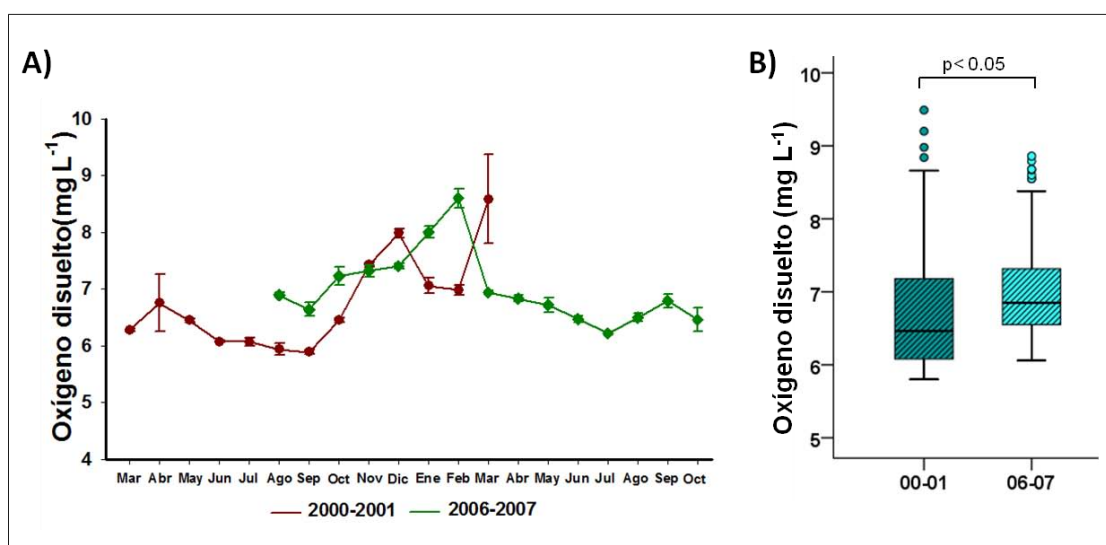


Figura 19.- A) Dinámica del oxígeno disuelto del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del oxígeno disuelto del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=124, 06-07 n= 139).

pH

La dinámica del pH muestra valores más elevados en el periodo 2006-2007, así como mayor variabilidad durante el periodo. Únicamente coinciden los valores de octubre de 2001 y 2006. En 2000-2001 el intervalo fue de 4.5 ± 0.04 en febrero de 2001 a 5.59 ± 0.4 en abril de 2000, con un promedio de 4.7 ± 0.3 . En el ciclo 2006-2007 el intervalo fue de 4.64 ± 0.36 a 6.64 ± 0.36 en octubre y diciembre de 2006 respectivamente, su promedio anual fue de 5.4 ± 0.7 (Figura 20A).

El análisis estadístico mostró que hubieron diferencias significativas entre ambos ciclos anuales ($p < 0.05$). El pH de La Luna aumentó 0.7 ± 0.4 unidades de pH del periodo 2000-2001 al periodo 2006-2007 (Figura 20B). El incremento del pH fue del 15%.

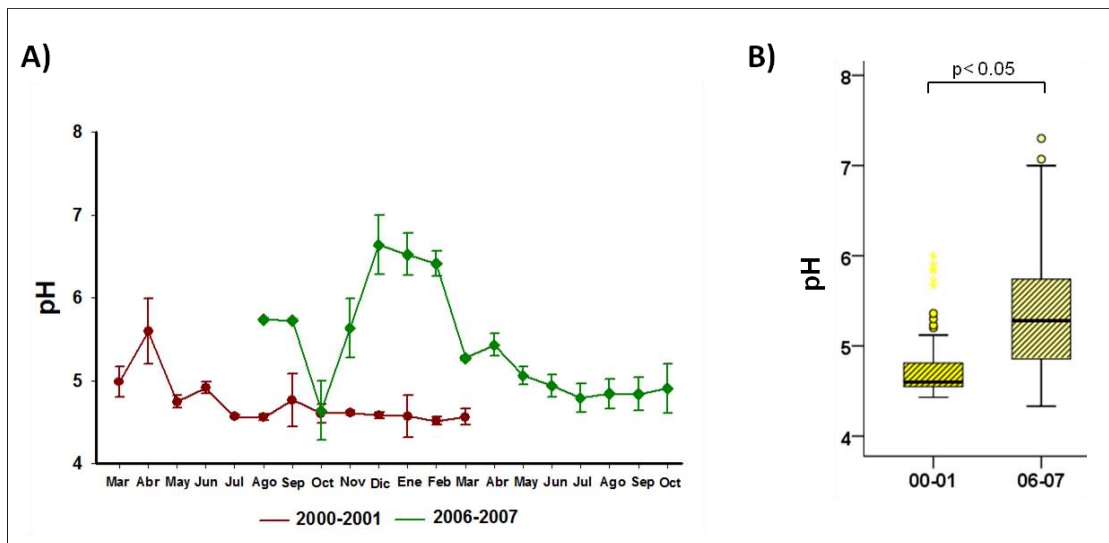


Figura 20.- A) Dinámica del pH del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del pH del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=124$, 06-07 $n=139$).

Conductividad (K_{25})

La comparación entre las dinámicas de la conductividad de ambos años muestra que los valores del periodo 2000-2001 fueron más altos (superiores a los $12 \mu\text{S cm}^{-1}$) que los presentados en el ciclo 2006-2007 (inferiores a los $11 \mu\text{S cm}^{-1}$). El ciclo 2006-2007 presentó una mayor variabilidad a lo largo del año. En el ciclo 2000-2001 el intervalo fue de 12.5 ± 0.2 a $15.0 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en marzo y enero de 2001 respectivamente, su promedio anual fue de $13.7 \pm 0.8 \mu\text{S cm}^{-1}$. Por su parte, el ciclo 2006-2007 presentó valores inferiores a los $11 \mu\text{S cm}^{-1}$, su intervalo fue de $3.3 \pm 0.05 \mu\text{S cm}^{-1}$ en septiembre de 2007 a $10.5 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en septiembre de 2006, con un promedio de $6.1 \pm 2.5 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 21A).

Se presentan diferencias significativas entre ambos ciclos anuales ($p < 0.05$). La conductividad en La Luna disminuyó en $7.6 \pm 1 \mu\text{S cm}^{-1}$ de 2000-2001 a 2006-2007, es decir, que disminuyó 55% en mineralización. (Figura 21B).

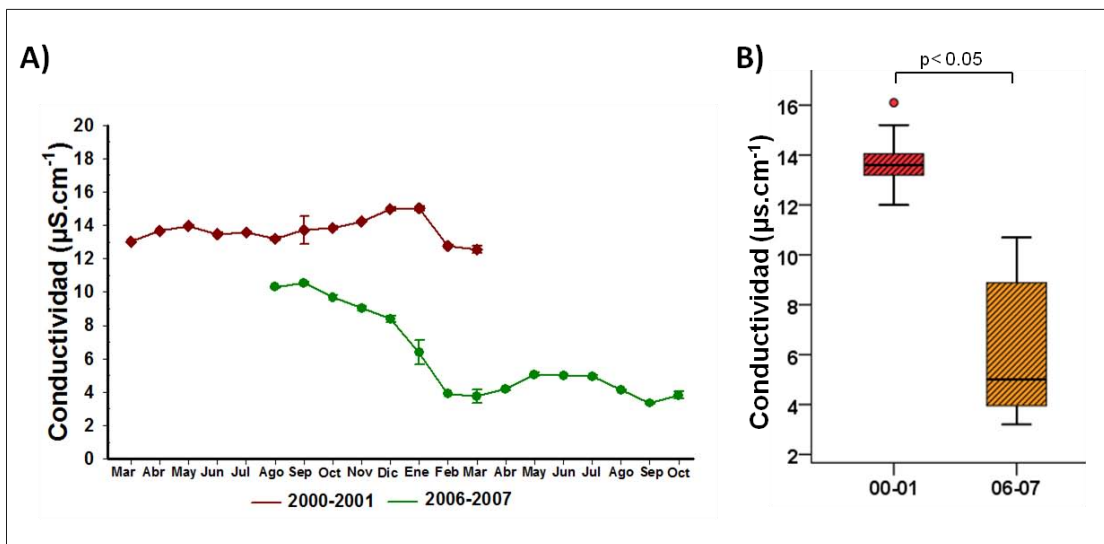


Figura 21.- A) Dinámica de la conductividad del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la conductividad del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=124$, 06-07 $n=139$).

Radicación fotosintéticamente activa (PAR)

El porcentaje de la PAR que alcanzó el fondo en La Luna fue muy variable, principalmente en el ciclo 2000-2001, además en este ciclo se registraron valores más altos con respecto a los reportados en 2006-2007. Se observa una disminución en el promedio anual del porcentaje de 2000-2001 a 2006-2007 con valores promedio anuales de $45 \pm 12\%$ y $26 \pm 13\%$, respectivamente. El intervalo en 2000-2001 fue de 17% a 56% en junio y julio de 2000 respectivamente. En 2006-2007 el intervalo fue de 7% a 52% en octubre y marzo de 2007 respectivamente (Figura 22A).

Se presentaron diferencias significativas entre ambos ciclos ($p < 0.05$). La Luna mostró una disminución de $19 \pm 1\%$ en el porcentaje de la SPAR que alcanza el fondo de 2000-2001 a 2006-2007 (Figura 22B). La Luna se tornó menos transparente.

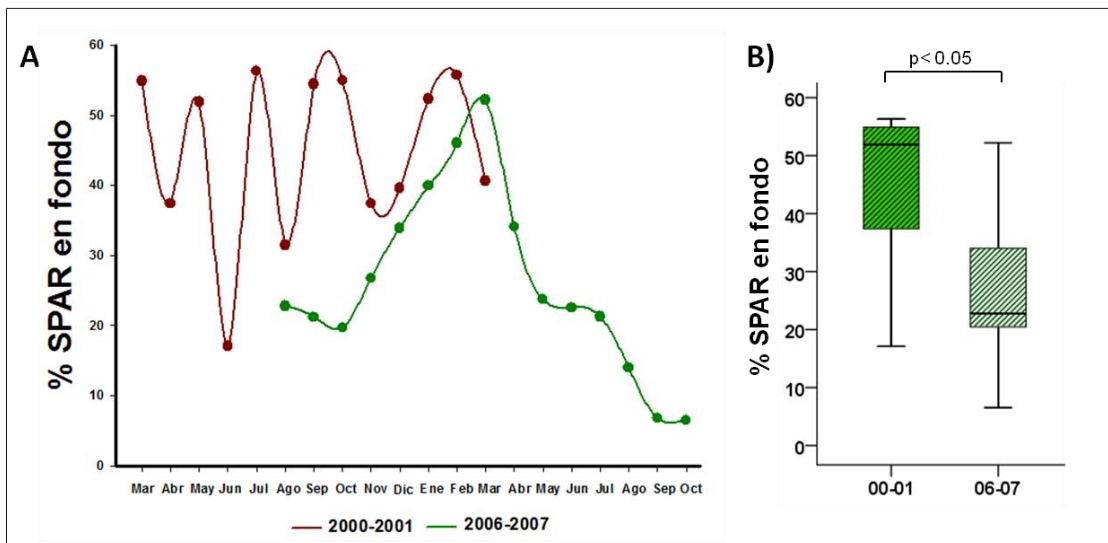


Figura 22.- Dinámica del %SPAR en fondo del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote del %SPAR en fondo del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=13, 06-07 n= 15).

Nutrientes

Nitrógeno como nitritos (N-NO₂)

La concentración de N-NO₂ en el lago La Luna presentó valores más bajos en el ciclo anual 2000-2001 con un intervalo de $0.28 \pm 0 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero y marzo de 2001 a $0.98 \pm 0.14 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2000 y un promedio de $0.5 \pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$. En 2006-2007 la concentración aumentó y presentó mayor variabilidad a lo largo del ciclo, su intervalo fue de $0.41 \pm 0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ a $2.83 \pm 2.91 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo y julio de 2007 respectivamente, con un promedio anual de $1.71 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 23A).

El resultado del análisis estadístico mostró diferencias significativas entre ambos periodos anuales ($p < 0.05$); en La Luna se incrementó la concentración de nitritos para el ciclo 2006-2007 con una diferencia de $2.2 \pm 3 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 23B). La Luna se enriqueció 227% en N-NO₂. Sin embargo el aumento no representa un cambio limnológicamente importante ya que ambos valores están muy por debajo del límite reportado para lagos oligotróficos ($< 500 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998).

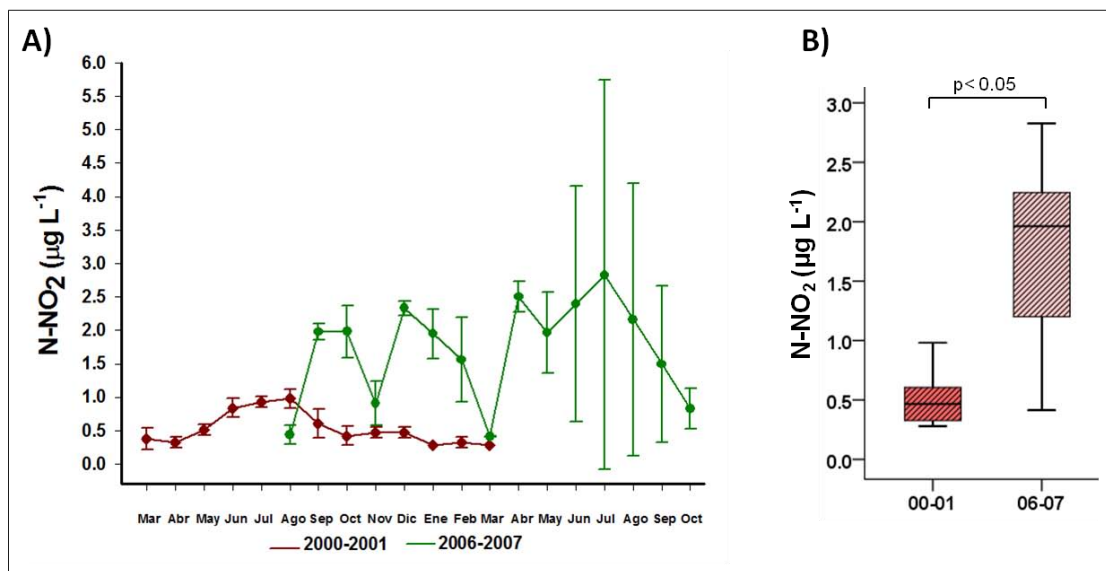


Figura 23.- A) Dinámica del de N-NO₂ del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración de N-NO₂ del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=39, 06-07 n= 45).

Nitrógeno como nitratos (N-NO₃)

Las concentraciones de nitratos fueron mayores en el periodo 2000-2001 con valores superiores a los 250 µg L⁻¹. Por su parte en el ciclo 2006-2007 los valores fueron más variables y estuvieron por debajo de los 250 µg L⁻¹. El intervalo del ciclo 2000-2001 fue de 278 ± 12.80 µg L⁻¹ en agosto de 2000 hasta 362.59 ± 3.56 µg L⁻¹ en enero de 2001. Su promedio anual fue de 316 ± 28 µg L⁻¹. En el periodo 2006-2007 el intervalo fue de 2.60 ± 0.68 a 206 ± 16.26 µg L⁻¹ en noviembre y septiembre de 2006, respectivamente. El promedio anual fue de 134.6 ± 49.6 µg L⁻¹ (Figura 24A).

Estadísticamente se presentó diferencia significativa en la concentración de nitratos entre ambos ciclos de 182.01±21.6 µg L⁻¹ (p<0.05). La Luna redujo su concentración de nitratos para 2006-2007 en un 57% (Figura 24B). Tal diferencia no representó un cambio en la clasificación trófica de este lago debido a que ambos valores de N-NO₃ estuvieron por debajo de lo reportado para lagos oligotróficos en este nutriente (1000 µg L⁻¹; Esteves, 1998).

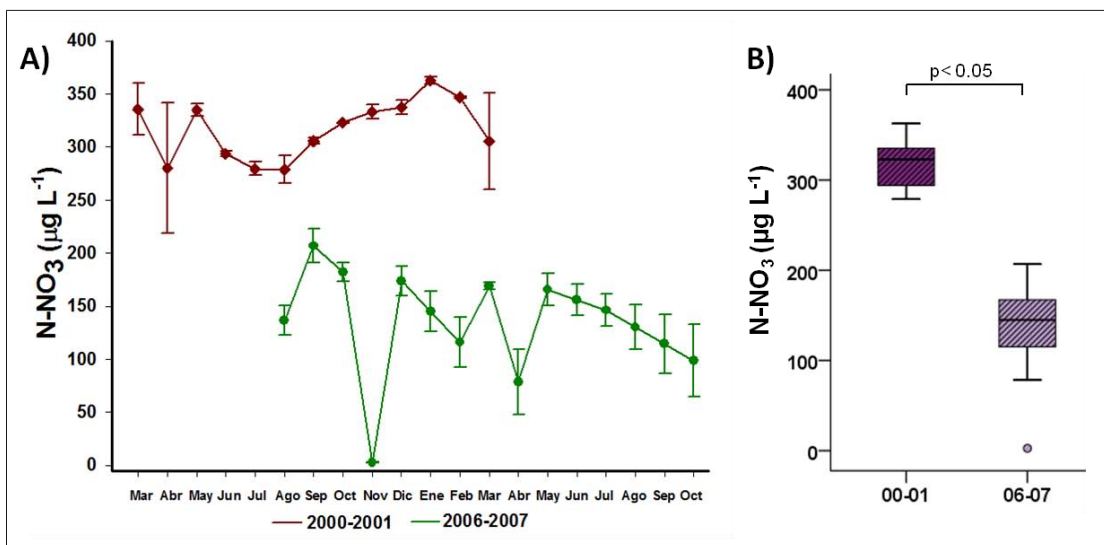


Figura 24.- A) Dinámica del de N-NO₃ del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración de N-NO₃ del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=39, 06-07 n= 45).

Nitrógeno como amonio (N-NH_4)

El comportamiento de esta variable fue muy similar en ambos ciclos anuales. Aunque el mes donde se presenta el valor más alto para cada periodo no coincide estos meses son cercanos, de tal manera que en 2000-2001 los meses con los valores más altos fueron junio y julio de 2000 y en el periodo 2006-2007 los valores más altos se registraron en mayo y junio de 2007. Ambos ciclos presentaron una alta variabilidad a lo largo del año. En el ciclo anual 2000-2001 los valores fueron de $15.03 \pm 4.35 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 a $77.1 \pm 22.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio de 2000. Su promedio fue de $39.02 \pm 20.66 \mu\text{g L}^{-1}$. En el ciclo anual 2006-2007 el intervalo fue de $12.83 \pm 2.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006 a $102.67 \pm 26.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007, con un promedio anual de $43.1 \pm 24.6 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 25A).

El análisis estadístico mostró que no se encontraron diferencias significativas entre los dos ciclos anuales ($p > 0.05$), es decir, la concentración de N-NH_4 no cambió entre ambos ciclos (Figura 25B).

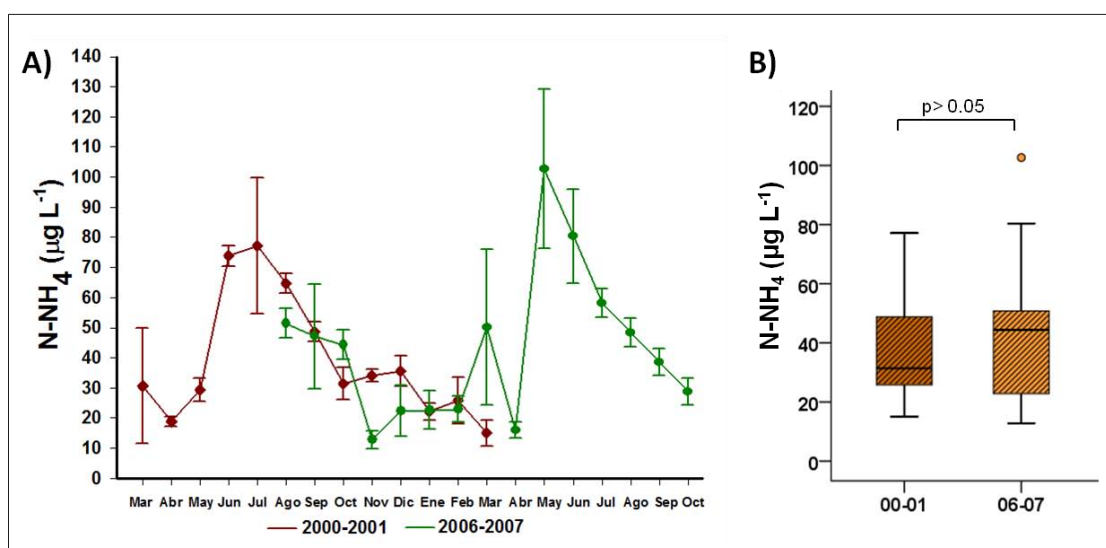


Figura 25.- A) Dinámica del N-NH_4 del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración del N-NH_4 del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=39$, 06-07 $n=45$).

Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

En 2000-2001 se presentaron valores de NID mayores que en el ciclo 2006-2007, los valores máximos o mínimos no se presentaron en los mismos meses. En el periodo de 2000-2001 el mínimo fue de 299.3 ± 61.6 en abril de 2000 y el máximo de $368.66 \pm 4.7 \mu\text{g L}^{-1}$ en junio de 2000. Su promedio anual fue de $356.4 \pm 23.6 \mu\text{g L}^{-1}$. En el ciclo 2006-2007 se observa un intervalo de $16.3 \pm 2.8 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006 a $270.07 \pm 33.27 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007. El promedio del ciclo fue de $179.52 \pm 66.02 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 26A).

