



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Concentración y distribución vertical de la clorofila
a fitoplanctónica de los lagos de Montebello,
Chiapas, México.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:**

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

**PATRICIA PAULINA HERNÁNDEZ
VICTORIA**



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAVIER ALCOCER DURAND**

2016

Ciudad Universitaria, D. F.



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.

Hoja de datos del jurado

- | | |
|--|---|
| 1. Datos del alumno
Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta | 1. Datos del alumno
Hernández
Victoria
Patricia Paulina
(044)5547317727
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
308054367 |
| 2. Datos del tutor
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno | 2. Datos del tutor
Dr
Javier
Alcocer
Durand |
| 3. Datos del sinodal 1
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno | 3. Datos del sinodal 1
Dra
Rosa Luz
Tavera
Sierra |
| 4. Datos del sinodal 2
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno | 4. Datos del sinodal 2
Dr
Luis Alberto
Oseguera
Pérez |
| 5. Datos del sinodal 3
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno | 5. Datos del sinodal 3
Dra
Vilma Soledad
Ardiles
Gloria |
| 6. Datos del sinodal 4
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno | 6. Datos del sinodal 4
Dr
Daniel
León
Álvarez |
| 7. Datos del trabajo escrito.
Título
Subtitulo
Número de páginas
Año | 7. Datos del trabajo escrito
Concentración y distribución vertical
de clorofila a fitoplanctónica
de los lagos de Montebello,
Chiapas, México
49 p
2016 |

<<La cualidad esencial del buen naturalista es ser un contemplador de la naturaleza y se puede ser un buen naturalista sin conocer los nombres de los escarabajos. (...) Más que saber nombres, hay que saber mirar un árbol, percibirlo como un ser maravilloso, con sus raíces, su convivencia con el cielo y el aire. (...) La contemplación lleva a una admiración y a un conocimiento. El conocimiento generado por la admiración es muy distinto del conocimiento generado por las páginas de un libro o el estudio para un examen. (...) Es muy importante la función emotiva, poética si se quiere de la naturaleza, que queremos hacer desaparecer la faceta didáctica a causa de la insistencia en las bases estrictamente científicas>>

Ramón Margalef

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser el cimiento de mi formación y porque me ha impulsado hacia el camino de la investigación.

Al Dr. Javier Alcocer Durand, por la pasión y entrega con la que comparte sus conocimientos durante clase, la disponibilidad hacia sus alumnos y la gran humildad que lo caracteriza.

Al Dr. Luis A., por su apoyo y enseñanzas durante el campo, por ser una excelente persona y amigo.

A la Dra. Vilma S., por las clases impartidas, la ayuda durante la metodología, las observaciones al escrito y la motivación para seguir adelante.

A la Dra. Rosa L. y al Dr. Daniel León por sus valiosas observaciones a este trabajo.

A Joaquín, Juan Manuel, Circe, Rigel y Porfirio, por el apoyo con los muestreos y gran mistad.

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-CONACYT), proyecto “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas”. y a la DGAPA, proyecto IN219215 “Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas”, por el financiamiento para realizar la presente investigación.

Al Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos”, comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tzisco por facilitar el acceso a los lagos.

Al comité de Administración de Tzisco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tzisco (Armando Hernández), al Comisario Ejidal de Tzisco (Enrique M. Hernández). Y al personal del Hotel Villa Tzisco: Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. y Roel Hernández por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio y a René Morales Hernández, por el apoyo durante el trabajo en campo, a Jacqueline y familia. A todos ustedes gracias por hacer ameno el trabajo y enseñarme el significado de la amistad, a pesar de la distancia y el “poco” tiempo que nos tratamos, siempre fueron excelente personas y sobre todo amigos, de los cuales aprendí mucho del hermoso estado chiapaneco, gracias por todas las experiencias, en ése, nuestro paraíso, el Parque Nacional Lagunas de Montebello.