Se presentaron diferencias significativas entre los valores de ambos periodos ($p < 0.05$) con una disminución de NID de $176.88 \pm 42.42 \mu\text{g L}^{-1}$ de 2000-2001 a 2006-2007, es decir que La Luna se empobreció un 50% en NID para el segundo periodo de muestreo (Figura 26B). A pesar de la disminución encontrada en este parámetro los valores promedio de ambos periodos están dentro de lo reportado para lagos oligotróficos ($\leq 360 \mu\text{g L}^{-1}$; Larson, 1996).

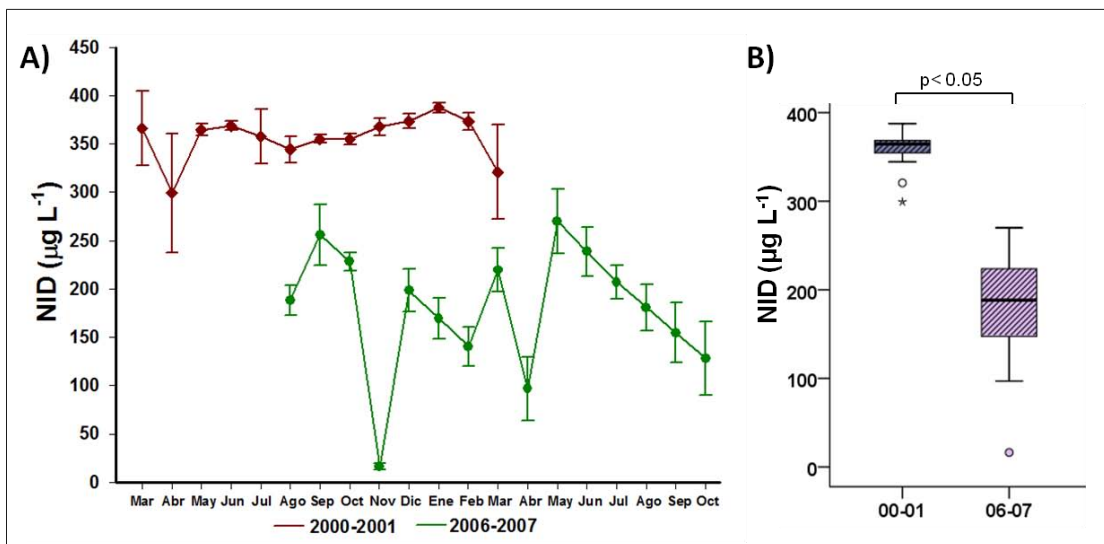


Figura 26.- A) Dinámica del NID del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración del NID del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=39$, 06-07 $n=45$).

Fósforo soluble reactivo (P-PSR)

El comportamiento de esta variable fue muy similar en ambos ciclos anuales. En ambos presentan sus valores más altos en los meses de noviembre y marzo y los más bajos de mayo a julio de 2000 y 2006. En el ciclo 2000-2001 las concentraciones de P-PSR fueron de $0.4 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ a $17.2 \pm 7.36 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto y noviembre de 2000, respectivamente, con un promedio anual de $3.97 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$. En el ciclo 2006-2007 los valores fueron de $1.4 \pm 0.74 \mu\text{g L}^{-1}$ en febrero de 2007 a $18.55 \pm 3.27 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006, con un promedio de $3.68 \pm 4.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 27A).

El análisis estadístico mostró que el P-PSR no presentó diferencias significativas entre los dos periodos de muestreo ($p > 0.05$). La concentración de PSR no cambió en La Luna de 2000-2001 a 2006-2007 (Figura 27B).

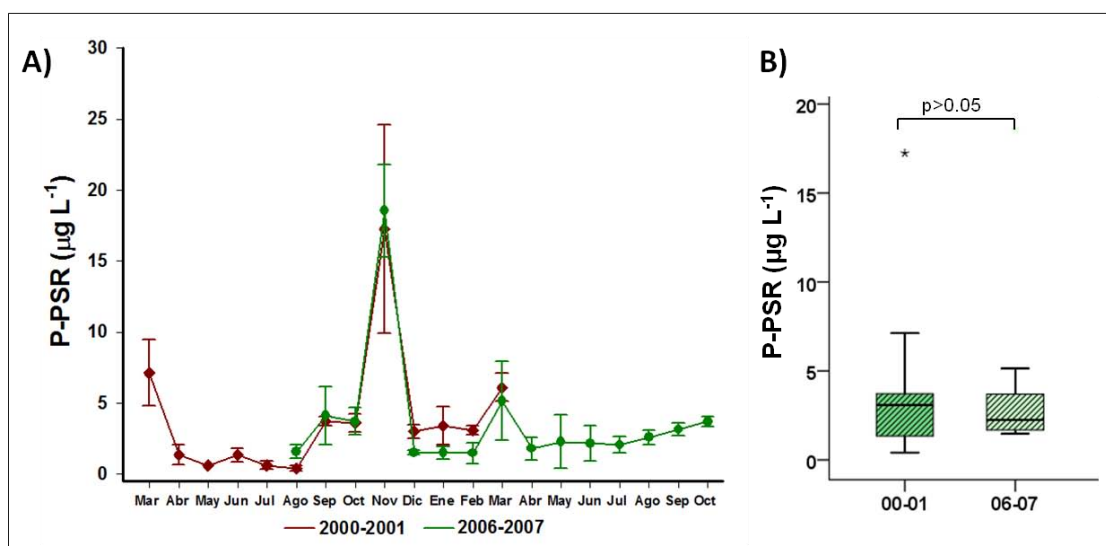


Figura 27.- A) Dinámica del P-PSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración del P-PSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=39, 06-07 n= 45).

Sílice soluble reactivo (Si-SiSR)

El Si-SiSR no presentó un comportamiento similar en ambos periodos anuales ya que en el segundo periodo de muestreo los valores estuvieron más elevados. En 2000-2001 el intervalo es de $3.2 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre de 2000 a $108.4 \pm 52.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de enero de 2001, con un promedio anual de $17.3 \pm 28.4 \mu\text{g L}^{-1}$. En el periodo 2006-2007 los valores van desde $14.9 \pm 9.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre de 2007 a $220.87 \pm 28.73 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre de 2006, con un promedio de $79.96 \pm 35.07 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 28A).

El resultado de la prueba estadística arroja que se presentaron diferencias entre ambos ciclos anuales con una diferencia de $62.66 \pm 6.67 \mu\text{g L}^{-1}$ ($p < 0.05$), por lo que se puede decir que este nutriente aumentó 78% de 2000-2001 a 2006-2007 (Figura 28B). Este aumento no resulta tan importante considerando la litología del lugar.

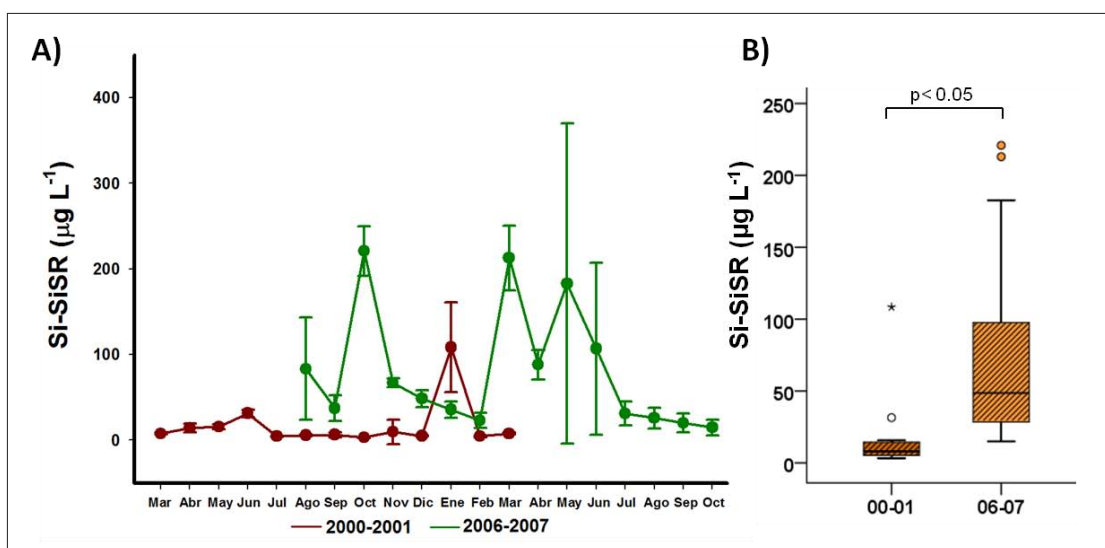


Figura 28.- A) Dinámica del SiSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración del SiSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 $n=39$, 06-07 $n=45$).

Cociente de Redfield (NID:P-PSR)

Ambos ciclos comparten valores similares en 7 meses, de septiembre a marzo, en el resto de los meses los valores fueron más altos en el ciclo 2000-2001. En 2000-2001 el intervalo fue de 21 a 834 en noviembre y agosto de 2000 respectivamente, con un promedio de 244 ± 257 . En el ciclo 2006-2007 el intervalo fue de 1 a 132 en noviembre y diciembre de 2006, respectivamente, con una media de 78 ± 38 (Figura 29A).

Aunque se observa una tendencia a la disminución del cociente de Redfield de 2000-2001 a 2006-2007, la prueba estadística indicó que no hay diferencias significativas entre los ciclos anuales ($p=0.05$) en ambos años el nutriente limitante fue el fósforo (Figura 29B).

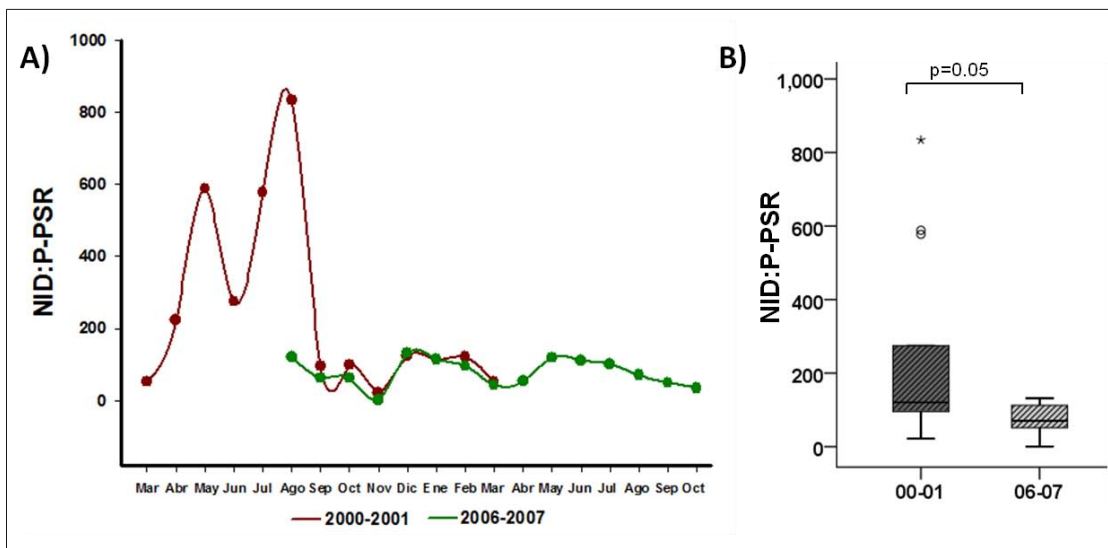


Figura 29.- A) Dinámica del NID:P-PSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración del NID:P-PSR del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=39, 06-07 n= 45).

Biomasa fitoplactónica de La Luna

Concentración de clorofila "a" (Clor-a)

La Clor-a no presentó comportamientos similares entre ciclos anuales, los valores máximos no se presentaron en los mismos meses aunque los valores mínimos si coincidieron, registrándose en el mes de septiembre de 2000 y 2007. En 2000-2001 hubo valores más altos y este ciclo presentó una mayor variabilidad. En 2000-2001 el intervalo de Clor-a fue de 0.29 ± 0.05 a $1.1 \pm 0.09 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre y junio de 2000 respectivamente; su promedio anual fue de $0.6 \pm 0.35 \mu\text{g L}^{-1}$. En el caso del periodo 2006-2007 el intervalo fue de 0.18 ± 0.04 a $0.85 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre y abril de 2007 respectivamente; su promedio anual fue de $0.37 \pm 0.17 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 30A).

De acuerdo al análisis estadístico existieron diferencias significativas entre los valores de ambos ciclos de muestreo ($p < 0.05$), esta diferencia fue de $0.23 \pm 0.18 \mu\text{g L}^{-1}$. La concentración de Clor-a en La Luna disminuyó en de 2000-2001 a 2006-2007 en un 39% (Figura 30B).

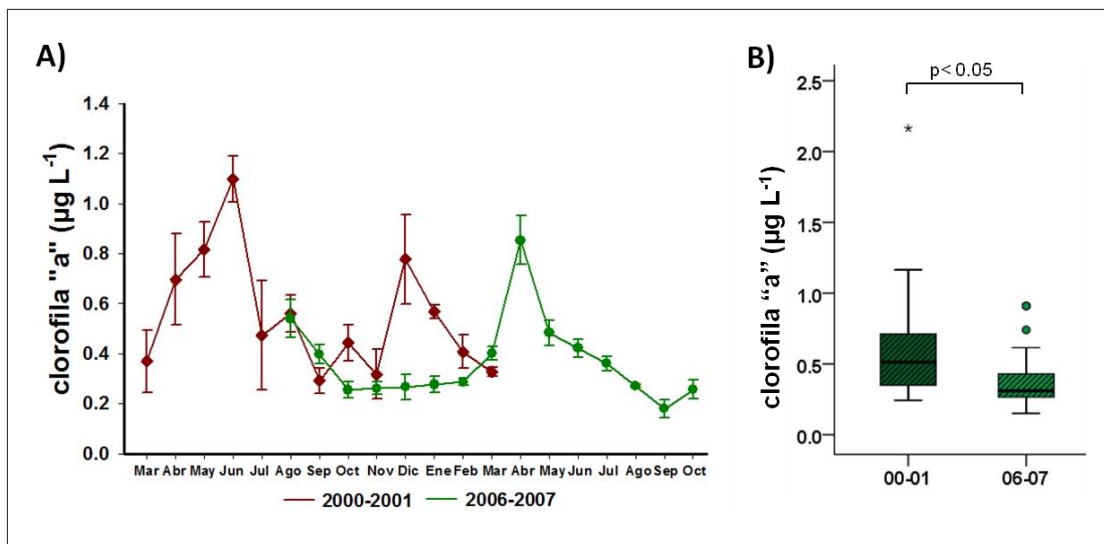


Figura 28.- A) Dinámica de la Clor-a del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo. B) Diagrama de caja y bigote de la concentración de la Clor-a del agua del lago La Luna en ambos periodos de muestreo (00-01 n=39, 06-07 n= 45).

Resumendo, de la misma manera que en El Sol, en La Luna no se registró variación en el comportamiento de la temperatura entre periodos de muestreo. Adicionalmente, el N-NH₄, P-PSR y el cociente NID:P-PSR se mantuvieron sin cambios. Dentro de los parámetros que registraron valores más altos en el periodo 2006-2007 se tienen el pH, OD, N-NO₂ y Si-SiSR. Por otro lado la K₂₅, %SPAR, N-NO₃, NID y Clor-*a* disminuyeron para el segundo periodo de muestreo (Tabla 2).

Tabla 2. Valor promedio, mínimo y máximo (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y biomasa fitoplanctónica en el lago La Luna. (Est = Significancia de la prueba estadística, N.S. = No significativo. S = Significativo, Dif = diferencia registrada en el valor promedio entre periodos de muestreo, \uparrow = aumento hacia en segundo periodo de muestreo, \downarrow = disminución hacia el segundo periodo de muestreo).

Variable	2000-2001			2006-2007			est	dif
	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.		
Temp (°C)	8.5 \pm 1.7	5.74 \pm 0.21	10.85 \pm 0.37	8.65 \pm 1.6	4.52 \pm 0.32	10-33 \pm 0.28	N.S.	
OD (mg L ⁻¹)	6.8 \pm 0.8	5.89 \pm 0.04	8.59 \pm 0.79	7.0 \pm 0.6	6.22 \pm 0.03	8.6 \pm 0.17	S	0.2 \pm 0.2 \uparrow
pH	4.7 \pm 0.3	4.52 \pm 0.04	5.59 \pm 0.4	5.4 \pm 0.7	4.64 \pm 0.36	6.64 \pm 0.36	S	0.7 \pm 0.4 \uparrow
K ₂₅ (μS cm ⁻¹)	13.7 \pm 0.8	12.57 \pm 0.22	15.02 \pm 0.13	6.1 \pm 2.5	3.35 \pm 0.05	10.56 \pm 0.07	S	7.6 \pm 1 \downarrow
%SPAR en fondo	44 \pm 12	17	53	26 \pm 13	6	52	S	18.9 \pm 1 \downarrow
N-NO ₂ (μg L ⁻¹)	0.5 \pm 0.2	0.28 \pm 0	0.98 \pm 0.14	1.71 \pm 0.7	0.41 \pm 0.01	2.83 \pm 2.91	S	2.2 \pm 3 \uparrow
N-NO ₃ (μg L ⁻¹)	316.7 \pm 28	278.7 \pm 12.8	362.6 \pm 3.6	134.69 \pm 49.6	2.6 \pm 0.68	206.7 \pm 16.2	S	182.01 \pm 21.6 \downarrow
N-NH ₄ (μg L ⁻¹)	39.02 \pm 20.66	15.03 \pm 4.35	77.13 \pm 22.5	43.1 \pm 24.6	12.83 \pm 2.94	102.6 \pm 26.4	N.S.	
NID (μg L ⁻¹)	356.4 \pm 23.6	299.3 \pm 61.6	368.66 \pm 4.7	179.52 \pm 66.02	16.34 \pm 2.9	270.07 \pm 33.27	S	176.88 \pm 42.42 \downarrow
P-PSR (μg L ⁻¹)	3.97 \pm 4.5	0.41 \pm 0.18	17.24 \pm 7.36	3.68 \pm 4.2	1.47 \pm 0.74	18.55 \pm 3.27	N.S.	
Si-SiSR (μg L ⁻¹)	17.3 \pm 28.4	3.28 \pm 0.71	108.4 \pm 52.3	79.96 \pm 35.07	14.9 \pm 9.3	220.87 \pm 28.73	S	62.66 \pm 6.67 \uparrow
NID:P-PSR	244 \pm 256	21	832	77 \pm 38	1	131	N.S.	
Clor- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	0.6 \pm 0.35	0.29 \pm 0.05	1.1 \pm 0.09	0.37 \pm 0.17	0.18 \pm 0.04	0.85 \pm 0.1	S	0.23 \pm 0.18 \downarrow

Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos lagos en el periodo de muestreo 2000-2001

Temperatura

El comportamiento mensual en ambos lagos es prácticamente el mismo. Las temperaturas más altas fueron en los meses de junio a septiembre de 2000 y las más bajas se presentaron en diciembre de 2000 y enero de 2001. El Sol tuvo valores de $5.25 \pm 0.08^\circ\text{C}$ en enero de 2001 a $10.81 \pm 0.13^\circ\text{C}$ en julio de 2000, su promedio anual fue de $9.2 \pm 1.5^\circ\text{C}$. La Luna presentó valores de $5.74 \pm 0.21^\circ\text{C}$ en enero de 2001 a $10.85 \pm 0.37^\circ\text{C}$ en julio de 2000, con un promedio de $8.5 \pm 1.7^\circ\text{C}$ (Figura 31A).

El análisis estadístico confirmó que no existen diferencias significativas entre las temperaturas del agua obtenidos en ambos lagos ($p > 0.05$) (Figura 31B).

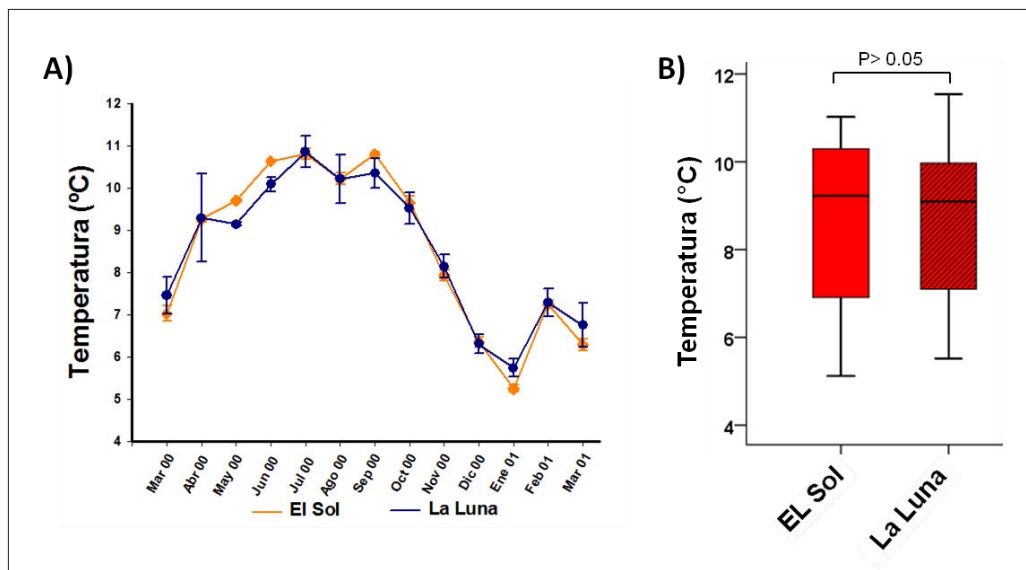


Figura 31.- A) Dinámica de la temperatura del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la temperatura del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=162$, La Luna $n=124$).