DEDICATORIA

A Mario Hernández, por ser un gran humano, por el apoyo incondicional durante toda mi vida y mi carrera, por el esfuerzo que realiza día a día a pesar de las dificultades presentes, si la salud está mal, a él, mi figura a seguir, no le importa, mi padre que me enseñó a levantarme después de caer.

A Patricia Victoria, la que me formó como persona, mi única amiga incondicional, el ser humano más maravilloso que he conocido, la que tiene nobleza infinita e irradia amor, gracias por todas las enseñanzas y valores, eres una gran madre.

A Luis Mario, la persona más fiel de mi vida, mi bebé, el pequeño mediador de la familia, y la persona más honesta, sensible y de gran corazón. Me encanta tu potencial ante la vida, no me pudo tocar un hermano mejor.

A Fernanda, pues a pesar de ser mucho menor que yo, me enseñó a tolerar, además de ser un gran ser humano, tan hermosa y alegre, la mejor hermana.

A mis abuelos que aún están: Panchito, gracias por tu apoyo, eres un gran tesoro mío y como tú dices “el que quiere azul celeste, que le cueste”, Mamá Rosa, gracias por las enseñanzas, experiencias y gran amor que tienes hacia todos.

A mis tíos que fueron mi segunda familia: Evangelina y Francisco Hernández.

A la mejor prima casi hermana que me alienta siempre: Paola Victoria.

A mis sobrinos que siempre me llenan de alegría: Julián e Ivanna.

A la familia que elegí, mis amigos de toda la vida: Iván Romero, Tania King, Mayra Cruz, Karla Morales, Saith Aguilar y Yadir Campos. A mis amigos incondicionales, pues hicieron amena y divertida la carrera: Ceci, Pame, Clari, Yaz, Chayo, Leo, Rod, Juan, Tetsu, Héctor, Novelo, Porfi, Alfred y Sebas. A mi equipo de las prácticas profesionales: Liz, Alex, Viri, Rulo, Caro, Jorge, Danna. A mi equipo: Alma, Jesús y Adrián. Por su puesto, a mis grandes amigos y compañeros limnólogos: Lucely y Andrea (ahora Colombia forma parte de mi), Daniel Cuevas, gracias por tu apoyo, incondicional ayuda y gran amistad.

Gracias a cada una de las personas que me ayudó en cualquier aspecto de mi vida, pues sin ustedes, no habría sido posible.

Contenido

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	7
Antecedentes	10
Justificación	12
Hipótesis	13
Objetivos	13
Objetivo general.....	13
Objetivos particulares	13
Área de estudio	14
Metodología	16
Trabajo de campo:	16
Trabajo de laboratorio.....	19
Trabajo de gabinete	21
Resultados	22
Parámetros físico-químicos	22
Temperatura, oxígeno disuelto y Zeu	22
Biomasa fitoplanctónica.....	31
Distribución de Clor-a en la columna de agua.....	32
Discusión	36
Conclusiones	44

Índice de figuras

Fig. 1 Mapa del Parque Nacional Lagunas de Montebello, ubicación de los lagos en estudio	16
Fig. 2 Localización en imagen satelital de los lagos en estudio.....	17
Fig. 3 Muestreos en el PNLM. Contraste de los días soleados (2014) con los días de niebla y lluvia (2015)	19
Fig. 4 Equipos utilizados para el registro in situ de variables ambientales y obtención de muestras de agua durante el trabajo en campo: a) botella muestreadora UWITEC, b) perfilador de fluorescencia natural PNF-300, c) equipo multisensor de calidad de agua Hydrolab.....	20
Fig. 5 Equipo de filtración: a) instalación completa, b) equipo de filtración y materiales para llevar a cabo el proceso, c) bomba de vacío, d) depósito de la muestra de agua en el cono, e) proceso de filtración, f) coloración de los filtros y g) filtros empaquetados. .	21
Fig. 6 Macerado de muestras: a) paquetes de filtros con las tres repeticiones por profundidad, b) macerador de tejidos, c) proceso de maceración con tubo esmerilado, d) filtro sin macerar (derecha) y filtro macerado (izquierda), e) enjuague con acetona al 90%, el macerado se coloca en un tubo de centrifuga obscuro.....	22
Fig. 7 Lectura fluorométrica: a) calibración mediante estándar de clorofila “a”, b) centrifugado de las muestras, c) volumen extraído después de la centrifugación d) equipo de disoluciones para realizar lectura de fluorescencia	23
Fig. 8 Temperatura promedio y d.e. en el periodo de 2014 y 2015 en los lagos en estudio del PNLM.....	25
Fig. 9 Oxígeno disuelto promedio y d.e. en el periodo de 2014 y 2015 en los lagos en estudio del PNLM.....	26
Fig. 10 Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto en los lagos prístinos-profundos: Ensueño a) y b) (figuras superiores) y Patianú c) y d) (figuras inferiores), en épocas diferentes	27
Fig. 11 Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto en los lagos impactados-profundos: Bosque Azul a) y b) (figuras superiores) y La Encantada c) y d) (figuras inferiores), en épocas diferentes	28

Fig. 12 Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto en los lagos impactados-profundos: Liquidambar a) (figura izquierda) y San Lorenzo b) (figura derecha), en épocas diferentes	29
Fig. 13 Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto en los lagos prístinos-someros: Esmeralda a), en épocas diferentes.....	30
Fig. 14 Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto en los lagos impactados-profundos: Balantetic a) y b) (figuras superiores) y Chaj Chaj c) y d) (figuras inferiores), en épocas diferentes	31
Fig. 15 Distribución vertical de la Clor-a en Ensueño (izquierda) y Patianú (derecha)..	33
Fig. 16 Distribución vertical de la Clor-a en Bosque Azul (izquierda) y La Encantada (derecha).....	34
Fig. 17 Distribución vertical de la Clor-a en Liquidambar (izquierda) y San Lorenzo (derecha)	35

Índice de tablas

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM. (Z= profundidad en metros, max = profundidad máxima, med = profundidad media).	19
Tabla 2. Concentraciones mínimas y máximas, promedio (\bar{x}) y desviación estándar (d.e.) de clorofila “a” en los lagos en estudio del PNLM. ($Z_{MÁX}$ = profundidad máxima). 31	
Tabla 3. Concentración de Clor-a para la determinación del estado trófico en un cuerpo acuático según la OCDE en 1982	32
Tabla 4. Concentraciones de Clor-a ($\mu\text{g/L}$) y parámetros físico-químicos reportados para otros lagos kársticos. (Z = profundidad (m), Som. = lago somero, OD = oxígeno disuelto (mg/L), T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Oli = oligotrófico, Mes = mesotrófico, Eu = eutrófico, Hip= hipereutrófico)	45

Resumen

El sistema lacustre del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas, ha mostrado cambios en la coloración de las aguas de algunos de sus lagos. Lo anterior ha causado desconcierto entre pobladores y autoridades. Para indagar la causa de este cambio se llevó a cabo un estudio comparativo en 9 lagos del PNLM incluyendo lagos tanto impactados como prístinos (no impactados). Se realizaron dos campañas de muestreo, verano de 2014 correspondiente al periodo de estratificación e invierno del 2015 periodo de circulación, con el fin de llevar a cabo la evaluación de su estado trófico, utilizando para ello la concentración de clorofila “a” (Clor-a) como *proxi* de la biomasa fitoplanctónica. El método utilizado para medir la Clor-a fue el fluorométrico (límite de detección (DLM) de 0.025 µg/L). Adicionalmente, se midieron algunas variables físico-químicas *in situ* a lo largo de la columna de agua. Los lagos presentaron una amplia variación en la concentración de Clor-a en un intervalo de 0.18 a 45.73 y con un promedio de 12.10 ± 6.71 µg/L en verano (2014) y de 0.41 a 148.4 µg/L y un promedio de 49.70 ± 8.87 µg/L en invierno (2015). Los lagos prístinos presentaron un intervalo de 0.18 a 4.24 µg/L con un promedio de 0.74 ± 0.36 µg/L, mientras que los impactados desde 0.92 a 148.4 µg/L con un promedio de 48.91 ± 12.25 µg/L. Las concentraciones de Clor-a fueron mayores en la temporada invernal/circulación que en la época de verano/estratificación. La distribución en el perfil vertical también fue diferente; los lagos prístinos presentan máximos profundos de Clor-a y los impactados máximos superficiales o sub-superficiales. Con relación al perfil de temperatura, los lagos someros parecen ser polimícticos cálidos mientras que los profundos monomícticos cálidos. Dependiendo de la distribución y perfil vertical de la concentración de oxígeno disuelto los lagos se clasificaron en: ortogrados (mayor concentración de OD en el hipolimnion que en el epilimnion) y clinogrados (reducción significativa de OD en el hipolimnion). Salvo los lagos someros y prístinos que presentaron OD en el fondo durante el verano, los demás desarrollaron hipolimnia anóxicos. Finalmente, los lagos se clasificaron