Oxígeno disuelto (OD)

El comportamiento mensual de este parámetro fue similar en ambos lagos, las concentraciones más altas se registraron de noviembre de 2000 a marzo de 2001 y las más bajas de junio a septiembre de 2000. El Sol tuvo un intervalo de 5.76 ± 0.04 a 7.74 ± 0.07 mg L^{-1} en junio y noviembre de 2000, respectivamente, con un promedio de 6.6 ± 0.6 mg L^{-1} . En La Luna los valores fueron de 5.89 ± 0.04 $\mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre de 2000 a 8.59 ± 0.79 $\mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001, con un promedio 6.8 ± 0.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 32A).

Al igual que para la temperatura, el análisis estadístico confirmó que no existieron diferencias significativas en la concentración de oxígeno disuelto entre ambos lagos ($p > 0.05$) (Figura 32B).

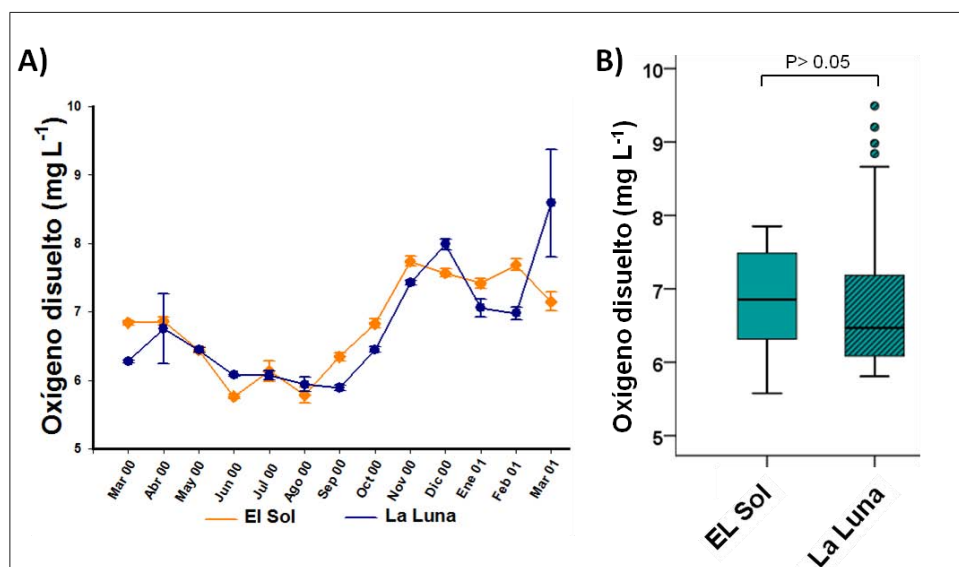


Figura 32.- A) Dinámica del oxígeno disuelto del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del oxígeno disuelto del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=162$, La Luna $n=124$).

pH

La dinámica anual en ambos lagos presenta el mismo comportamiento; los valores más altos se presentaron en los meses de marzo a junio de 2000 y los valores más bajos de octubre de 2000 a febrero de 2001. Sin embargo, los valores en El Sol son más elevados con registros de 4.93 ± 0.03 en febrero de 2001 a 6.1 ± 0.2 en abril de 2000, con una media anual de 5.5 ± 0.3 . En La Luna los valores fueron de 4.52 ± 0.04 en febrero de 2001 a 5.59 ± 0.4 en abril de 2000, con un promedio anual de 4.7 ± 0.3 (Figura 33A).

El análisis estadístico mostró que existen diferencias significativas en los valores de pH de los lagos con una diferencia de 0.8 ± 0 unidades ($p < 0.05$), siendo menor el pH de La Luna en un 13% (Figura 33B).

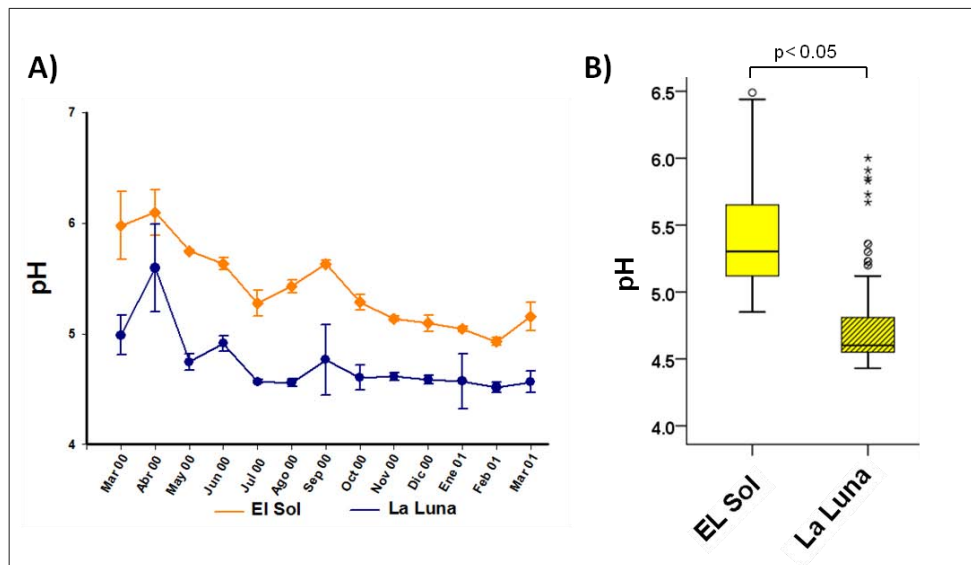


Figura 33.- A) Dinámica del pH del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del pH del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=162$, La Luna $n= 124$).

Conductividad (K_{25})

La dinámica del comportamiento de la conductividad en ambos lagos sigue el mismo patrón. Los valores más bajos se registraron en los meses de febrero y marzo y se aprecian dos picos, uno entre mayo y junio, para luego descender en septiembre y, con posterioridad volver a aumentar en enero. Los valores en El Sol fueron consistentemente más altos que los de La Luna. Los registros en El Sol fueron de $14.8 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $17.7 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en marzo de 2001 y enero de 2001 respectivamente, con un promedio de $16 \pm 0.7 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los registros en La Luna fueron de 12.5 ± 0.2 a $15.0 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ también en marzo de 2001 y enero de 2001, con un promedio de $13.7 \pm 0.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ (figura 34A).

El análisis estadístico confirmó la diferencia significativa observada gráficamente en la conductividad ($p < 0.05$), esta diferencia fue de $2.3 \pm 0.1 \mu\text{S.cm}^{-1}$ lo que significa que el lago El Sol estuvo 14% más mineralizado que La Luna (Figura 34B).

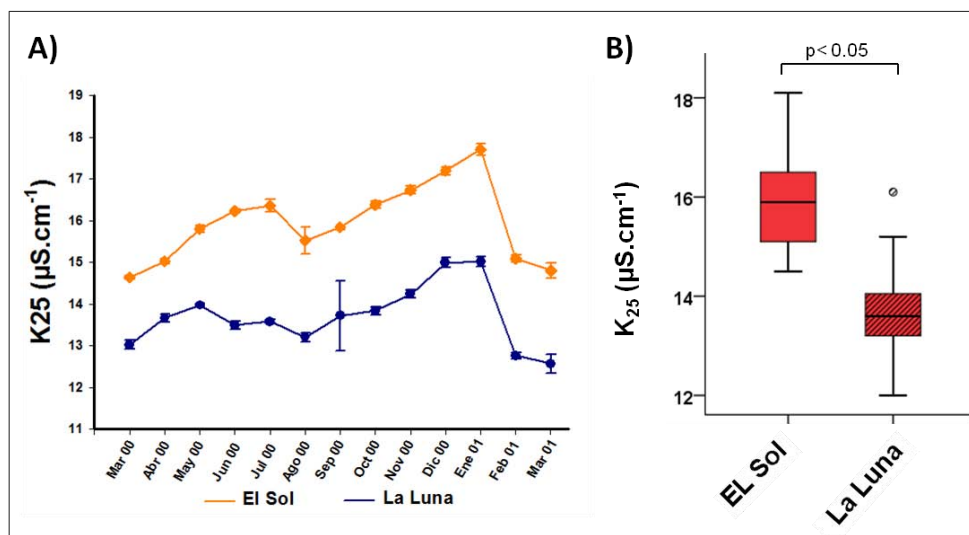


Figura 34.- A) Dinámica de la conductividad del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la conductividad del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=162$, La Luna $n= 124$).

Radicación fotosintéticamente activa (PAR)

Los valores del porcentaje de PAR que llegan al fondo de los lagos fueron más altos y más variables en La Luna con un intervalo de 17% a 53% en junio y julio de 2000, respectivamente y un promedio anual de $45 \pm 12\%$. Los valores en El Sol fueron de 3 a 26 % en octubre y marzo de 2000, respectivamente, con un promedio de $11 \pm 6\%$ (figura 35A).

El análisis estadístico confirma que se presentaron diferencias significativas entre El Sol y La Luna, con un mayor porcentaje anual de SPAR que llega al fondo en La Luna ($p < 0.05$) con una diferencia de $34 \pm 6\%$ con respecto a El Sol (Figura 35B).

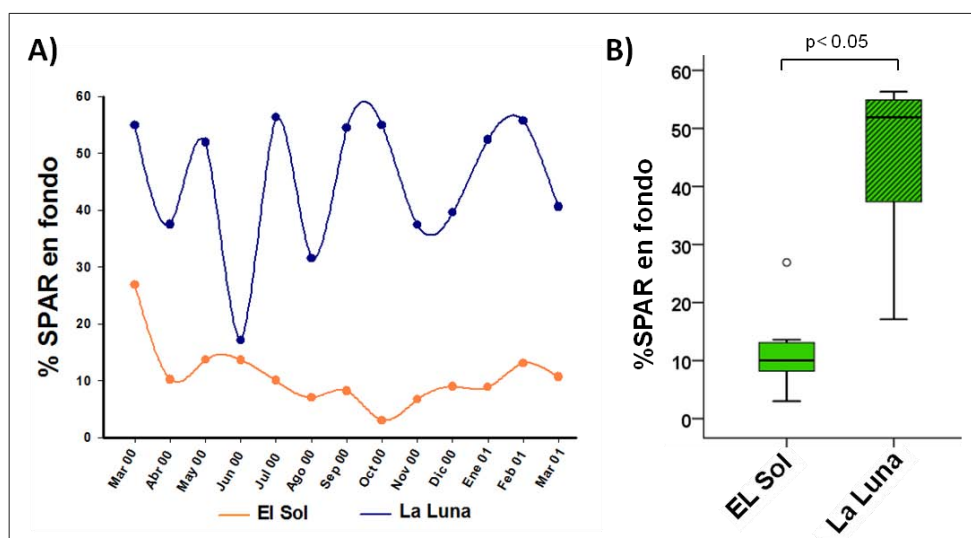


Figura 35.- A) Dinámica del %SPAR en fondo en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del %SPAR en fondo en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=13$, La Luna $n=13$).

Nutrientes

Nitrógeno como nitritos ($N-NO_2$)

Las concentraciones de $N-NO_2$ en La Luna fueron menores que las registradas en El Sol. Los valores en El Sol fueron de $0.56 \pm 0 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 a $4.3 \pm 1.18 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero de 2001, el promedio fue de $1.85 \pm 0.41 \mu\text{g L}^{-1}$. El intervalo de variación en La Luna fue de $0.28 \mu\text{g L}^{-1} \pm 0$ en enero y marzo de 2001 a $0.98 \mu\text{g L}^{-1} \pm 0.14$ en agosto de 2000, su promedio anual fue de $0.5 \pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 36A).

El análisis estadístico demostró que El Sol presentó concentraciones significativamente mayores que en La Luna ($p < 0.05$), con una diferencia de $1.35 \pm 0.21 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 36B). El Sol estuvo más enriquecido que La Luna en $N-NO_2$ en un 73%. Esta diferencia no es importante debido a que en ambos lagos los valores de este nutriente están muy por debajo del límite señalado para ambientes oligotróficos ($\leq 500 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998).

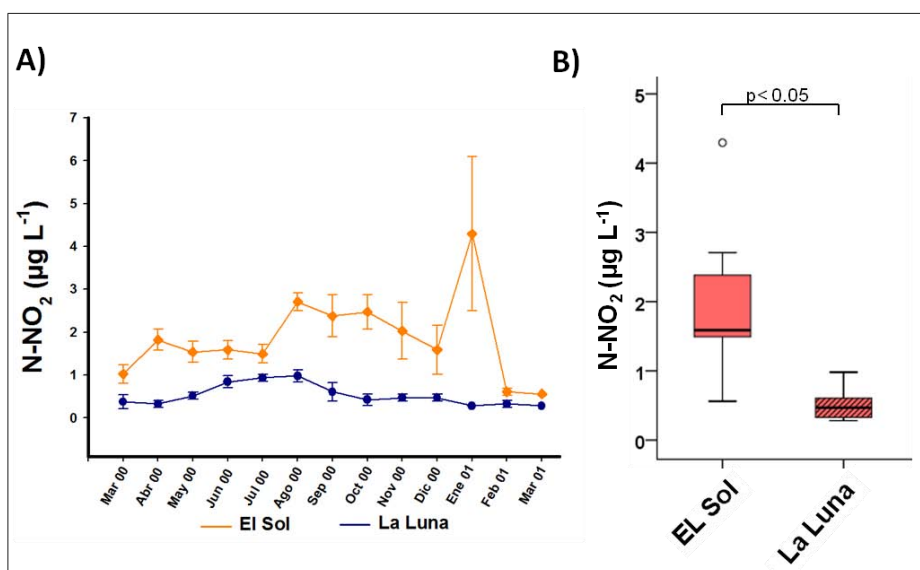


Figura 36.- Dinámica de $N-NO_2$ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de $N-NO_2$ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n=39$).

Nitrógeno como nitratos (N-NO₃)

La dinámica de la concentración de N-NO₃ es diferente entre ambos lagos. La concentración fue mayor en La Luna con valores por arriba de los 250 µg L⁻¹, en comparación con los de El Sol que no rebasan los 150 µg L⁻¹. Los valores máximos y mínimos de ambos ciclos no se presentaron en los mismos meses. En El Sol el intervalo fue de 1.26 ± 0.24 µg L⁻¹ en marzo de 2001 a 138.25 ± 8.74 µg L⁻¹ en noviembre de 2000, con una media anual de 65.97 ± 44.34 µg L⁻¹. El intervalo de variación en La Luna fue de 278.78 ± 12.80 µg L⁻¹ en agosto de 2000 a 362.59 ± 3.56 µg L⁻¹ en enero de 2001, con una media anual de 316 ± 27.92 µg L⁻¹. (Figura 37A).

El análisis estadístico mostró que hay diferencias significativas en la concentración de N-NO₃ (p<0.05) y que ésta fue mayor en La Luna, con una diferencia de 250.7 ± 16.3 µg L⁻¹ (Figura 37B). La Luna estuvo 380% más enriquecido que El Sol. En el sentido trófico la diferencia no parece importante debido a que el límite en lagos oligotróficos es de 1000 µg L⁻¹ (Esteves, 1998). Sin embargo biológicamente indica una mayor asimilación del N-NO₃ por los organismos que habitan en El Sol.

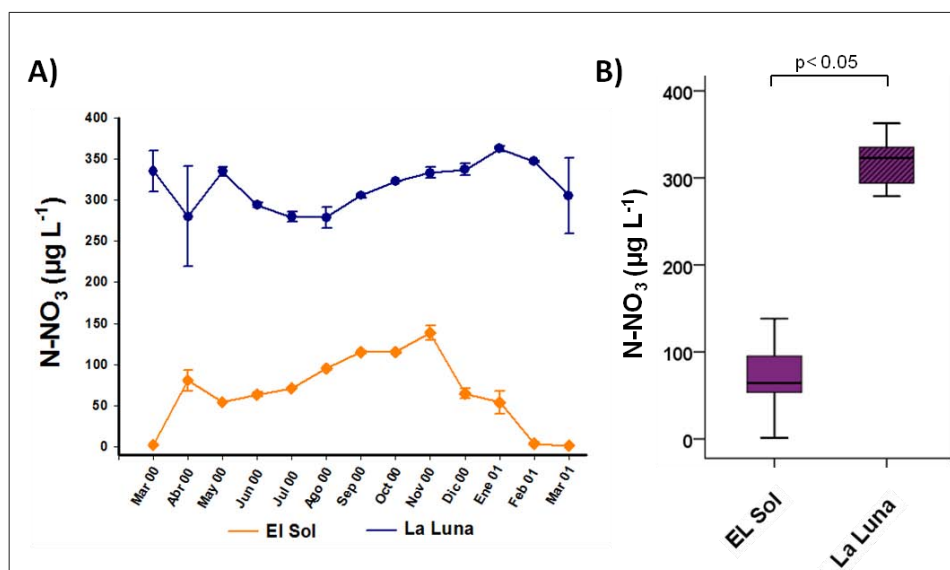


Figura 37.- Dinámica de N-NO₃ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de N-NO₃ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol n=78, La Luna n= 39).

Nitrógeno como amonio ($N-NH_4$)

La dinámica de la concentración de $N-NH_4$ fue muy similar entre ambos lagos, salvo por el mes de marzo de 2000 cuando La Luna presentó un valor más alto ($30.67 \pm 19.29 \mu\text{g L}^{-1}$) que El Sol ($18.07 \pm 2.48 \mu\text{g L}^{-1}$). El valor más bajo en ambos lagos fue de $15.03 \pm 4.35 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 y el valor más alto de $77.13 \pm 22.53 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio de 2000. Los promedios anuales fueron de $38.06 \pm 21.4 \mu\text{g L}^{-1}$ y $39.02 \pm 20.66 \mu\text{g L}^{-1}$ en El Sol y La Luna, respectivamente (Figura 38A).

El análisis estadístico mostró la ausencia de diferencias significativas en la concentración de $N-NH_4$ entre ambos lagos ($p > 0.05$) (Figura 38B).

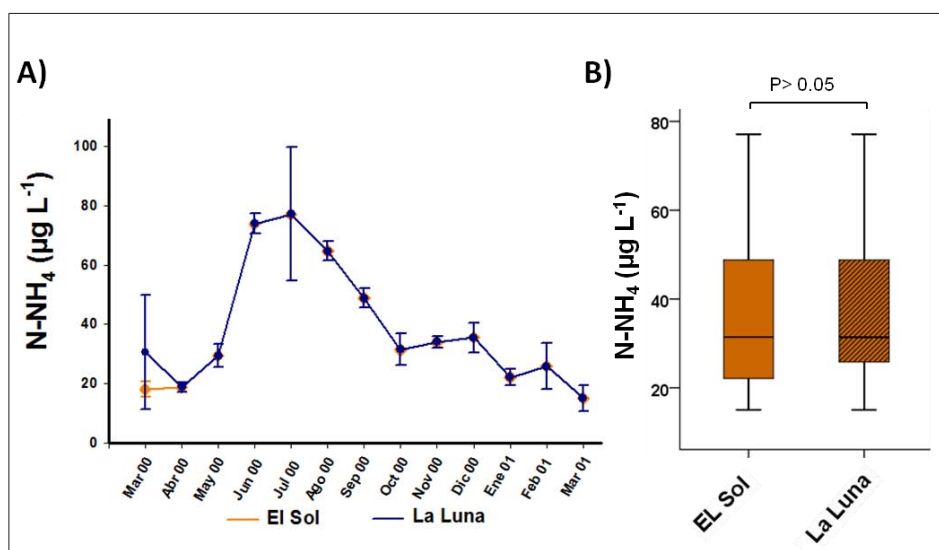


Figura 38.- Dinámica de $N-NH_4$ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de $N-NH_4$ del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n=39$).

Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

La dinámica de la concentración del NID fue distinta en ambos lagos. En La Luna se registraron concentraciones mayores que en El Sol a lo largo de todo el periodo de muestreo. Las concentraciones de El Sol no rebasaron los $200 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que La Luna presentó valores superiores a $250 \mu\text{g L}^{-1}$. El Sol tuvo un intervalo de $16.85 \pm 4.59 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo de 2001 a $185.03 \pm 5.95 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2000. La Luna tuvo valores de $299.28 \pm 61.59 \mu\text{g L}^{-1}$ en abril de 2000 a $387.52 \pm 5.19 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero de 2001. Los promedios anuales fueron de $106 \pm 57.7 \mu\text{g L}^{-1}$ y $356.4 \pm 23.6 \mu\text{g L}^{-1}$ en El Sol y La Luna, respectivamente (Figura 39A).

El análisis estadístico muestra que existieron diferencias significativas entre las concentraciones registradas en los dos lagos ($p < 0.05$), el promedio de esta diferencia fue de $250.4 \pm 34.1 \mu\text{g L}^{-1}$. (Figura 39B). Así La Luna estuvo 234% más enriquecida en NID que El Sol. Esta diferencia en los promedios no indica diferencias en el estado trófico. Ambos lagos presentan valores dentro del intervalo reportado para lagos oligotróficos ($\leq 360 \mu\text{g L}^{-1}$; Larson, 1996).

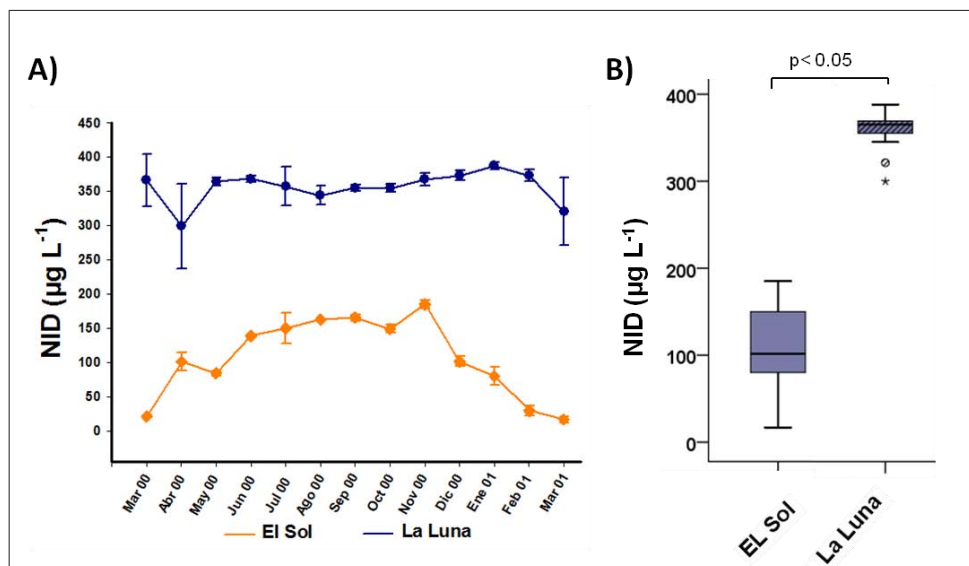


Figura 39.- Dinámica del NID del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del NID del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n= 39$).

Fósforo soluble reactivo (P-PSR)

La dinámica de la concentración de P-PSR tiene un comportamiento similar de marzo a septiembre de 2000 y en febrero y marzo de 2001. De octubre de 2000 a enero de 2001 se observan ligeras variaciones entre ambos lagos, aún así en ambos cuerpos de agua los valores más bajos se registraron de abril a agosto de 2000. El Sol tuvo valores de $1.24 \pm 0.31 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2000 a $11.05 \pm 9.48 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero de 2001. La Luna tuvo valores de $0.41 \pm 0.18 \mu\text{g L}^{-1}$, a $17.24 \pm 7.36 \mu\text{g L}^{-1}$, en agosto y noviembre de 2000. En general se observaron valores más altos en El Sol. Los promedios fueron de $5.8 \pm 3.6 \mu\text{g L}^{-1}$ y $3.97 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en El Sol y La Luna, respectivamente (Figura 40A).

El análisis estadístico corroboró una diferencia significativa con una concentración de P-PSR más elevada en El Sol ($p < 0.05$), con una diferencia de $1.83 \pm 0.9 \mu\text{g L}^{-1}$ respecto a La Luna (Figura 40B). El Sol estuvo 32% más enriquecido en P-PSR que La Luna. Esta diferencia resulta relevante debido a que según Wetzel (1992) La Luna entra dentro de la categoría de lago ultra oligotrófico ($< 5 \mu\text{g L}^{-1}$) y El Sol dentro de oligotrófico (5 a $10 \mu\text{g L}^{-1}$).

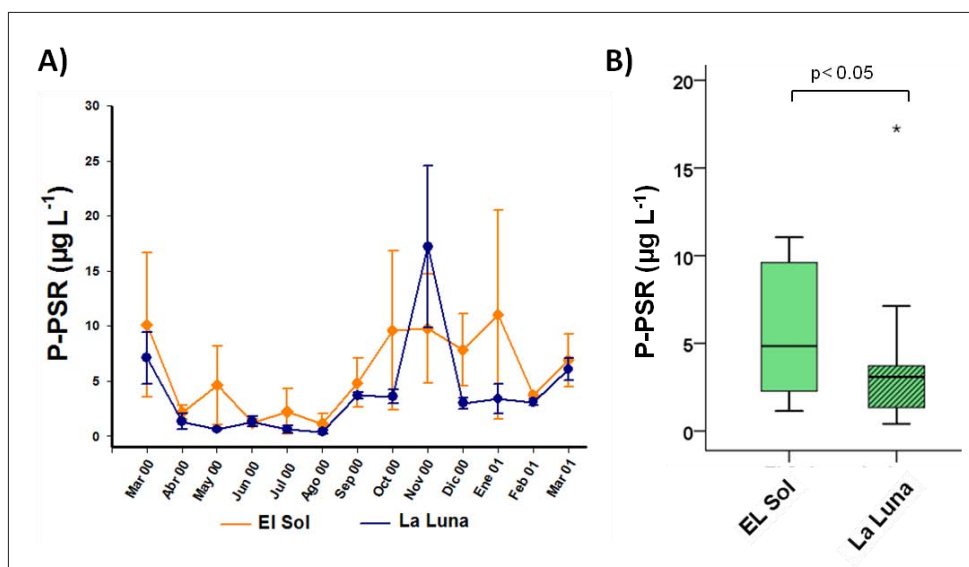


Figura 40.- Dinámica del P-PSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del P-PSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n= 39$).

Sílice soluble reactivo (Si-SiSR)

La dinámica del Si-SiSR en cada lago siguió un patrón diferente. En El Sol las concentraciones fueron más elevadas en general. Los meses de marzo, abril y mayo son los que presentan los valores más altos con concentraciones de $159.06 \pm 51.39 \mu\text{g L}^{-1}$, $113.28 \pm 89.33 \mu\text{g L}^{-1}$ y $205.68 \pm 40.67 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente, la concentración más baja registrada en El Sol fue de $23.5 \pm 14 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de diciembre de 2001, con un promedio anual de $68.9 \pm 56.6 \mu\text{g L}^{-1}$. En La Luna la dinámica presenta un pico en el mes de enero, ese mes es el más alto registrado en este lago y corresponde a una concentración de $108.41 \pm 52.26 \mu\text{g L}^{-1}$, la concentración más baja fue de $3.3 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ en octubre de 2000 y su promedio fue de $17.3 \pm 28.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 41A).

El análisis estadístico muestra que la concentración promedio registrada en los lagos fue diferente significativamente, dicha diferencia fue de $51.6 \pm 28.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ($p < 0.05$). (Figura 41B). El Sol estuvo 75% más enriquecido que La Luna.

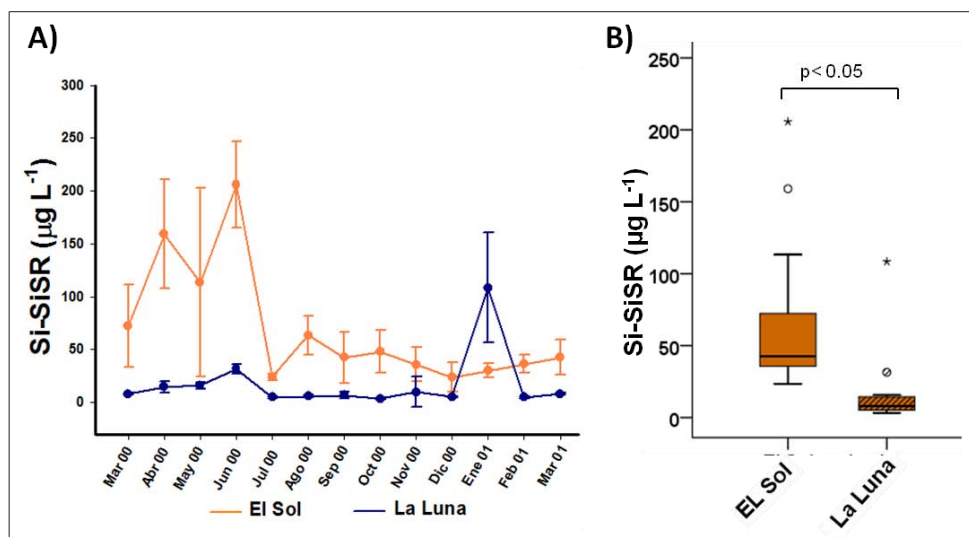


Figura 41.- A) Dinámica del Si-SiSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del Si-SiSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n= 39$).

Cociente de Redfield (NID:P-PSR)

La dinámica seguida por este cociente a lo largo del periodo de muestreo fue distinta en cada lago. En El Sol los valores fueron más bajos presentando dos picos: uno en junio y otro en agosto. El intervalo fue desde 2 hasta 143 El promedio del ciclo fue de 38 ± 44 . En La Luna por su parte existió una mayor variación en los datos. En mayo y agosto se presentaron dos picos muy marcados. El intervalo de los datos fue desde 21 hasta 834. El promedio del ciclo en este lago fue de 244 ± 257 (figura 42A)

La diferencia apreciada a simple vista al observar las dinámicas de ambos lagos fue confirmada a través del análisis estadístico con el valor del cociente más elevado en La Luna ($p < 0.05$) (figura 42B). En ambos lagos el nutriente limitante fue el fósforo.

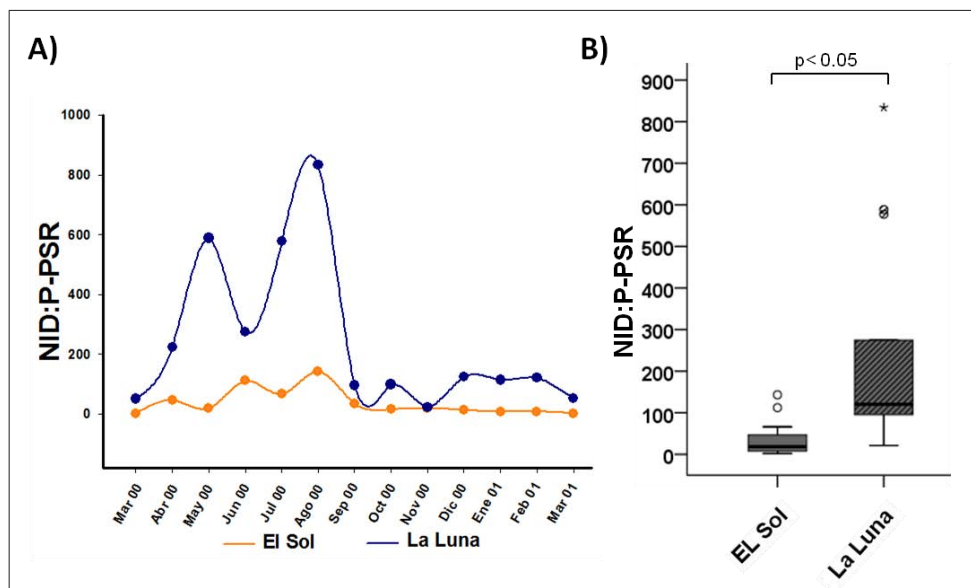


Figura 42.- A) Dinámica del NID:P-PSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del NID:P-PSR del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=78$, La Luna $n= 39$).

Comparación de la biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2000-2001

Clorofila "a" (Clor-a)

La dinámica de la Clor-*a* fue diferente dado que en El Sol presentó valores más altos que La Luna, principalmente en los meses de agosto a octubre con concentraciones por arriba de los $2 \mu\text{g L}^{-1}$ y $4 \mu\text{g L}^{-1}$. La Luna por su parte presentó concentraciones por debajo de $2 \mu\text{g L}^{-1}$. El intervalo de los valores en el lago El Sol fue de $0.22 \pm 0.03 \mu\text{g L}^{-1}$ a $5.05 \pm 1.49 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio y noviembre de 2000, su media fue de $1.67 \pm 1.55 \mu\text{g L}^{-1}$. En La Luna los valores fueron de 0.29 ± 0.05 a $1.1 \pm 0.09 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre y junio de 2000 con una media anual de $0.6 \pm 0.36 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 43A).

El análisis estadístico mostró que existe diferencia significativa en las concentraciones promedio de Clor-*a*, esta fue de $1.2 \pm 0.63 \mu\text{g L}^{-1}$ ($p < 0.05$). El Sol presentó 12% más biomasa fitoplanctónica que La Luna (Figura 43B).

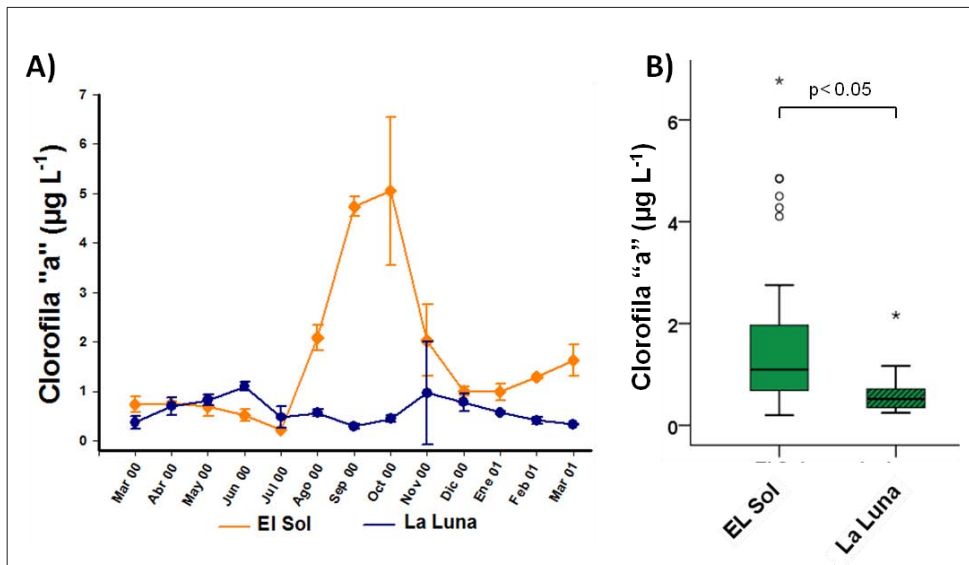


Figura 43.- A) Dinámica de la Clor-a del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la Clor-a del agua en el ciclo 2000-2001 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=39$, La Luna $n=39$).

Recapitulando, la comparación del comportamiento de las variables evaluadas entre ambos lagos arrojó que en el periodo 2000-2001 aquellos parámetros que no presentan diferencias entre los lagos son la temperatura, el OD y el N-NH₄. Por su parte el pH, K₂₅, N-NO₂, P-PSR, Si-SiSR y Clor-*a* fueron mayores en El Sol; el %SPAR, N-NO₃, NID y NID:PSR fueron mayores en La Luna (Tabla 3).

Tabla 3. Valor promedio, mínimo y máximo (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2000-2001. (Est = Significancia de la prueba estadística, N.S. = No significativo. S = Significativo, Dif = diferencia registrada en el valor promedio entre periodos de muestreo, s = cuando El Sol presentó el promedio más elevado, l = cuando La Luna presentó el promedio más elevado).

Variable	El Sol			La Luna			Est	Dif
	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.		
Temp (°C)	9.2 \pm 1.5	5.2 \pm 0.08	10.81 \pm 0.13	8.5 \pm 1.7	5.74 \pm 0.21	10.85 \pm 0.37	N.S.	
OD (mg L ⁻¹)	6.6 \pm 0.6	5.76 \pm 0.04	7.74 \pm 0.07	6.8 \pm 0.8	5.89 \pm 0.04	8.59 \pm 0.79	N.S.	
pH	5.5 \pm 0.3	4.93 \pm 0.03	6.1 \pm 0.2	4.7 \pm 0.3	4.52 \pm 0.04	5.59 \pm 0.4	S	0.8 \pm 0 s
K ₂₅ (μ S cm ⁻¹)	16 \pm 0.7	14.64 \pm 0.05	17.7 \pm 0.15	13.7 \pm 0.8	12.57 \pm 0.22	15.02 \pm 0.13	S	2.3 \pm 0.1 s
%SPAR en fondo	10 \pm 5	3	26	44 \pm 12	17	53	S	34 \pm 7 l
N-NO ₂ (μ g L ⁻¹)	1.85 \pm 0.41	0.56 \pm 0	4.3 \pm 1.18	0.5 \pm 0.2	0.28 \pm 0	0.98 \pm 0.14	S	1.35 \pm 0.21 s
N-NO ₃ (μ g L ⁻¹)	66.0 \pm 44.3	1.26 \pm 0.24	138.25 \pm 8.74	316.7 \pm 28	278.7 \pm 12.8	362.6 \pm 3.6	S	250.7 \pm 16.3 l
N-NH ₄ (μ g L ⁻¹)	38.06 \pm 21.4	15.03 \pm 4.35	77.13 \pm 22.53	39.02 \pm 20.66	15.03 \pm 4.35	77.13 \pm 22.5	N.S.	
NID (μ g L ⁻¹)	106.7 \pm 57.7	16.85 \pm 4.6	185.03 \pm 5.95	356.4 \pm 23.6	299.3 \pm 61.6	368.66 \pm 4.7	S	250 \pm 34.1 l
P-PSR (μ g L ⁻¹)	5.8 \pm 3.6	1.14 \pm 0.89	11.05 \pm 9.48	3.97 \pm 4.5	0.41 \pm 0.18	17.24 \pm 7.36	S	1.83 \pm 0.9 s
Si-SiSR (μ g L ⁻¹)	68.9 \pm 56.6	23.5 \pm 14.02	205.6 \pm 40.67	17.3 \pm 28.4	3.28 \pm 0.71	108.4 \pm 52.3	S	51.6 \pm 28.2 s
NID:P-PSR	37 \pm 44	2	143	244 \pm 256	21	832	S	207 \pm 212 l
Clor- <i>a</i> (μ g L ⁻¹)	1.67 \pm 1.55	0.22 \pm 0.03	5.05 \pm 1.49	0.6 \pm 0.35	0.29 \pm 0.05	1.1 \pm 0.09	S	1.2 \pm 0.63 s

Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre ambos lagos en el periodo de muestreo 2006-2007

Temperatura

La temperatura del agua en ambos lagos varió de manera similar a lo largo del periodo de muestreo. Las temperaturas más altas se presentaron en los meses de julio a octubre tanto en 2006 como en 2007 y las más bajas se observaron de diciembre de 2006 a febrero de 2007. En El Sol fluctuó de 5.57 ± 0.19 °C en febrero de 2007 a 10.28 ± 0.2 °C en agosto de 2006. La Luna presentó su menor valor en febrero de 2007 con 4.52 ± 0.32 °C y el más alto de 10 ± 0.45 °C en el mes de septiembre de 2006. Los promedios anuales fueron de 8.1 ± 1.9 °C y 8.65 ± 1.6 °C en El Sol y La Luna, respectivamente (Figura 44A).

El análisis estadístico mostró que no existen diferencias significativas entre las temperaturas de los lagos ($p > 0.05$) (Figura 44B).

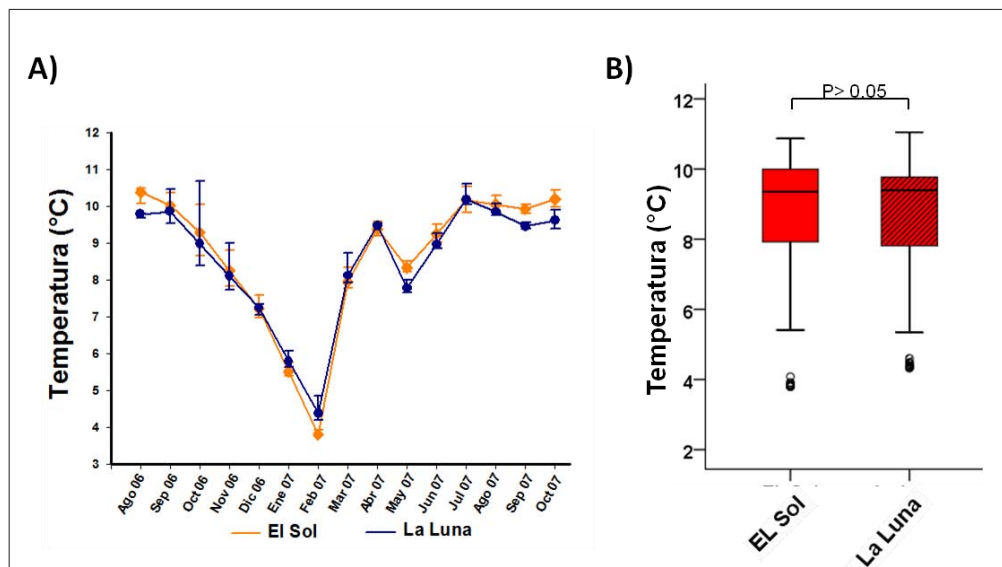


Figura 44.- A) Dinámica de la temperatura del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la temperatura del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=192$, La Luna $n=139$).

Oxígeno disuelto (OD)

El comportamiento mensual de OD en ambos lagos sigue dinámicas similares aunque los meses que registraron las mayores concentraciones no coinciden entre lagos. Las concentraciones más altas en El Sol se registraron en enero y febrero de 2007 y en La Luna fueron en febrero y marzo de 2007. Las concentraciones más bajas se registraron en septiembre de 2006 en El Sol y en septiembre de 2007 en La Luna. El intervalo de variación en El Sol fue de $6.19 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ en septiembre de 2006 a $8.52 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ en febrero de 2007. Los valores en La Luna fueron de $6.22 \pm 0.03 \text{ mg L}^{-1}$ en septiembre de 2007 a $8.6 \pm 0.17 \text{ mg L}^{-1}$ en marzo de 2007. En términos generales, en El Sol se presentaron mayores concentraciones con un promedio de $7.3 \pm 0.7 \text{ mg L}^{-1}$ mientras que en La Luna fueron de $7.0 \pm 0.6 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 45A).