en un amplio intervalo de niveles tróficos de acuerdo a los criterios de la Organización y Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), desde ultraoligotróficos hasta hipereutróficos. Los lagos impactados: Bosque Azul, Chaj Chaj, Balantetic, Liquidambar, La Encantada y San Lorenzo se clasifican como mesotróficos, eutróficos o hipereutróficos, mientras que los prístinos como Ensueño, Patianú y Esmeralda presentaron estados ultraoligotróficos. El cambio de coloración de las aguas de los lagos impactados del PNLM se debe, por lo menos, a un incremento en su biomasa fitoplanctónica expresado a través de su concentración de Clor-a.

Abstract

The lake system of the National Park "Lagunas de Montebello" (PNLM), Chiapas, showed changes in color of the water of some lakes its. This has caused confusion among residents and authorities. In order to know the cause of this change we did a comparative study on 9 lakes in PNLM including impacted lakes and pristine. We did two sampling campaigns, summer 2014 (stratification period) and winter 2015 (circulation period) were performed the evaluation of trophic status, we used the concentration of chlorophyll "a" (Clor-a) as a *proxy* for phytoplankton biomass. We used the method fluorometric (limit of detection (MLD) of 0.025 µg/L) to measure the Clor-a. Additionally, some physicochemical *in situ* spot along the water column measured variables. Lakes showed a wide variation in the concentration of Clor-a, in a range of 0.18 to 45.73 µg/L with average 12.10 ± 6.71 µg/L in summer (2014) and 0.41 to 148.4 µg/L with average 49.7 ± 8.87 µg/L in winter (2015). Pristine lakes had a range of 0.18 to 4.24 µg/L with an average of 0.74 ± 0.36 µg/L, whereas impacted from 0.92 to 148.4 µg/L averaging 48.91 ± 12.25 µg/L. The Clor-a concentrations were higher in the winter/circulation in the summer/stratification. The distribution in the vertical profile was also different; pristine lakes have deep chlorophyll maximum and the impacted maximum subsurface. Regarding

temperature profile, shallow lakes appear to be polymictic warm while deep lakes warm monomictic. Depending on the distribution and vertical profile of the dissolved oxygen concentration were classified as: orthograde (OD greater concentration in the hypolimnion than in the epilimnion) and clinograde (significant reduction of OD in the hypolimnion). We recorded anoxic hypolimnion in most of the lakes in the summer, only pristine lakes, shallow OD presented in the background. Finally, the lakes are classified into a wide range of trophic levels according to the criteria of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), from ultraoligotrophic to hypereutrophic. Impacted lakes: Bosque Azul, Chaj Chaj, Balantetic, Liquidambar, La Encantada and San Lorenzo are classified as mesotrophic, eutrophic or hypereutrophic, while pristine lakes as Ensueño, Patianú y Esmeralda presented ultraoligotrophic states. The change in color of the water the impacted lakes in PNLN is, at least, due to an increase in the phytoplankton biomass expressed through its concentration of Chlor-a.