El análisis estadístico mostró que la concentración de OD obtenida en El Sol en este periodo de estudio fue significativamente diferente que la registrada en La Luna ($p < 0.05$). La diferencia de concentración de OD registrada es de $0.3 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ (figura 45B). El Sol estuvo 3% más oxigenado que La Luna. Este aumento no representa una diferencia biológicamente importante debido a que ambos valores están dentro de un intervalo aceptable de oxigenación ($5\text{-}8 \text{ mg L}^{-1}$) para los organismos acuáticos (Goyenola, 2007).

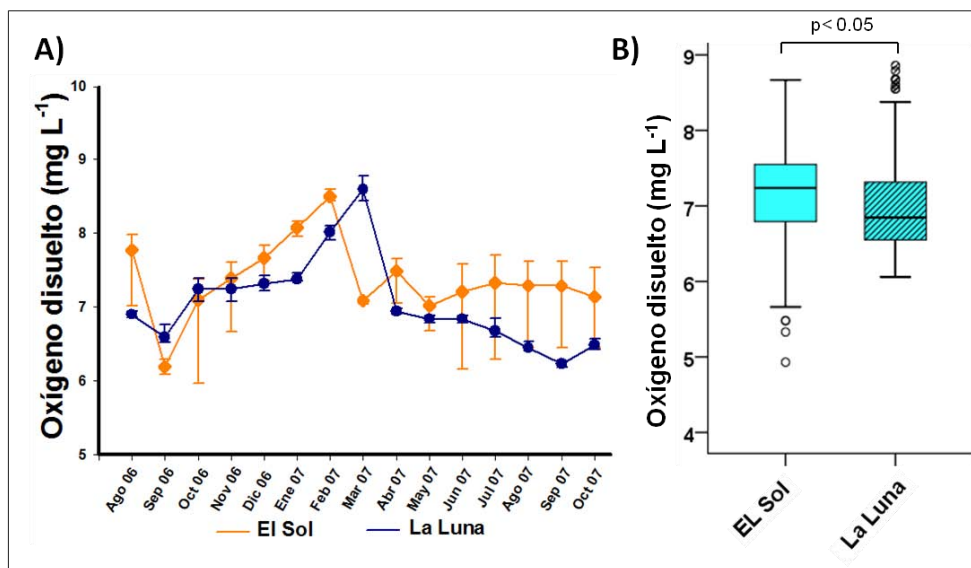


Figura 45.- A) Dinámica del oxígeno disuelto del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del oxígeno disuelto del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=192$, La Luna $n=139$).

pH

El comportamiento del pH a lo largo del periodo de estudio fue disímil en ambos lagos. De agosto de 2006 a febrero de 2007 ambos lagos tuvieron registros cercanos a seis unidades, sin embargo, de marzo a octubre de 2007 en El Sol se incrementaron sus valores a un pH cercano a nueve. Por el contrario, en este lapso el pH de La Luna se redujo a valores cercanos a cinco. El intervalo de variación en El Sol fue de 5.7 ± 0.02 en septiembre de 2006 a 8.8 ± 0.68 en julio de 2007, con un promedio anual de 6.98 ± 0.16 . La Luna presentó valores de 4.64 ± 0.36 en octubre a 6.64 ± 0.36 en diciembre de 2006, respectivamente, con un promedio anual de 5.43 ± 0.18 (Figura 46A).

El análisis estadístico indicó que el pH en El Sol es diferente significativamente -más básico- que el de La Luna -más ácido- ($p < 0.05$), con una diferencia de 1.3 ± 0.5 unidades de pH (Figura 46B). El pH en El Sol fue 22% más elevado que en La Luna.

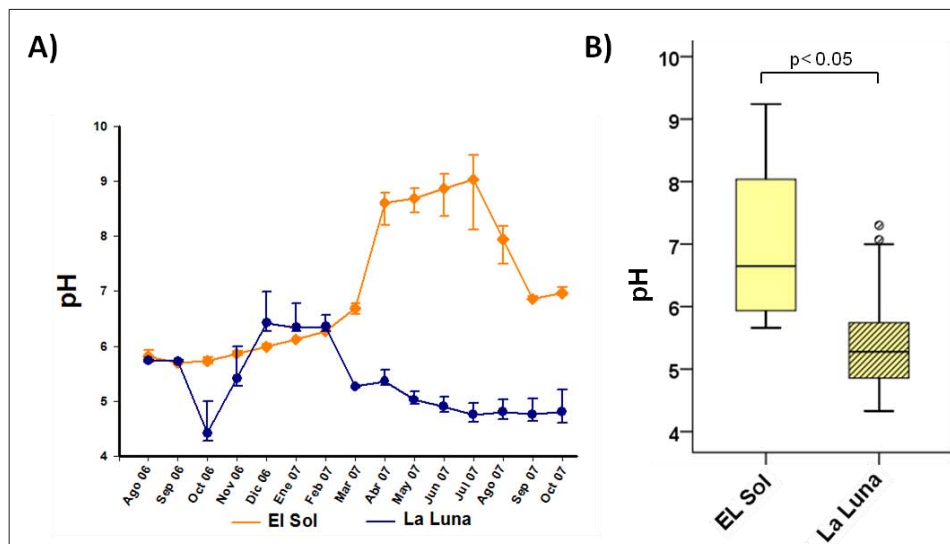


Figura 46.- A) Dinámica del pH del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del pH del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=192$, La Luna $n=139$).

Conductividad (K_{25})

El comportamiento que siguió la conductividad a lo largo del periodo de muestreo en ambos lagos fue diferente. El Sol presentó valores más altos que los registrados en La Luna. Mientras que El Sol tuvo valores superiores a los $40 \mu\text{S cm}^{-1}$ con un intervalo de $44 \mu\text{S cm}^{-1}$ en febrero de 2007 a $65.7 \pm 0.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ en octubre de 2006 y un promedio anual de $57.8 \pm 0.3 \mu\text{S cm}^{-1}$. La Luna presentó valores menores a los $11 \mu\text{S cm}^{-1}$ con un intervalo de $3.3 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en septiembre de 2007 a $10.5 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ en septiembre de 2006 y un promedio anual de $6.1 \pm 0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$. (Figura 47A).

El análisis estadístico mostró una diferencia significativa en los valores de la conductividad de ambos lagos ($p < 0.05$) de $52 \pm 3.7 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 47B). El Sol estuvo 89% más mineralizado que La Luna en este ciclo anual.

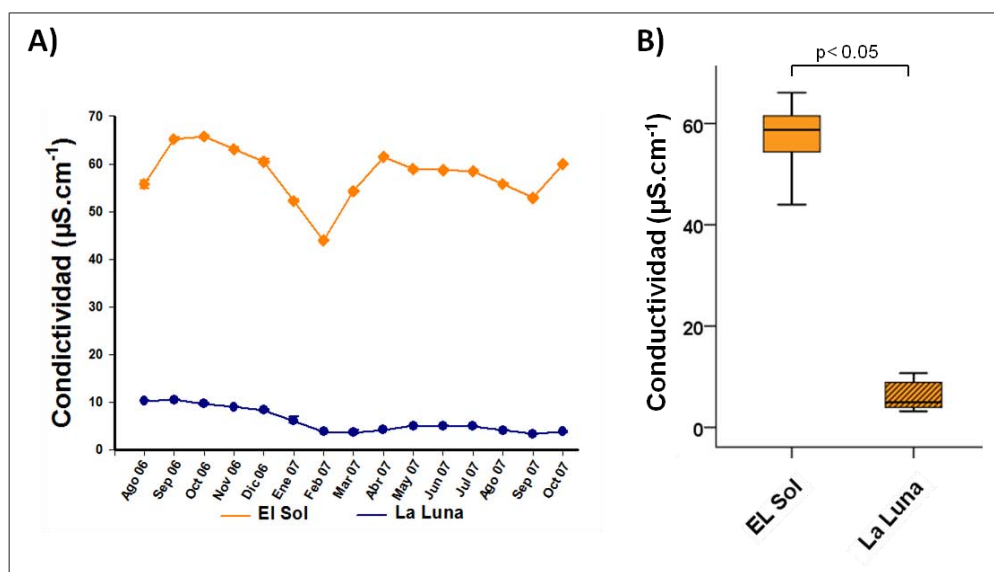


Figura 47.- Dinámica de la conductividad del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la conductividad del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=192$, La Luna $n= 139$).

Radicación fotosintéticamente activa (PAR)

Las dinámicas de los valores del porcentaje de PAR en superficie que alcanzan el fondo de los lagos fueron disímiles, no comparten los meses donde presentaron sus valores máximos ni mínimos. Los valores fueron más altos en La Luna con un intervalo de 7% a 52% en octubre y marzo de 2007 respectivamente, con un promedio anual de $26 \pm 13\%$. Los valores en El Sol fueron desde 0% en agosto de 2006 a 6% en abril de 2007, con un promedio de $2 \pm 1\%$ (Figura 48A).

El análisis estadístico confirmó que existe una diferencia significativa en los porcentajes del SPAR que llegan al fondo de los lagos ($p < 0.05$), en el cual La Luna es un $24 \pm 12\%$ más transparente que El Sol (Figura 48B).

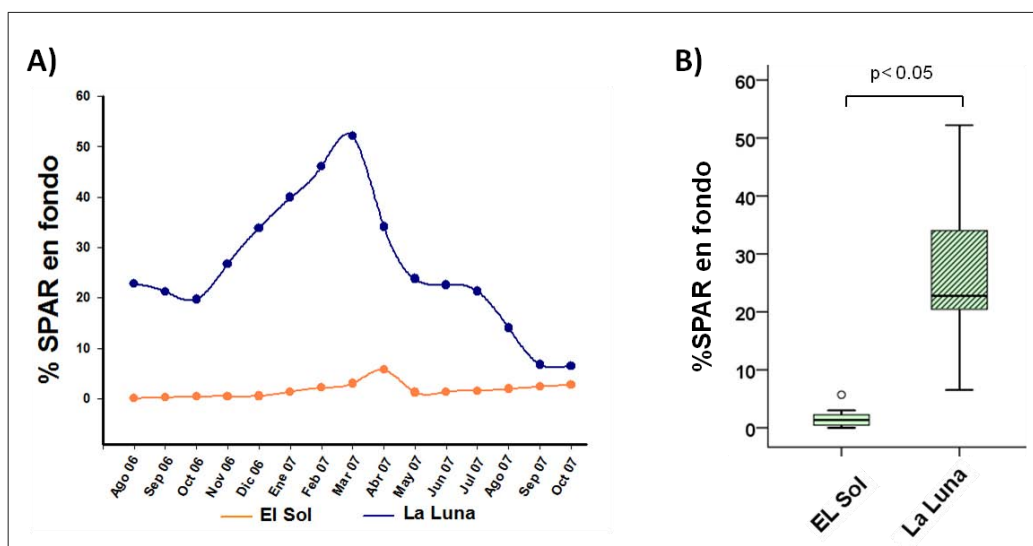


Figura 48.- Dinámica del %SPAR en fondo en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del %SPAR en fondo en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=15$, La Luna $n= 15$).

Nutrientes

Nitrógeno como nitritos ($N-NO_2$)

Los nitritos en ambos lagos estuvieron por debajo de $4 \mu\text{g L}^{-1}$. El Sol presentó valores más bajos y con menor variabilidad que los encontrados en La Luna. El intervalo de variación en La Luna fue de $0.41 \pm 0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ a $2.83 \pm 2.91 \mu\text{g L}^{-1}$ en marzo y julio de 2007 respectivamente, con un promedio de $1.71 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores en El Sol fueron de $0.54 \pm 0.26 \mu\text{g L}^{-1}$ en diciembre de 2006 a $1.29 \pm 0.29 \mu\text{g L}^{-1}$ en enero de 2007, su promedio anual fue de $0.85 \pm 0.21 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 49A).

Los análisis estadísticos confirman una diferencia significativa entre los lagos, en donde se presentó una concentración mayor de $N-NO_2$ en La Luna ($p < 0.05$). La diferencia entre los lagos fue de $0.86 \pm 0.49 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 49B). La Luna estuvo 100% más enriquecida en $N-NO_2$ que El Sol. Esta mayor concentración de $N-NO_2$ en La Luna no refleja una verdadera importancia limnológica o biológica ya que los valores definidos para los nitritos en ambientes oligotróficos no rebasan los $500 \mu\text{g L}^{-1}$ (Esteves, 1998) y ambos lagos presentaron valores mensuales y promedio menores a $6 \mu\text{g L}^{-1}$.

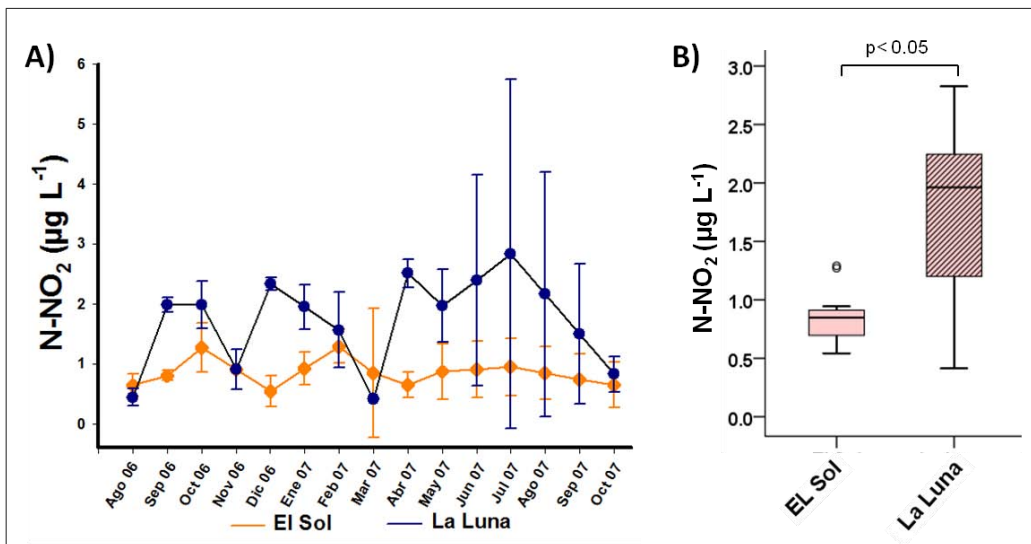


Figura 49.- A) Dinámica del $N-NO_2$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del $N-NO_2$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Nitrógeno como nitratos ($N-NO_3$)

La dinámica de los nitratos muestra que La Luna presentó mayores concentraciones con valores por arriba de los $50 \mu\text{g L}^{-1}$, con excepción del mes de noviembre de 2006, mientras que los valores de El Sol no rebasan los $50 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores de El Sol fueron de 0.6 ± 0.6 a $26.2 \pm 5.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en abril y julio de 2007 respectivamente, con un promedio anual de $7.2 \pm 1.9 \mu\text{g L}^{-1}$. El intervalo de valores en La Luna fue de 2.6 ± 0.6 a $206.7 \pm 16.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre y noviembre de 2006, respectivamente, con un promedio anual de $134.7 \pm 17.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 50A).

El análisis estadístico reveló que se presentan concentraciones de $N-NO_3$ significativamente mayores en La Luna, con una diferencia con El Sol de $127.42 \pm 41.6 \mu\text{g L}^{-1}$ ($p < 0.05$) (Figura 50B). La Luna estuvo 1752% más enriquecida en $N-NO_3$ que El Sol. Tróficamente esta diferencia entre lagos carece de importancia ya que los valores de cada mes y los promedios anuales de ambos lagos están dentro del intervalo establecido para ambientes oligotróficos ($1000 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998). Aunque es evidente que lo poco que hay en estos sistemas es mayormente consumido por los organismos presentes en El Sol.

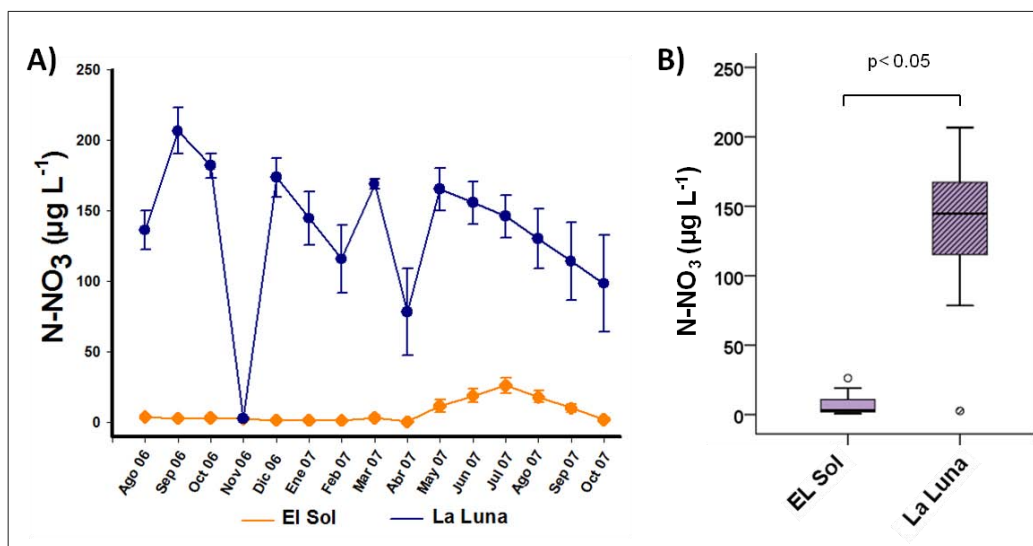


Figura 50.- A) Dinámica del $N-NO_3$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del $N-NO_3$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Nitrógeno como amonio ($N-NH_4$)

Ambos lagos presentaron valores de amonio por debajo de $60 \mu\text{g L}^{-1}$, con excepción de mayo de 2007 en ambos lagos y junio de 2007 en La Luna. El Sol tuvo una variación de $10.9 \pm 2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2006 a $96 \pm 57.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007, con un promedio de $21.9 \pm 8.3 \mu\text{g L}^{-1}$. La Luna tuvo valores de $12.8 \pm 2.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006 a $102.6 \pm 26.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007, con un promedio anual de $43.1 \pm 9.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 51A).

La prueba estadística mostró que se presentó una concentración de $N-NH_4$ significativamente mayor en La Luna ($p < 0.05$), con una diferencia de $21.1 \pm 1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 51B). La Luna estuvo 96% más enriquecida en $N-NH_4$ que El Sol. Esta diferencia no es importante en cuanto al estado trófico ya que los valores, tanto de El Sol como de La Luna, estuvieron dentro del intervalo reportado en este nutriente para lagos oligotróficos. ($0-300 \mu\text{g L}^{-1}$; Esteves, 1998).

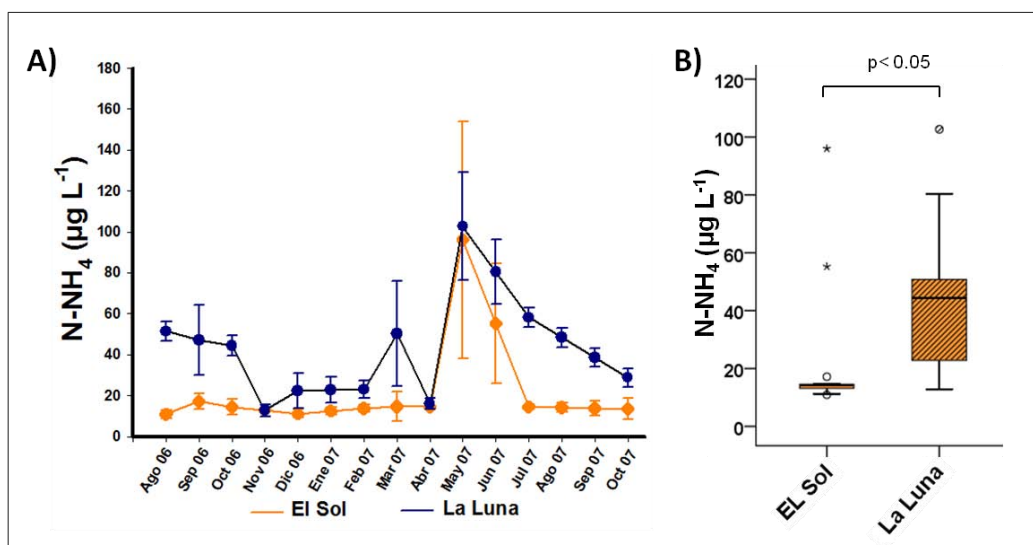


Figura 51.- A) Dinámica del $N-NH_4$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del $N-NH_4$ del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

Las dinámicas en la concentración de NID son disímiles. Las concentraciones son menores en El Sol. Salvo los meses de mayo y julio de 2007 la mayoría de los valores no superan los $50 \mu\text{g L}^{-1}$. Por otro lado La Luna presenta valores superiores a $50 \mu\text{g L}^{-1}$ con excepción del mes de noviembre de 2006 el cual coincide con lo registrado en El Sol. El Sol presentó un intervalo de $13.5 \pm 1.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en diciembre de 2006 a $108.4 \pm 62.1 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007. La Luna tuvo valores de $16.3 \pm 2.88 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006 a $270.07 \pm 33.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en mayo de 2007. Los promedios anuales de El Sol y La Luna fueron de $30.06 \pm 26.9 \mu\text{g L}^{-1}$ y $179.5 \pm 66.02 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (Figura 52A).

El análisis estadístico confirmó que se presentó una concentración de NID significativamente mayor en La Luna ($p < 0.05$), con una diferencia de $149.46 \pm 39.12 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 52B). La Luna estuvo 497 % más enriquecida en NID que El Sol. A pesar de la diferencia encontrada en este parámetro ambos lagos presentan valores dentro de lo reportado para lagos oligotróficos ($\leq 360 \mu\text{g L}^{-1}$; Larson, 1996).

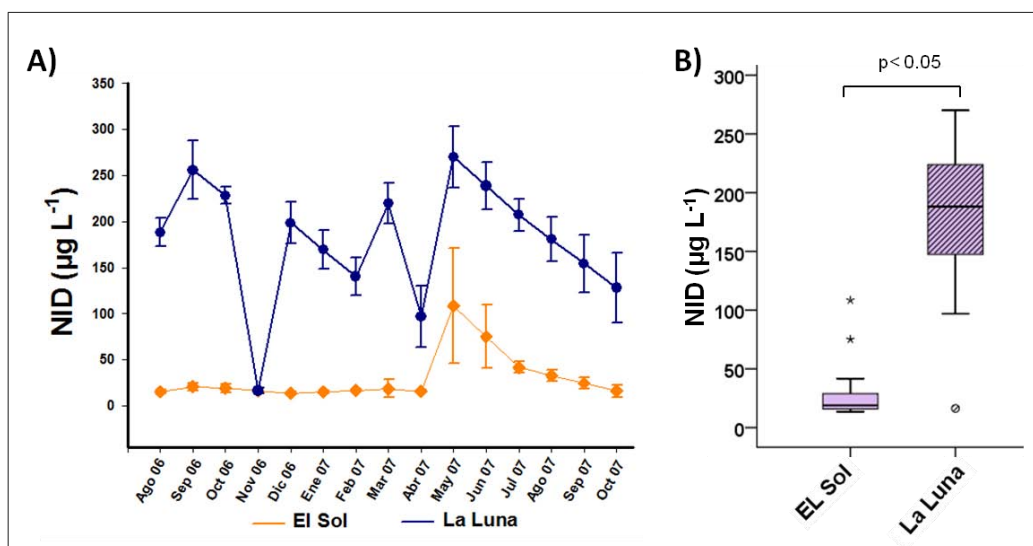


Figura 52.- A) Dinámica del NID del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del NID del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n= 45$).

Fósforo soluble reactivo (P-PSR)

Los valores en P-PSR fueron mayores en El Sol. La mayoría de las concentraciones de este parámetro medidas en la La Luna fueron de $5 \mu\text{g L}^{-1}$ hacia abajo, únicamente en noviembre de 2006 se registró un valor cercano a $20 \mu\text{g L}^{-1}$. En El Sol más de la mitad de los valores estuvieron por arriba de $10 \mu\text{g L}^{-1}$, tres de estos fueron mayores a $20 \mu\text{g L}^{-1}$ (septiembre y diciembre de 2006 y en mayo de 2007). El intervalo en El Sol fue de $2.4 \pm 1.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en agosto de 2006 a $32.6 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en diciembre de 2006, mientras que en La Luna fue de $1.4 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ en febrero de 2007 a $18.5 \pm 3.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en noviembre de 2006. Los promedios anuales de El Sol y La Luna fueron de $14.3 \pm 9.6 \mu\text{g L}^{-1}$ y $3.6 \pm 4.2 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (Figura 53A).

El análisis estadístico confirmó que se presentó una concentración de P-PSR significativamente mayor en El Sol ($p < 0.05$), con una diferencia de $10.62 \pm 5.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 53B). El Sol estuvo 74% más enriquecido en P-PSR que La Luna. Esta diferencia resulta importante ya que tróficamente La Luna se clasifica, según los valores de PSR, como lago entre ultraoligotrófico y oligotrófico y El Sol como lago mesotrófico. (Wetzel, 1992; Larson, 1996).

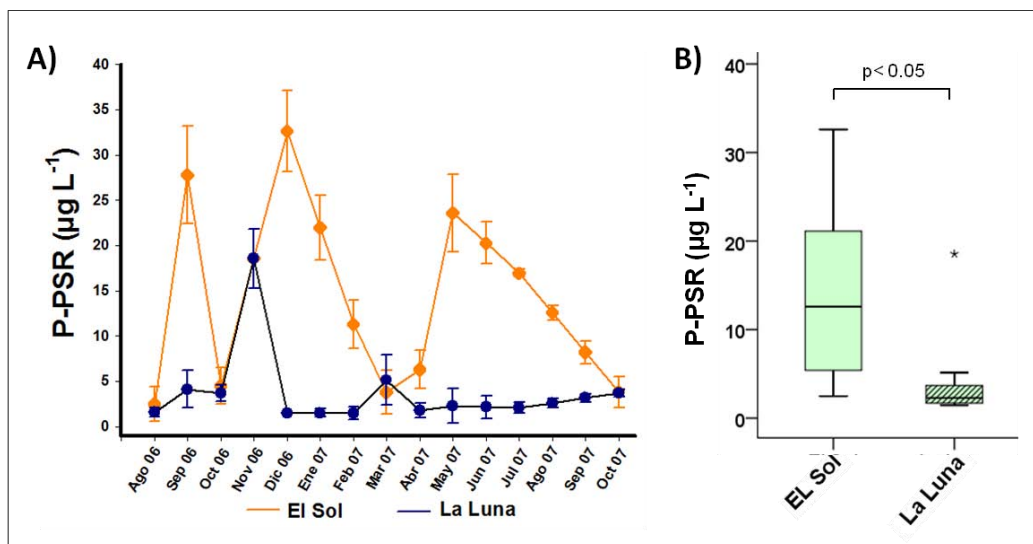


Figura 53.- A) Dinámica del P-PSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del P-PSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Sílice soluble reactivo (Si-SiSR)

La dinámica anual de la concentración de Si-SiSR en cada lago siguió un patrón diferente. En El Sol las concentraciones fueron más altas en general, su intervalo fue desde los $1,522.72 \pm 142.18 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio de 2007 hasta los $2,829.56 \pm 31.06 \mu\text{g L}^{-1}$ en octubre de 2007, con un promedio de $2,138.22 \pm 141.18 \mu\text{g L}^{-1}$. En La Luna los valores fueron mucho menores ya que estos no rebasaron los $300 \mu\text{g L}^{-1}$, su intervalo fue de $14.9 \pm 9.2 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre de 2007 a $220.87 \pm 28.73 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre de 2006, con un promedio de $79.96 \pm 35.07 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 54, A).

Como cabría esperar, el análisis estadístico confirmó que en El Sol la concentración de Si-SiSR fue superior con respecto a La Luna ($p < 0.05$). La diferencia fue de $2058.26 \pm 106.11 \mu\text{g L}^{-1}$ (figura 54, B). El Sol estuvo 96% más enriquecido en Si-SiSR que La Luna. Dada la litología del lugar y la amplitud en la cuenca de captación es esperable que haya una mayor concentración de SiSR en El Sol que en La Luna.

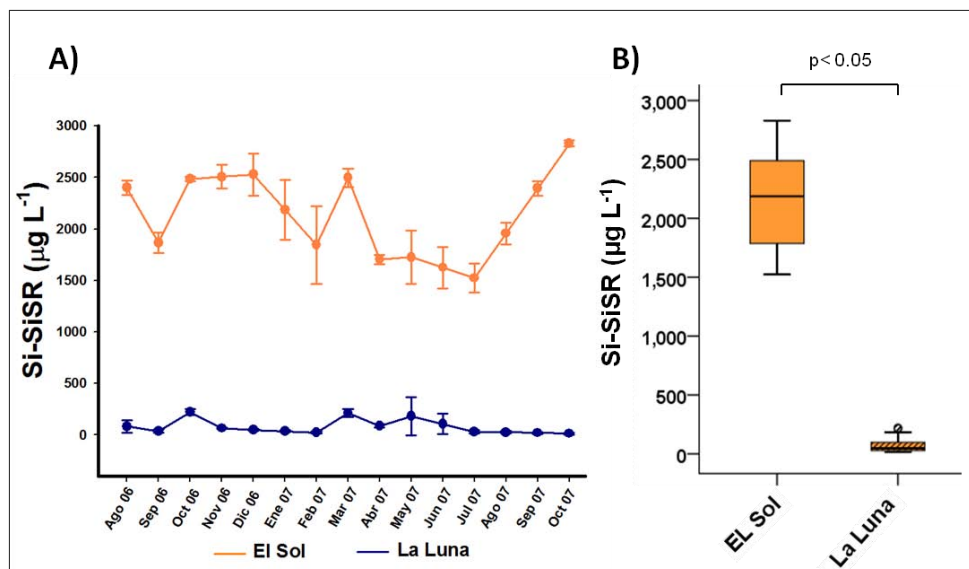


Figura 54.- A) Dinámica del Si-SiSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote del Si-SiSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Cociente de Redfield (NID:P-PSR)

Los valores del cociente de Redfield en La Luna son mayores y más variables que en El Sol. La mayoría de éstos están por arriba de 40 y el intervalo va de 1 en noviembre de 2007 a 132 en diciembre de 2007, con una media anual de 78 ± 38 . Los valores en El Sol estuvieron por debajo de 20 con un intervalo de 0.4 a 6 en diciembre y agosto de 2006 respectivamente, con una media anual de 3 ± 2 (Figura 55A).

El análisis estadístico indicó que el cociente de Redfield en La Luna es significativamente mayor que en El Sol ($p < 0.05$), con una diferencia de 75 ± 37 (Figura 55B). En este ciclo anual el nutriente limitante para El Sol fue el nitrógeno y para La Luna fue el fósforo. Esta diferencia en la limitación del fósforo y el nitrógeno es importante porque da idea de las entradas de estos nutrientes en el sistema así como de los organismos que podrían estar presentes en cada uno de los lagos.

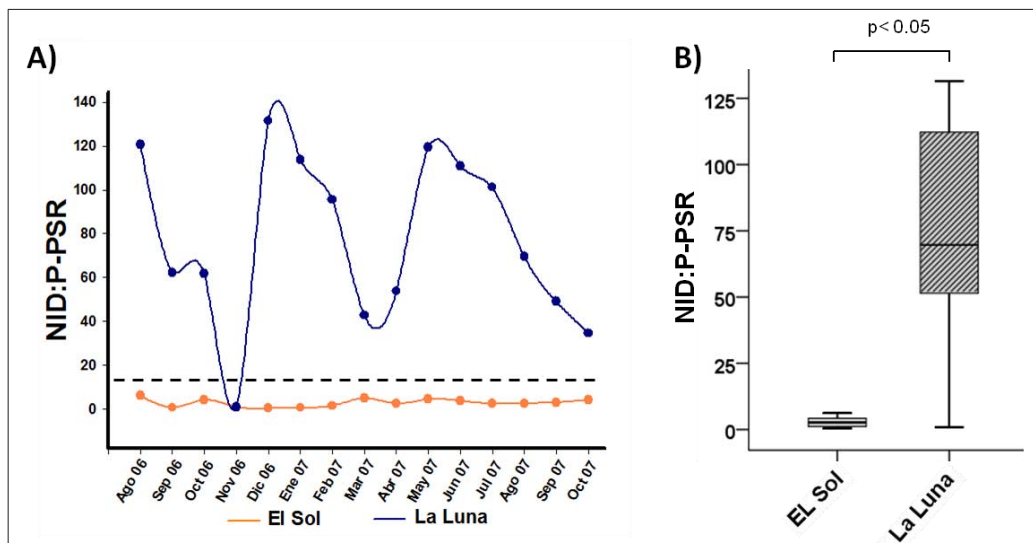


Figura 55.- A) Dinámica del NID:P-PSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. La línea punteada marca la relación N:P (16:1). B) Diagrama de caja y bigote del NID:P-PSR del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Comparación de la biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2006-2007

Concentración de clorofila "a" (Clor-a)

El comportamiento de la biomasa fitoplanctónica es distinto en cada lago. Los valores en "El Sol fueron más altos y presentaron mayor variabilidad. No obstante, ambos lagos presentan concentraciones bajas por debajo de $2.5 \mu\text{g L}^{-1}$. En La Luna se registraron valores de $0.18 \pm 0.04 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre de 2007 a $0.85 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ en abril de 2007, su promedio fue de $0.37 \pm 0.17 \mu\text{g L}^{-1}$. En El Sol se registraron valores de $0.67 \pm 0.04 \mu\text{g L}^{-1}$ en septiembre de 2007 a $2.16 \pm 0.29 \mu\text{g L}^{-1}$ en octubre de 2006, con un promedio de $1.6 \pm 0.53 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 56A).

El análisis estadístico indicó que existieron diferencias significativas en la concentración de Clor-a ($p < 0.05$), con una diferencia de $1.23 \pm 0.38 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 56B). El Sol presenta 77% más biomasa fitoplanctónica que La Luna.

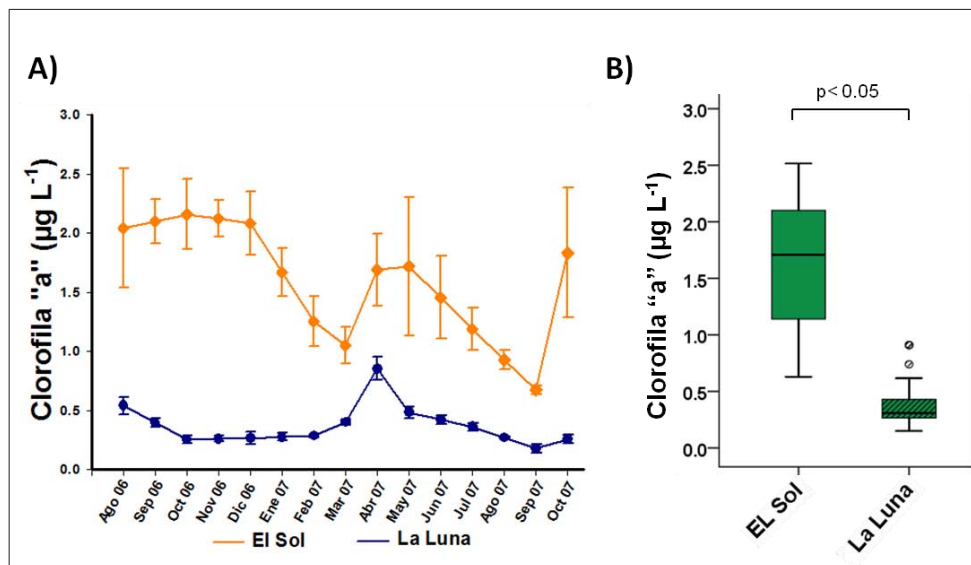


Figura 56.- A) Dinámica de la Clor-a del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna. B) Diagrama de caja y bigote de la Clor-a del agua en el ciclo 2006-2007 en los lagos El Sol y La Luna (El Sol $n=45$, La Luna $n=45$).

Finalmente al realizar la comparación de los parámetros entre los lagos en el periodo 2006-2007 se aprecia que el único parámetro que no presentó diferencia entre lagos fue la temperatura. Aquellos que presentaron valores mayores en El Sol fueron el pH, OD, K₂₅, P-PSR, Si-SISR y Clor-*a*. Por su parte los que se presentaron más elevados en La Luna fueron el %SPAR, N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, NID y el cociente NID:P-PSR denotando que el nutriente limitante en La Luna en ese periodo fue el fósforo, mientras que en El Sol fue el nitrógeno (Tabla 4).

Tabla 4. Valor promedio, mínimo y máximo (\pm desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y biomasa fitoplanctónica en el periodo de muestreo 2006-2007. (Est = Significancia de la prueba estadística, N.S. = No significativo. S = Significativo, Dif = diferencia registrada en el valor promedio entre periodos de muestreo, s = cuando El Sol presentó el promedio más elevado, l = cuando La Luna presentó el promedio más elevado).

Variable	El Sol			La Luna			Est	Dif
	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.	X \pm d.e.	min \pm d.e.	max \pm d.e.		
Temp (°C)	8.1 \pm 1.9	3.8 \pm 0.08	10.28 \pm 0.2	8.65 \pm 1.6	4.52 \pm 0.32	10-33 \pm 0.28	N.S.	
OD (mg L ⁻¹)	7.3 \pm 0.7	6.19 \pm 0.1	8.5 \pm 0.08	7.0 \pm 0.6	6.22 \pm 0.03	8.6 \pm 0.17	S	0.3 \pm 0.1 s
pH	6.7 \pm 1.2	5.7 \pm 0.02	8.8 \pm 0.68	5.4 \pm 0.7	4.64 \pm 0.36	6.64 \pm 0.36	S	1.3 \pm 0.5 s
K ₂₅ (μ S cm ⁻¹)	58.1 \pm 6.2	44 \pm 0	65.7 \pm 0.27	6.1 \pm 2.5	3.35 \pm 0.05	10.56 \pm 0.07	S	52 \pm 3.7 s
%SPAR en fondo	1 \pm 1	0	5	26 \pm 13	6	52	S	25 \pm 12 l
N-NO ₂ (μ g L ⁻¹)	0.85 \pm 0.21	0.54 \pm 0.26	1.29 \pm 0.28	1.71 \pm 0.7	0.41 \pm 0.01	2.83 \pm 2.91	S	0.86 \pm 0.49 l
N-NO ₃ (μ g L ⁻¹)	7.27 \pm 8	0.6 \pm 0.62	26.2 \pm 5.4	134.69 \pm 49.6	2.6 \pm 0.68	206.7 \pm 16.2	S	127.42 \pm 41.6 l
N-NH ₄ (μ g L ⁻¹)	21.94 \pm 23.1	10.9 \pm 2.11	96 \pm 57.9	43.1 \pm 24.6	12.83 \pm 2.94	102.6 \pm 26.4	S	21.1 \pm 1.5 l
NID (μ g L ⁻¹)	30.06 \pm 26.9	13.58 \pm 1.48	108.5 \pm 62.18	179.52 \pm 66.02	16.34 \pm 2.9	270.07 \pm 33.27	S	149.46 \pm 39.12 l
P-PSR (μ g L ⁻¹)	14.3 \pm 9.6	2.49 \pm 1.9	32.6 \pm 4.5	3.68 \pm 4.2	1.47 \pm 0.74	18.55 \pm 3.27	S	10.62 \pm 5.4 s
Si-SISR (μ g L ⁻¹)	2,138.21 \pm	1,522.7 \pm	2,829.5 \pm	79.96 \pm 35.07	14.9 \pm 9.2	220.87 \pm 28.73	S	2058.26 \pm 106.11 s
NID:P-PSR	3 \pm 1	0.4	6	77 \pm 38	1	131	S	74.9 \pm 36.6 l
Clor- <i>a</i> (μ g L ⁻¹)	1.6 \pm 0.53	0.67 \pm 0.04	2.16 \pm 0.29	0.37 \pm 0.17	0.18 \pm 0.04	0.85 \pm 0.1	S	1.23 \pm 0.38 s

Discusión

Diversos criterios como la transparencia (Larson y Buktenica, 1998), la concentración de nutrientes (Larson, 1996) y de Clor-*a* (McIntire y cols., 2007) identifican las aguas de los lagos El Sol y La Luna como oligotróficas, el primero y ultraoligotróficas, el segundo.

Tanto para El Sol como para La Luna, los intervalos de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos y biológicos se encuentran dentro de lo reportado para otros lagos de alta montaña, como: la Laguna Tranca Grande, Perú (Astocondor, 2000); el *Crater Lake*, Oregon (Larson et al 2006); La Caldera, España (Pulido-Viena, 2008); la Laguna Grande Peñalara, España (Granados *et al.*, 2006); el Lago San Pablo, Ecuador (Casallas y Gunkel, 2001), y el Lago Titicaca, Bolivia-Perú (Dejoux y Ilitis, 1991).

Como se mencionó, por sus características generales, los lagos de alta montaña tienden a ser sensibles al cambio global, especialmente al climático y a la acidificación producto del depósito de contaminantes atmosféricos (Granados y Toro 2000; Agustí-Panareda y Thompson 2002; Curtis *et al.*, 2004). Sin embargo, dada la dificultad para distinguir entre las variaciones naturales y los impactos antropogénicos en pequeñas escalas de tiempo, como las de este estudio, resulta complicado atribuir los cambios observados en cualquier parámetro a alguna causa en concreto (Larson, 2006). A lo sumo, se puede esperar encontrar coherencia entre los reportes previos en la literatura y las variaciones encontradas en el presente estudio y, con base en ello, formular hipótesis con respecto a lo que podría estar ocurriendo en el sistema.

Estacionalidad

El análisis de cúmulos con base en algunos parámetros fisicoquímicos del agua (T°C, O.D., K₂₅, pH y PAR) permitió reconocer la estacionalidad ambiental de los lagos. A pesar de sus diferencias a lo largo del año, los lagos presentan un comportamiento similar que sugiere que, en gran medida, la variación ambiental está determinada por eventos estacionales asociados con el clima local.

Temperatura y cambio climático

En cuanto a la temperatura del agua, en ninguno de los lagos se registraron diferencias significativas entre ambos periodos de muestreo. Dado que la temperatura del agua es influida por la temperatura atmosférica, esto sugiere que, al menos en el área de estudio, no hay evidencia aún de cambio climático en la ventana de tiempo comprendida entre los cinco años transcurridos entre los muestreos. De la misma manera, en ambos periodos de muestreo no se encontraron diferencias en la temperatura entre El Sol y La Luna, mostrando que ambos lagos, a pesar de sus diferencias morfométricas, responden similarmente al régimen de la temperatura atmosférica.