Introducción

Chiapas es el estado con mayor riqueza y diversidad acuática del trópico húmedo de México; forma parte de dos amplias regiones hidrológicas en las vertientes del Pacífico y el Atlántico que son la costa de Chiapas (15% de superficie estatal) y las cuencas Grijalva-Usumacinta (85%), separadas por el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas (González, 2005).

En Chiapas se encuentra el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) el cual está comprendido en la Región Hidrológica Nacional No. 30 “Grijalva-Usumacinta” y forma parte de la subcuenca del Río Grande de Comitán, con 545 km², el que a su vez es parte de la cuenca del Río Lacantún. La presencia de superficies inundables, sobre todo en la porción noroccidental, determina periodos fluctuantes del medio lacustre-palustre entre las estaciones, dependiendo del volumen del agua precipitado (CONANP, 2009).

El PNLM representa uno de los escenarios naturales más bellos a nivel nacional caracterizado por el color inigualable de más de 60 cuerpos lacustres, que varían en la extensión, forma y tonalidad del agua, con colores que - originalmente- van desde el azul pálido al esmeralda y el turquesa (CONANP, 2009).

Estos lagos constituyen un complejo lacustre de origen kárstico extendido entre territorio mexicano y guatemalteco. La alimentación de las aguas lacustres es principalmente subterránea (Vásquez y Méndez, 1994). En su origen, estos lagos constituyeron dolinas o uvalas kársticas formadas por el derrumbe de los techos de los sistemas de cuevas subterráneas, resultado de la disolución química de las calizas. Su posición específica dentro del sistema de las aguas freáticas kársticas facilita el relleno de estas depresiones con aguas subterráneas.

Los lagos presentan variables morfológicas; en algunos existen orillas, pequeñas playas o zonas inundables mientras que en otros se encuentran paredes escarpadas que carecen de orillas planas y cuentan con espejos lacustres relativamente profundos. Los manantiales que nacen en esta zona se

encuentran en el extremo sureste del Parque y forman parte de la cuenca del Río Santo Domingo (CONANP, 2009).

Los bienes y servicios ecológicos que proporcionan los ecosistemas del PNLM incluyen el resguardo del patrimonio genético, la absorción de gases con efecto de invernadero, la regulación climática, el mantenimiento de recursos hídricos, la conservación de suelos, la preservación de valores paisajísticos, la producción de recursos forestales maderables y no maderables y la estructuración de hábitat para una amplia diversidad de flora y fauna (SEMARNAT-CONANP, 2007).

El PNLM forma parte de sistemas ecológicos, culturales y económicos amplios del país. Esta región se constituyó como Área Natural Protegida mediante el Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación (16 de diciembre de 1959) y fue designada como sitio RAMSAR en 2003 (DOF, 2004).

Lo anterior significa que el PNLM se encuentra en la lista de humedales de importancia internacional según los criterios establecidos por la Convención sobre los Humedales en 1971, que es el único tratado ambiental mundial acerca de un ecosistema en particular y que entró en vigor a finales de 1975. Además, constituye un Área de Importancia para la Conservación de las Aves en México (AICA) a partir de 2007.

En el año 2003 se reportó un cambio en la coloración del agua de cristalina a amarillo-verdosa en la “Laguna Vuelta de Agua”, así como la presencia de natas blancas-amarillentas en las orillas, un olor desagradable -posiblemente por la presencia de compuestos azufrados- y mortandad de peces. Posteriormente, en cada año, entre los meses de diciembre a febrero, se ha venido reportando el fenómeno de cambio de coloración y extendiéndose este fenómeno hacia otros lagos vecinos (CFE-GEIC, 2012a). Lo anterior generó gran preocupación en la población y el gobierno del estado, debido a los posibles impactos sobre la salud pública, la pérdida potencial de su atractivo turístico y, con ello en la economía local.