La amplitud de variación estacional de temperatura se observa mayor que la presentada entre los dos ciclos anuales. En este respecto se puede traer a colación un par de estudios relacionados:

Por un lado, Magnuson (1990) realizó un estudio que abarcó 140 años sobre la duración anual de la cubierta de hielo del lago Mendota. Al comparar periodos de tan solo 10 a 20 años consecutivos, no se observaron cambios significativos en la cubierta de hielo. Sin embargo, al considerar el lapso de tiempo completo, se reveló una disminución significativa en la duración anual de la cubierta de hielo en plazos más largos. Por otro lado, Cuna y cols. (2014) analizaron un núcleo sedimentario procedente de La Luna. Con los proxys utilizados (i.e., remanentes de fito y zooplancton), no encontraron evidencias claras de que se hayan presentado cambios ambientales en el tiempo reciente o “moderno”, esto es, de 1910 a la actualidad; sin embargo, Cuna (2015) en un estudio análogo para El Sol, sí encontró evidencias de cambio en plazos cortos.

¿Acidificación o basificación, producto del cambio global?

La fuente de contaminación más evidente y, por ende, probable para los lagos es la ciudad de Toluca, ubicada al NNE del cráter, a una distancia del centro de la ciudad y en línea recta horizontal a los lagos de poco más de 20 km. Toluca tiene una extensión total de 420.14 km², de los cuales 17.8 km², equivalentes a un 10 % del total del territorio, pertenecen al sector industrial (González *et al.*, 2013). Es bien sabido que muchos contaminantes se depositan en las regiones montañosas a través de la lluvia y la nieve (depósito húmedo) o directamente como partículas o gases (depósito seco) (Ponette-González *et al.*, 2010); tal es el caso de los productos derivados de la actividad industrial (i.e., óxidos de azufre, nitrógeno y carbono).

Por otro lado, los lagos de alta montaña son ácidos naturalmente, debido a que tienen una geología cristalina, es decir sus suelos tienen una mayor concentración de sílice proveniente de la meteorización o desgaste de feldespatos. Los materiales ricos en sílice pueden ser pobres en cationes polivalentes, por lo tanto los suelos en esos ambientes son pobres en bases (carecen o tienen una muy baja reserva alcalina), lo que los vuelve vulnerables a sutiles cambios en contaminantes (Marchetto *et al.*, 1994; Boggero *et al.*, 1998; Curtis *et al.*, 2002; Porta *et al.*, 2013). Por estas características, de existir un impacto de la actividad industrial local en los lagos El Sol y La Luna se esperaría reconocer en los lagos un proceso de acidificación.

Al respecto, uno de los parámetros que mostró variaciones significativas en ambos lagos fue el pH; sin embargo, en lugar de acidificarse, tanto en El Sol como en La Luna se registró un incremento en el pH de 2000-2001 a 2006-2007 de 1.2 ± 0.9 y 0.7 ± 0.4 unidades, respectivamente. Este cambio de alrededor de una unidad resulta importante dentro de un sistema acuático, ya que en pH inferiores a 6.5 disminuyen los procesos reproductivos de los organismos (Talavera, 1998). Para el caso de El Sol, el aumento en el pH lo ubica por encima de este valor limitante, lo que podría favorecer procesos

reproductivos. Además el aumento o disminución del pH puede dar como resultado un cambio en la composición de las especies en una zona determinada.

Este efecto descarta *a priori* el impacto de la actividad industrial local sobre los lagos, a pesar de que Vilaclara *et al.* (2005) mencionan la presencia de partículas de carbón esferoidales que son producto de la combustión de hidrocarburos fósiles. Más aún, al analizar la dirección de los vientos predominantes en el año 2006, se encontró que aquellos que llegan al cráter del Nevado de Toluca provienen principalmente del E, seguidos del ENE y SE (Anexo 3), lo cual sugiere que la contaminación generada en el Valle de Toluca difícilmente, o muy esporádicamente, alcanza por este medio las aguas de los lagos del Nevado de Toluca.

Un estudio realizado por García y cols. (2006) en el periodo 2001-2002 en la zona rural Rancho Viejo, misma que está cercana al Nevado de Toluca, arrojó que la precipitación de la zona es ácida (pH promedio de 4.54), y que esta acidez está dada por la presencia de H_2SO_4 , HNO_3 y ácidos orgánicos. Sin embargo, la ubicación de Rancho Viejo con respecto a la ciudad de Toluca, junto con de la dirección de los vientos, no lograron explicar el origen de los contaminantes depositados mediante la lluvia, por lo que proponen la realización de una medición posterior más confiable del flujo de viento. En ese sentido, podría hacerse posteriormente un estudio más riguroso en cuanto a los vientos predominantes en Nevado de Toluca, así como del depósito seco y húmedo dentro del cráter, con la finalidad de verificar, si es que hay depósito significativo de contaminantes, cuáles son y en qué proporciones están. Además, permitiría reconocer si la lluvia en este lugar también es ácida, independientemente del aumento en el pH en los lagos.

El aumento en el pH registrado en ambos lagos pudiera estar asociado con: a) un incremento en la captación de CO_2 (Uusitalo *et al.*, 1996), o bien b) la asimilación de nitratos (Brewer y Goldman, 1976; Mazzuca, 2003).

Tanto la asimilación del nitratos como la captación de CO_2 son procesos asociados con un aumento en la actividad biológica fotosintética (Hofslagare *et al.*, 1983) y, por ende, se esperarían valores mayores en la concentración de Clor-a (Rodríguez, 2013). Cuando los productores primarios realizan la asimilación de nitratos, a su vez liberan bicarbonato (HCO_3^-) al medio por compensación iónica dentro de la célula y, en consecuencia, la liberación de HCO_3^- favorece un aumento en el pH (*Op. cit.*).

Por su parte, un incremento de CO_2 en el agua favorece su acidificación, al reaccionar con el agua y generar ácido carbónico (H_2CO_3) que se disocia fácilmente en HCO_3^- y H^+ . En contraparte, cuando los organismos incorporan grandes cantidades de CO_2 a través del proceso fotosintético (i.e., sistemas eutróficos e hipertróficos), disminuyen su concentración en el lago, por lo que lo obtienen de los bicarbonatos ($HCO_3^- \rightarrow CO_2 + OH^-$), cuando tienen la adaptación fisiológica para ello (Mercado, 2002), favoreciendo un aumento en el pH; sin embargo, para que esto último pueda llevarse a cabo se requiere que la demanda de CO_2 exceda la oferta y que existan bicarbonatos suficientes a partir de los cuales, por disociación, se obtenga el CO_2 necesario con la liberación de OH^- . Tal es el

caso de lo reportado por Richerson y cols. (1977) en el lago Titicaca, ya que registraron que la mayor parte del carbono inorgánico disponible para la fotosíntesis está presente en forma de bicarbonato HCO_3 , lo cual coincide con valores de 8.4 a 8.6 de pH. Por su parte Iltis y cols. (1991), al realizar otro estudio posterior en el lago Titicaca, registraron un aumento en los valores de pH de hasta 9.38 unidades, el cual fue relacionado con una mayor actividad fotosintética del fitoplancton.

Si bien en este estudio no se realizaron mediciones de CO_2 o de HCO_3 , sí se hicieron mediciones de N-NO_3 . En este sentido y en coincidencia con el aumento en el pH en ambos lagos, se presentó una disminución en las concentraciones de N-NO_3 . Es decir, la disminución del NO_3 podría explicar el aumento en el pH de los lagos. Para ello, se analizó si se presentó un incremento en el proceso fotosintético a través de la comparación de la concentración de *Clor-a* como medida indirecta de la biomasa fitoplanctónica. Contrariamente a lo esperado, en ambos lagos se registró una disminución significativa en la concentración de *Clor-a* de 2000-2001 a 2006-2007 (0.07 ± 1.02 en El Sol y 0.23 ± 0.18 en La Luna). Por lo anterior, la basificación del sistema por la disminución de nitratos no es respaldada por un aumento en la actividad fotosintética. En resumen, se descarta la asimilación de nitratos como responsable de la basificación del agua de los lagos del Nevado de Toluca. En resumen, las características oligotróficas y la poca mineralización del agua de los lagos del Nevado de Toluca descartan estos procesos como responsables de la basificación.

Por otro lado, la comparación entre lagos sí muestra una concordancia entre el comportamiento de los parámetros antes mencionados (pH, NO_3 y *Clor-a*), mostrando en El Sol los valores más elevados de pH (diferencias de 0.8 ± 0 y 1.3 ± 0.5 unidades en 2000-2001 y 2006-2007, respectivamente) y *Clor-a* (diferencias estadísticamente significativas de 1.2 ± 0.63 en el periodo 2000-2001 y de 1.23 ± 0.38 en el periodo 2006-2007) y las más bajas concentraciones de NO_3 (diferencias de 250.7 ± 16.3 en el periodo 2000-2001 y de 127.42 ± 41.6 en el periodo 2006-2007). Adicionalmente, en algunos estudios en la zona reportan concentraciones de HCO_3 mayores en El Sol ($\approx 40 \text{ mg L}^{-1}$) con respecto a La Luna ($< 7 \text{ mg L}^{-1}$). En El Sol se reportan valores de 12.2 mg L^{-1} (Caballero, 1996), 35.5 mg L^{-1} , (Armienta *et al.*, 2008) y $32.2 \pm 3.2 \text{ mg L}^{-1}$ (Cuna, 2015) mientras que en La Luna se reportan valores de 6.1 mg L^{-1} (Caballero, 1996), 2.9 mg L^{-1} (Armienta *et al.*, 2008) y $3.9 \pm 0.9 \text{ mg L}^{-1}$, (Cuna *et al.*, 2014). Sin embargo este mecanismo solo se ha mostrado que se lleva a cabo, como se mencionó, en sistemas eutróficos, por lo que una mayor concentración en la *Clor-a* en El Sol con respecto a La Luna no alcanza a explicar el sensible aumento en el pH en El Sol.

A pesar de todo ello, la diferencia apreciada en el periodo 2000-20001 no pareciera importante debido a que ambos valores los catalogan como ambientes ácidos, además de que ambos promedios están por debajo de 6.5 valores típicos donde los procesos reproductivos son bajos (Talavera, 1998). No obstante, en el periodo 2006-2007, el cambio es de más de una unidad, lo que ya resulta considerable, tomando en cuenta que el aumento del pH puede dar como resultado un cambio en la composición de las especies en una zona determinada y que los valores en El Sol, se ubican por encima de un

umbral de 6.7, valor sobre el cual aumentan los procesos reproductivos de los organismos (Talavera, 1998). EL lago El Sol continuaba siendo oligotrófico para el periodo 20006-2007, pero de continuar la tendencia a la basificación detectada en este estudio, podría esperarse que en la actualidad registrase valores netamente básicos y quizá tender a la eutrofización, de hecho, Cuna (2015) encontró evidencia de que El Sol está tendiente a convertirse en un lago mesotrófico.

Oxigenación del sistema

En ambos lagos se registró un aumento estadísticamente significativo en la concentración de oxígeno disuelto entre 2000-2001 y 2006-2007. Este aumento fue de $0.7 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ en El Sol y $0.2 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ en La Luna. A pesar de presentar una diferencia estadísticamente significativa, biológicamente esa diferencia no es importante, puesto que ambos valores están dentro de un intervalo aceptable de oxigenación ($5\text{-}8 \text{ mg L}^{-1}$) para los organismos acuáticos (Goyenola, 2007).

Existen dos mecanismos que determinan la concentración de oxígeno disuelto, uno abiótico y otro biótico. El primero se refiere a la concentración máxima de oxígeno que puede disolverse en el agua, mayor cuanto menor es la temperatura del agua (Wetzel, 2001; Granados *et al.*, 2006). En ese sentido y como se mencionó anteriormente, no se presentaron diferencias significativas en la temperatura del agua entre ambos periodos de muestreo, por lo que se puede descartar a la temperatura como explicación para el cambio en la concentración de oxígeno disuelto.

El segundo mecanismo se refiere al papel del oxígeno en el metabolismo lacustre; la degradación aerobia de la materia orgánica lo consume, mientras que la fotosíntesis lo produce (Wetzel, 2001; Granados *et al.*, 2006). En ambos lagos disminuyó la biomasa fitoplanctónica, por lo que un aumento en la fotosíntesis no parece explicar el incremento en la concentración de oxígeno disuelto. Pero, por el contrario, se podría pensar que la disminución de la producción primaria pudiera conllevar una disminución en la materia orgánica a degradar y, por ende, a que no se consumiera tanto oxígeno disuelto. Otra explicación es que en ocasiones se puede obtener un valor de P significativo incluso cuando la diferencia entre los parámetros estimados y la hipótesis nula sea pequeña. Por lo tanto los parámetros son, para fines prácticos, equivalentes (Berger & Sellke, 1987). En este contexto el valor de P puede ser engañoso o poco informativo (Anderson *et al.*, 2000).

¿Fósforo y nitrógeno como limitantes en la producción primaria?

En el lago El Sol se registraron valores más elevados de P-PSR en ambos periodos de muestreo. Esto sugiere que la productividad, mayor en el mismo lago, podría estar sustentada por una mayor disponibilidad de fósforo. Al respecto se sabe que el enriquecimiento en fósforo hace que el fitoplancton tenga una mayor capacidad para recuperarse del daño que produce la radiación UV, de tal manera que incrementa la producción primaria (Heraud *et al.*, 2005; Ogbebo y Ochs, 2008). Este fósforo puede

provenir de diversas fuentes; una de ellas es la resuspensión de sedimentos y su reciclado en la capa de mezcla (Lewis, 1996). La retención del fósforo en los sedimentos resulta variable, móvil y lábil (Ginn *et al.*, 2012). En el caso de los lagos El Sol y La Luna, al ser someros y polimícticos, se incrementa la disponibilidad de fósforo en el sistema por la facilidad de resuspensión de los sedimentos.

Las concentraciones en los valores de P-PSR, junto con las obtenidas de NID, arrojaron que en La Luna el nutriente limitante fue el fósforo en ambos periodos de muestreo, con base en la proporción de Redfield. En cambio, en El Sol el nutriente limitante pasó de ser el fósforo en el periodo 2000-2001, al nitrógeno en el periodo 2006-2007. Este cambio parece haber obedecido a una disminución en el NID y/o un aumento en el P-PSR, estadísticamente considerables hacia el segundo periodo de muestreo.

Con relación a lo anterior, Fong y cols. (1993) mencionan que puede haber imprecisiones al usar el cociente de Redfield como indicador de la limitación de nutrientes, debido a que el intervalo óptimo puede variar para diversos tipos de algas. También a que el uso de la relación N:P en la columna de agua se basa en la suposición de que el aporte de nutrientes es constante o estacionario. Sin embargo, dicha relación es alterada tanto por pulsos de nutrientes como por los índices de consumo. Debido a esto se llevan a cabo bioensayos *in situ* o *in vitro* para determinar más adecuadamente la limitación del fósforo, nitrógeno o ambos en un área de estudio determinada. Varios de estos ensayos en lagos de áreas tropicales han dado como resultado al nitrógeno como limitante para el crecimiento algal (Lewis, 2002). Esto concuerda únicamente para El Sol en el periodo 2006-2007. El Sol en 00-01 y la Luna en ambos periodos de muestreo arrojan un cociente de Redfield donde el fósforo es el limitante, lo que concuerda con resultados arrojados en lagos de latitudes templadas (Golterman, 1983). Ahora bien, esos datos obtenidos en lagos templados provienen de lagos con características muy particulares que difieren entre sí (latitud, altitud, profundidad, productividad, sólidos disueltos, etc.), por lo tanto resulta difícil contrastarlos con los resultados obtenidos (Ramos-Higuera *et al.*, 2008).

Mineralización (Sólidos Totales disueltos y K25)

Otro de los parámetros que mostró mayores valores en El Sol con respecto a La Luna, en ambos periodos de muestreo, fue la conductividad, o medida indirecta de la mineralización del agua. Las diferencias encontradas en la mineralización de sus aguas pueden deberse a las diferencias en las áreas de sus cuencas de captación. La Luna tiene una cuenca de captación de aproximadamente 1.261 km², mientras que la de El Sol presenta un área doblemente mayor, de aproximadamente 2.17 km². El Sol, al tener una mayor cuenca de captación, recibe un mayor aporte de sustancias minerales diversas. En este estudio no se midió la composición iónica de cada lago, sin embargo, Armienta y cols. (2008) reportan que, a pesar de que El Sol y La Luna presentan una composición iónica similar, la concentración es mayor en El Sol con respecto a La Luna, lo que explicaría la diferencia en conductividad. Por ejemplo: los HCO₃⁻ en El Sol son de 33.5 mg L⁻¹, mientras que en La Luna son de 2.9 mg L⁻¹; el Ca⁺⁺ en El Sol tiene concentraciones de 6.4 mg L⁻¹, y

en La Luna, 2.0 mg L^{-1} , o el Mg^{++} , que en El Sol alcanza 3.4 mg L^{-1} frente a los 0.6 mg L^{-1} de La Luna.

Las diferencias encontradas entre El Sol y La Luna no parecen ser exclusivos de estos lagos. Existen otros que, por sus dimensiones, abarcan una amplia cuenca de captación y presentan diferencias en sus características en distintos puntos del cuerpo de agua. Un ejemplo de esto es mencionado por Iltis y cols. (1991), quienes reportan dos diferentes zonas en el lago Titicaca; encontraron que, tanto el pH como la actividad fotosintética son, en promedio, más elevados en el Lago Menor que en el Lago Mayor. También encontraron que las variaciones de la conductividad son más marcadas en el Lago Menor, donde la dilución de sales en la época de lluvias y la concentración de sales en la época seca son más acentuadas que en el Lago Mayor. De igual manera en los lagos El Sol y La Luna, sus cuencas de captación diferentes conllevan a que sus características limnológicas difieran.

La diferencia encontrada en 2000-2001 a pesar de ser significativa, no parece de importancia limnológicamente hablando puesto que ambos valores corresponden a aguas poco mineralizadas ($\leq 50 \mu\text{S cm}^{-1}$; Roldán y Ramírez, 2008); sin embargo, para el periodo 2006-2007 esta diferencia ya resulta destacable puesto que El Sol registra valores mensuales y un promedio anual por arriba del límite determinado para ambientes bajos en sales disueltas ($50 \mu\text{S cm}^{-1}$; *Op. Cit.*).

Introducción de especies exóticas

Otra de las perturbaciones antrópicas de los lagos de alta montaña, además de la aportación atmosférica de nutrientes y contaminantes o el cambio climático, es la introducción de especies exóticas (Larson *et al.*, 2006). En este caso, se sabe que se introdujo la trucha arcoíris (*Onchorhynchus mykiss*) alrededor de 1930 (Cuna, 2015) y 1950 (Dimas-Flores *et al.*, 2008).

Dimas-Flores y cols. (2008) mencionan que las diferencias observadas entre lagos con respecto a la densidad y biomasa zooplanctónica, así como los taxa dominantes, se deben principalmente a las diferencias en el pH, pero cabe la posibilidad de que estas diferencias zooplanctónicas se hayan acrecentado por la introducción de la trucha arcoíris. Sin embargo, no se tienen estudios relacionados a esto, por lo que aún resulta desconocido de qué manera podría estar afectando la introducción de esta especie en El Sol y si esta está contribuyendo a acentuar la diferencias entre los lagos.

Un aspecto derivado de la introducción de trucha podría ser el aumento en la turbidez del agua. Si bien esta no se ha registrado sistemáticamente, Alcocer (2009) asevera que, en el tiempo comprendido desde la década de 1970 a la fecha, la turbidez de El Sol se ha incrementado, al grado de que el fondo, antes distinguible a simple vista, ya no resulta observable. En esa línea de pensamiento, Scheffer y Van Ness (2007) han seguido el impacto de las poblaciones de peces en la turbidez de lagos someros. En 1987, en uno de los lagos turbios fue eliminada parte de la población de peces, lo que condujo a una reducción en la turbidez (Giles, 1988; Wright y Philips, 1992). La relación entre los peces y

la turbidez se explica a distintos niveles: Por un lado, los peces bentónicos remueven sedimentos y liberan nutrientes atrapados en ellos. Por otro, consumen zooplancton, lo que reduce el consumo de fitoplancton. Todos esos procesos conducen al aumento de la turbidez del agua (Anexo 4).

A la fecha actual no se sabe si el aumento en la turbidez de El Sol obedece a la introducción de trucha arcoíris, pues no se tienen estudios al respecto, de modo que resulta desconocido cómo podría estar impactando en la dinámica limnológica.

Conclusiones

Al comparar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y la biomasa fitoplanctónica entre los dos periodos de muestreo, entre lagos y a lo largo de cada periodo de muestreo, se encontró que existen variaciones; sin embargo, estas probablemente son intrínsecas a los procesos limnológicos naturales de cada lago, donde la estacionalidad deriva de la ubicación latitudinal y altitudinal y no al cambio climático regional, ni a posibles impactos antrópicos locales, de los que se tiene evidencia indirecta en el pasado reciente.

Sin embargo, se detectó un proceso de basificación en ambos lagos, cuya causa no se pudo explicar con base en los parámetros evaluados, ni parece asociado con un cambio climático regional, precipitación ácida o depósito de contaminantes atmosféricos. El detonante de este aumento en el pH parece proceder de uno o más factores no evaluados en este proyecto, que podrían tener alguna relación con impactos antrópicos locales.