Desafortunadamente, la información limnológica de los cuerpos acuáticos del PNLM era muy escasa como para dar respuesta a lo que estaba pasando en esos lagos. Por lo anterior se planteó la realización de un reconocimiento limnológico con el fin de identificar en qué consistía el cambio acaecido en los lagos denominados de aquí en adelante como “impactados” y compararlos con los que aún se encuentran aparentemente sin ningún tipo de impacto, a los que llamaremos “prístinos” como referencia a que conservan las condiciones originales previas al desarrollo urbano y turístico y al incremento de la actividad agropecuaria.

Como parámetro indicador del cambio se utilizó la concentración de clorofila “a” (Clor-a) fitoplanctónica. La estimación de la concentración de este pigmento se utiliza para estimar la biomasa de los productores primarios (Huot *et al.*, 2007; Astor y Fanning, 2011). La generación de la biomasa fitoplanctónica está determinada por procesos fisiológicos del fitoplancton, la tasa fotosintética o productividad primaria y por las condiciones ambientales entre las que destacan la concentración de nutrientes (Weiaupt, 1984).

La variación de la dinámica lacustre y como consecuencia la dinámica fitoplanctónica está determinada principalmente en función de los siguientes factores: luz, temperatura, suspensión o permanencia de las células en la columna de agua, disponibilidad de nutrientes y el consumo por parte de los herbívoros (Reynolds, 1984, 1988, 2006; Pollinger, 1990), los cuales regulan la riqueza, diversidad, producción y biomasa del fitoplancton; estos factores generan un gradiente vertical y variaciones temporales dentro del cuerpo acuático. El elemento que normalmente condiciona la producción primaria es la disponibilidad de los nutrientes (especialmente compuestos de nitrógeno, fósforo y sílice) (Smith, 2006).

La degradación progresiva que sufren los ecosistemas acuáticos es uno de los problemas más graves con los que se enfrenta actualmente el entorno natural. El vertido de residuos orgánicos, la fertilización de las aguas con abonos agrícolas y la creciente industrialización y urbanización de zonas rurales ha

incidido negativamente en la calidad de los sistemas acuáticos. Debido a estos hechos el número de lagos y lagunas con problemas de eutrofización ha aumentado considerablemente en los últimos años (Borrego y García, 1992).

Antecedentes

A raíz de que se presentara el fenómeno de cambio de color del agua de algunos lagos del PNLM, en 2010 el gobierno del estado de Chiapas solicitó al CONACYT emitir a través del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua, en el área del Sistema Hidrológico Nacional, la demanda específica denominada “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, en el Estado de Chiapas”. El CONACYT declaró desierta la convocatoria.

En 2011, la Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural del Gobierno de Chiapas (SEMAHN) solicitó apoyo a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la realización del estudio que se había declarado desierto. La CFE presentó una propuesta técnica del proyecto denominado “Visión general de la problemática del cambio de coloración desde la laguna Chinkultic hasta la Laguna Vuelta de Agua en el PNLM, Chiapas” (CFE-GEIC, 2012a).

La CFE y la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra (CFE-GEIC) realizaron el estudio dividido en dos etapas: la primera de diagnóstico, en la cual se entregó un informe de análisis de datos recabados en campo, del estudio climatológico, estaciones meteorológicas automáticas, nubes e hidrometría del periodo comprendido entre octubre del 2011 a marzo del 2012 y la segunda, correspondiente al análisis de datos generados en el periodo de abril a septiembre del 2012 (CFE-GEIC, 2012a). El estudio concluye que el PNLM está altamente influenciado por el sistema de alta presión del Atlántico, las cuales favorecen vientos de moderados a fuertes del noroeste. (CFE-GEIC, 2012a).

Debido a las características de permeabilidad de la roca y a la profundidad del nivel estático, el acuífero se considera como vulnerable a la contaminación lo que ocasiona un deterioro en la calidad del agua subterránea.