Bibliografía

- Aceves-Quesada, J.F., 1996. Geología y geomorfología del Nevado de Toluca: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de maestría, 116 pp.
- Agustí-Panareda, A. y R. Thompson, 2002. Reconstructing air temperature at eleven remote alpine and arctic lakes in Europe from 1781 to 1997 AD. *Journal of Paleolimnology* 28: 7–23.
- Alcocer, J. 1980. Aportaciones limnológicas al estudio del lago El Sol y lago de La Luna, Nevado de Toluca, Estado de México. Servicio Social. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México. 18 pp.
- Alcocer, J., L. A. Oseguera, E. Escobar, L. Peralta y A. Lugo, 2004. Phytoplankton biomass and water chemistry in two high mountain lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36 (3): 342-346.
- Alcocer, J., 2009. Limnología. En P. Luna, A. Montero y R. Junco (coords.), *Las aguas celestiales. Nevado de Toluca*. INAH. México, 165 p.
- Anderson, D. R., K. P. Burnham y W. L. Thompson, 2000. Null hypothesis testing: problems, prevalence, and an alternative. *Journal of Wildlife Management* 64: 912–923.
- Armienta, M. A., S. R. De la Cruz y J. L. Macías, 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97: 105-125.
- Armienta, M. A., G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reyna, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo y F. Arcega-Cabrera, 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178:249–258.
- Astocóndor, M. M., 2000. Evaluación limnológica de la laguna Tranca Grande del distrito de Apata (Jauja, Junín). *Magistri et Doctores* 39:1-12.
- Banderas, T. A., 1984. Estudio anual de la Limnología y del fitobentos del lago El Sol, Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 69 pp.

- Banderas, T. A., 1988. Análisis de la estructura de la comunidad fitobentónica del “Lago el Sol”, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 97 pp.
- Banderas, T. A., R. González y G. De la Lanza, 1991. Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia* 224: 1-10.
- Banderas, T. A., 1994. Limnología del lago El Sol, Nevado de Toluca. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM, México. 146pp.
- Berger, J. O. & T. Sellke, 1987. Testing a point null hypothesis: the irreconcilability of p values and evidence. *Journal of the American Statistical Association* 82: 112–122.
- Bloomfield, K., S. Valastro, 1974. Late Pleistocene Eruptive History of Nevado de Toluca Volcano, Central México: *Geological Society of American Bulletin*, 85, 901-906.
- Boggero, A., A. Barbieri, J. de Jong, A. Marchetto y R. Mosello, 1998. Chemistry and critical loads of Alpine lakes in Canton Ticino (Southern Central Alps). *Aquatic Sciences* 60:300-315.
- Brewer, P. G. y J. C. Goldman, 1976. Alkalinity changes generated by phytoplankton growth. *Limnology and Oceanography* (21)1:1-10.
- Caballero, M. M., 1996. The diatom flora of two acid lakes in Central Mexico. *Diatom Research* 11: 227-240.
- Casallas J. y G. Gunkel, 2001. Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica* 20(2):215-232.
- Cuna E., E. Zawisza, M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, S. Lozano-García y J. Alcocer, 2014. Environmental impacts of Little Ice Age cooling in a central Mexico recorded in the sediments of a tropical alpine lake. *Paleolimnol* 51:1-14.
- Cuna E., 2015. Registro de cambios ambientales en dos lagos de alta montaña en México con base en sus algas modernas y fósiles. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, México, 123 pp.
- Curtis, C. J., A. Barbieri, L. Camarero, M. Gabathuler, J. Galas, K. Hanselmann, J. Kopáček, R. Mosello, N. Rose, E. Stuchlik, H. Thies, U. Nickus, M. Ventura y R. Wright, 2002. Application of static critical load models for acidity to high mountain lakes in Europe. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 2:115–126.
- Curtis C. J., I. Botev, L. Camarero, J. Catalan, D. Cogalniceanu, M. Hughes, M. Kernan, J. Kopáček, A. Korhola, R. Psenner, M. Rogora, E. Stuchlík, M. Veronesi y R. F. Wright,

2004. Acidification in European mountain lake districts: A regional assessment of critical load exceedance. *Aquatic Science* 67:237-251.
- Dejollx C. y A. Iltis., 1991. EL LAGO TITICACA, Síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM. Bolivia. 589pp.
- Delgado, C. N., 2008. Estrategias de fotoprotección a la radiación UV en el zooplancton de dos lagos tropicales de alta montaña, Tesis de Maestría, Posgrado en ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México, 95 pp.
- Dimas-Flores, N., J. Alcocer y J. Ciro, 2008. The structure of the zooplankton assemblages from two neighboring tropical high mountain lakes. *Journal of Freshwater Ecology* 23 (1): 21-31.
- Esteves, F. A., 1998. Fundamentos de Limnología, 2ª edición. Interciencia/FINEP, Río de Janeiro, 602 pp.
- Fong, P., J.B. Zedler, R. M. Donohoe, 1993. Nitrogen vs. phosphorus limitation of algal biomass in shallow coastal lagoons. *Limnology and Oceanography* 38: 906–923.
- García-Palomo, A., J.L. Macías, Arce, L. Capra, V. H. Garduño, J. M. Espíndola, 2002. Geology of Nevado de Toluca volcano y surroundings areas, Central México: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Map and Chart Series, MCH080, 1 mapa, 26 pp. texto.
- García R., C. M. del Torres, H. Padilla, R. Belmonta, E. Azpra, F. Arcega-Cabrera, A. Báez, 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico. *Atmospheric Environment* 40:6088–6100.
- Giles, N., 1988. *Game Conservancy Ann. Rev.* 20: 136-137
- Ginn, B. K., K. M. Rühland, J. D. Young, J. Hawryshyn, R. Quinlan, P. J. Dillon y J. P. Smol, 2012. The perils of using sedimentary phosphorus concentrations for inferring long-term changes in lake nutrient levels: Comments on Hiriart-Baer et al., 2011. *Journal of Great Lakes Research* 38:825-829.
- González, C. H., M. Saldaña, K. Ávila, 2013, Plan de acción climática municipal, Toluca. Primera edición, 180 pp.
- Golterman, H. L., 1983. Algal bioassays and algal growth controlling factors in eutrophic shallow lakes. *Hydrobiologia* 100: 59-64.

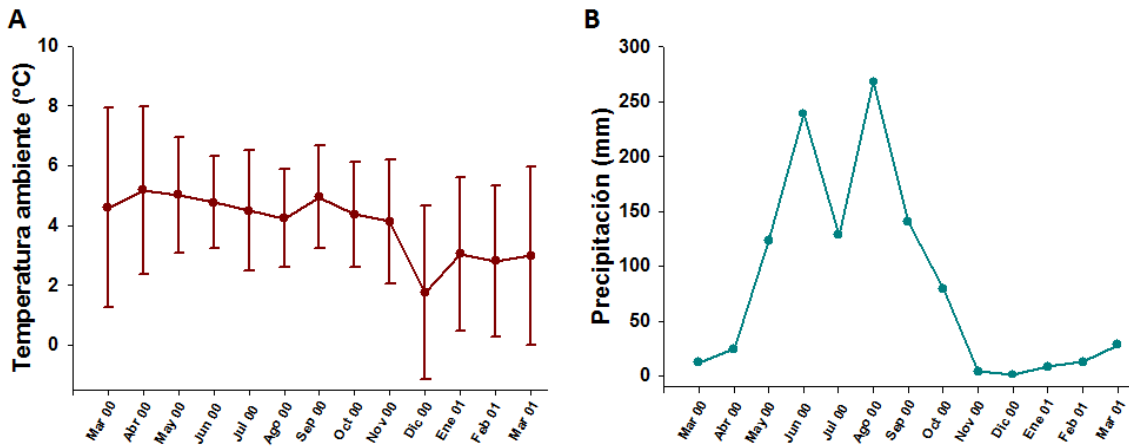
- Goyenola, G., 2007. Guía para la utilización de las Valijas Viajeras: Oxígeno disuelto. Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos 3pp.
- Granados, I., M. y M. Toro, 2000. Recent warming in a high mountain lake (Laguna Cimera, Central Spain) inferred by means of fossil chironomids. *J. Limnol* 59 (Suppl.1): 109-119.
- Granados, I., M. Toro y A. R. Rubio, 2006. Laguna grande de Peñalara, 10 años de seguimiento limnológico". Dirección General del Medio Natural. Madrid, 198pp.
- Heraud, P., S. Roberts y K. Shelly, 2005. Interactions between UV-B exposure and phosphorus nutrition. II. Effects on rates of damage and repair. *Journal of Phycologia* 41:1212–1218.
- Hernández, B., 2008. Dinámica del seston y clorofila "a" en dos lagos tropicales de alta montaña, El Sol y La Luna, Nevado de Toluca, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 70 pp.
- Hofslagare O, G. Samuelsson, S. Sjöberg y N. Ingri, 1983. A precise potentiometric method for determination of algal activity in an open CO₂ system. *Plant, Cell and Environment*. 6:195-201.
- Iltis A., J. P. Carmouse y J. Lemoalle, 1991. En C. Dejollx y A. Iltis (coords.), EL LAGO TITICACA, Síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM. Bolivia. 589pp.
- Larson, G. L., 1996. Development of a 10-year limnological study of Crater Lake, Crater Lake National Park, Oregon, USA. *Lake and Reservoir Management* 12: 221–229.
- Larson, G. L. & M. W. Buktenica, 1998. Variability of Secchi disk readings in an exceptionally clear and deep caldera lake. *Archiv fur Hydrobiologie* 141: 377–388.
- Larson, G. L., R. Collier y M.W. Buktenica, 2006. Long-term Limnological Research and Monitoring at Crater Lake, Oregon. *Hydrobiologia* 574: 1-279.
- Lewis W. M. Jr., 1996. Tropical lakes: How latitude makes a difference. *Perspectives in Tropical Limnology* 43-64.
- Lewis, W. M. 2002. Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie* 28: 210-213.
- Löffler, H., 1964. The limnology of tropical high-mountain lakes. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 15: 176-193.

- Löffler, H., 1972. Contribution to the Limnology of High Mountain Lakes in Central America. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 57(3):397-408.
- Macías, J.L., J.L. Arce, P. A.García, C. Siebe, J.M. Espíndola, J.C. Komorowski, K. Scott, 1997a. Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, Central México, en: K. P. Link y B. J. Kowallis (eds.), *Proterozoic to recent stratigraphy, tectonics, and volcanology, Utah, Nevada, southern Idaho and Central México: Brigham Young University, Geology Studies*, 42(1), 493-528.
- Macías J. L., 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57 (3): 379-424.
- Magnuson, J. J., 1990. Long-term ecological research and the invisible present. *BioScience* 40:495–501.
- Marchetto, A., R. Mosello, R. Psenner, A. Barbieri, G. Bendetta, D. Tait y G. A. Tartari, 1994. Evaluation of the level of acidification and the critical loads for Alpine lakes. *Ambio*23: 150–154.
- Margalef, R., 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona, 1010 pp.
- Mazucca, T. S., 2003. Influencia de las condiciones hidrodinámicas y de la fracción molar de CO₂ en la fase gaseosa sobre el crecimiento celular en cultivos de microalgas. Tesis de Doctorado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Almería, España, 260 pp.
- McIntire, C. D., G. Larson y R. Truitt, 2007. Seasonal and interannual variability in the taxonomic composition and production dynamics of phytoplankton assemblages in Crater Lake, Oregon. *Hydrobiologia* 574:179-204.
- Mercado, J. M., 2002. Ecofisiología y bomba biológica en el océano. *Interciencia* 27 (10):537-543.
- Ogbebo, F. E. and Ochs, C. A. (2008) Bacterioplankton and phytoplankton production rates compared at different levels of solar ultraviolet radiation and limiting nutrient ratios. *Journal of Plankton Research* 30:1271–1284.
- Ponette-González, A. G., K. C. Weathers y L. M. Curran, 2010. Tropical land-cover change alters biogeochemical inputs to ecosystems in a Mexican montane landscape. *Ecological Applications* 20(7):1-18.
- Porta, J., M. López-Acevedo y R. M. Poch, 2013. *Edafología. Uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa. Madrid, 608 p.

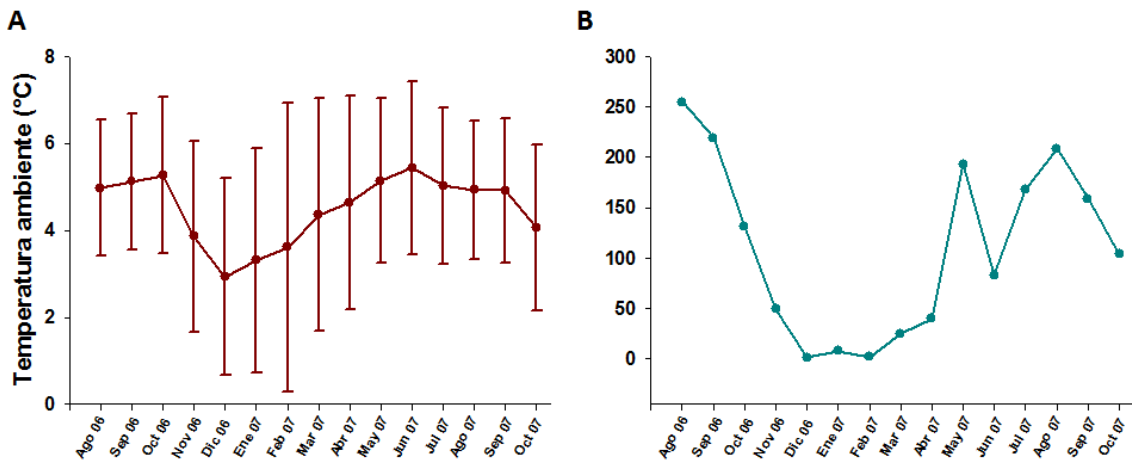
- Pulido-Villena, E., I. Reche y R. Morales-Baquero, 2008. Evidence of an atmospheric forcing on bacterioplankton and phytoplankton dynamics in a high mountain lake. *Aquatic Sciences* 70:1-9.
- Ramos-Higuera, E., J. Alcocer, E. Ortega-Mayagoitia y A. Camacho, 2008. Nitrógeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica* 18(1):105-113.
- Richerson P. J., 1977. The limnology of lake Titicaca (Perú-Bolivia), a large, high altitude tropical lake. *Institute of Ecology* 14:1-71
- Rodríguez, M. J. , 2013. *Ecología. Pirámide*. Madrid, 504 p.
- Roldán G. y J. Ramírez, 2008. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Universidad de Antioquia 440 pp.
- Rzedowski, J., 1981. *La vegetación de México*. LIMUSA. México. 730 pp.
- Sánchez, M., N. Reyes, A. Lugo, J. Alcocer, L. Osegura y L. Peralta, 2004. Variación del bacterioplancton en dos lagos mexicanos de alta montaña. *Scientiae Naturae* 7: 69-83.
- Scheffer, M. y Van Nes E. H., 2007. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia* 584:455–466.
- Sommaruga, R., 2001. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology* 62: 35-42.
- Talavera, V., L. M. Zapata y D. Sánchez, 1998. Influencia del pH sobre los organismos acuáticos. *Nicovita* 3(2):1-2.
- Thomasson, K., 1956. Reflections on Arctic and Alpine Lakes. *Oikos* 7: 119-143.
- Uusitalo, J., 1996. Algal carbon uptake and the difference between alkalinity and high pH (“alkalinization”), exemplified with a pH drift experiment. *Scientia Marina* 60(1):129-134.
- Vilaclara, G., E. Cuna y B. Zeeb, 2005. Subfossil Chrysophyte cyst morphotypes from two tropical high-mountain lakes in Nevado de Toluca volcano, Central Mexico. *Nova Hedwigia Beih* 128: 309-335.

- Wetzel, R. G., 1992. Gradient-dominated ecosystems: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems. *Hydrobiology* 229:181-198.
- Wetzel, R. G., 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Academic Press. San Diego. 1006p.
- Wright, R. M. y V. E. Philips, 1992. Changes in the aquatic vegetation of two gravel pit lakes after reducing fish population density. *Aquatic Botany* 43:43-49.
- Zawisza E., Caballero M. y C. Ruiz- Fernandez, 2012. 500 years of ecological changes recorded in subfossil cladocera in high-altitude, tropical lake lago de La Luna, central Mexico. *Studia Quaternaria* 29: 23–29.

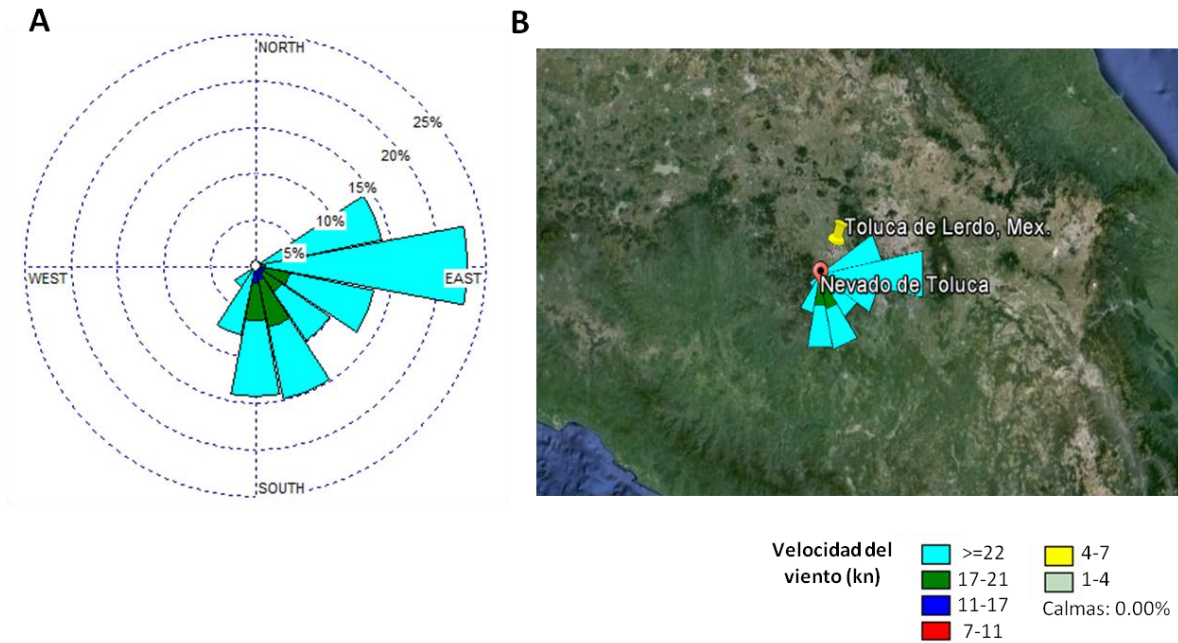
Anexos



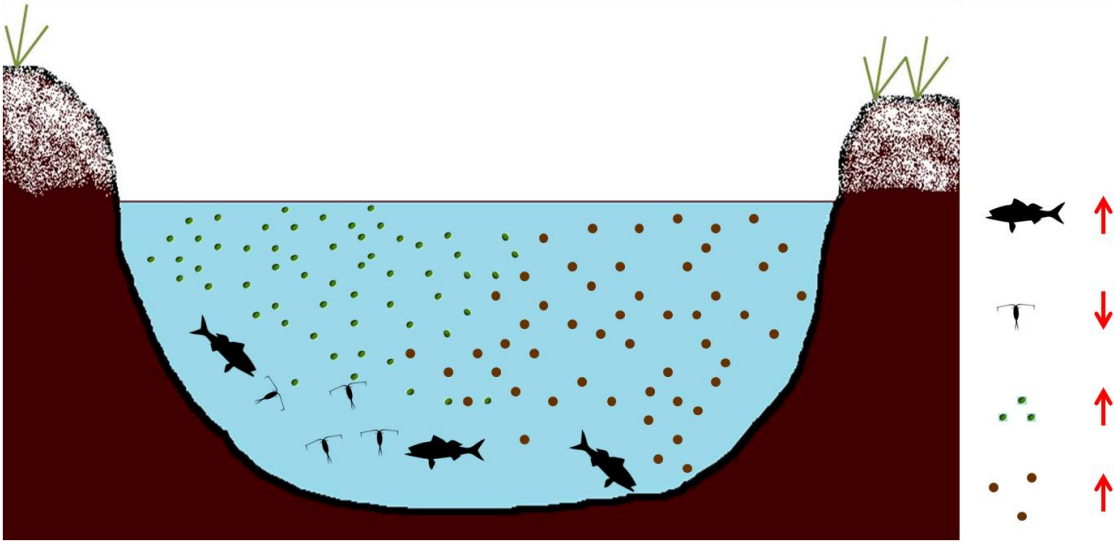
Anexo 1.- Parámetros atmosféricos en el Nevado de Toluca en el periodo de marzo de 2000 a marzo de 2001. A) Temperatura promedio mensual. B) Precipitación total mensual.



Anexo 2.- Parámetros atmosféricos en el Nevado de Toluca en el periodo de agosto de 2006 a octubre de 2007. A) Temperatura promedio mensual. B) Precipitación total mensual.



Anexo 3.- Dirección y velocidad del viento predominante en la zona del Nevado de Toluca (de enero a diciembre de 2006). A) Dirección de los vientos en la zona con respecto a los puntos cardinales. B) Dirección de los vientos en la zona con respecto a la ubicación geográfica de la ciudad de Toluca.



Anexo 4.- Modelo que explica la disminución en la transparencia y el cambio en el estado trófico por la introducción de peces en un cuerpo oligotrófico. La población de peces consume el zooplancton, lo que lleva al aumento en el fitoplancton (puntos verdes) del que estos se alimentan. Además remueven sedimentos (puntos oscuros) y reincorporan a la cadena trófica nutrientes ahí atrapados. Tanto la remoción de sedimentos como el aumento del fitoplancton disminuyen la transparencia de las aguas (Scheffer y Van Ness, 2007).