Las fuentes potenciales de contaminación son por lixiviación e infiltración de los residuos sólidos municipales, infiltración de aguas residuales no tratadas, entre otros (CFE-GEIC, 2012b).

De acuerdo con los datos *in situ* se registraron condiciones reductoras, presencia de sulfuros y agroquímicos en la zona de estudio; también se detectó la presencia de metales pesados en la zona, sin embargo, fueron asociados principalmente a las características litológicas del entorno. De acuerdo al estudio existen dos tipos de agua dominante, bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sulfatada (CFE-GEIC, 2012b).

Como parte del estudio integral para atender la problemática del sistema lagunar de Montebello, el Departamento de Modelos Matemáticos, perteneciente a la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE, propuso la construcción de un modelo de calidad del agua integral, basado en mediciones de parámetros físico-químicos en la zona de estudio, incluyendo modelos numéricos para la caracterización físico-química del sistema. Dichos modelos se generaron a partir de mediciones sistemáticas en los cuerpos lagunares, tanto hidrodinámicas como de calidad del agua y posteriormente realizaron una propuesta de solución dirigida a mitigar el grado de contaminación sólo en el lago Vuelta de Agua (CFE-GEIC, 2012c). Como resultado obtuvieron el perfil batimétrico, la velocidad de corriente, una alta concentración de sulfuros, clasificación clinograda respecto a los niveles de oxígeno disuelto, presentó mortandad de peces y alto grado de turbidez, por lo tanto, el lago tiene un nivel trófico elevado, que puede catalogarse como un sistema eutrófico (CFE-GEIC, 2012c).

Por otra parte, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas realizó dos estudios (2009 y 2011) denominado “Programa de monitoreo de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan”. Analizaron diferentes parámetros físico-químicos, las mediciones se realizaron desde la superficie y hasta los 5 metros de profundidad. En 2009 se concluye que existe cambio de coloración relevante en los lagos Bosque Azul y La

Encantada, pero que el agua no presenta altos índices de contaminación, por lo que se sugirió que deben ampliarse los análisis y estudios del área.

La Encantada presentó un promedio de oxígeno disuelto de 9.5 mg/L, Esmeralda con 6.2 mg/L y Bosque Azul de 8.3 mg/L, los tres lagos registran condiciones normales según la Norma Oficial (CONANP, 2009).

En 2011 dando seguimiento a este estudio, la CONANP realizó un muestreo en cuatro lagos más: Montebello, Tzisco, Agua Tinta y Vuelta de agua, con objeto de evaluar la calidad físico-química para clasificarlos y comparar su calidad con la normativa legal vigente. Se encontró que los parámetros están dentro de los límites permisibles de la vida acuática, ya que los valores encontrados no exceden los criterios ecológicos establecidos en la Norma Oficial (CONANP, 2011).

Los estudios anteriores, no revelaron la causa del cambio de coloración observado en los lagos mencionados, por lo que era evidente que se deberían de hacer estudios complementarios.

Justificación

Existe poca información que de forma integrada muestre las características limnológicas generales de los cuerpos acuáticos del PNLM y ninguna que permita contar con una referencia previa al cambio. Los estudios que se han realizado se enfocan en un lago en particular o no toman en cuenta toda la columna de agua del mismo. Debido a lo anterior, en la presente investigación se planteó entender los cambios que están sucediendo en algunos de los lagos del PNLM, para lo cual se pretendió reconocer el estado trófico de un grupo de nueve cuerpos acuáticos representativo al incluir lagos impactados y prístinos, someros y profundos. Para lo anterior se empleó como *proxi* del contenido de biomasa fitoplanctónica la concentración de clorofila “a” a lo largo de la columna de agua.

Hipótesis

H1: El cambio observado en los lagos impactados deriva del aumento del estado trófico de sus aguas lo que será evidenciado a través de una mayor concentración de clorofila “a” fitoplanctónica.

Objetivos

Objetivo general

- Describir la concentración y distribución de la biomasa fitoplanctónica presente en la columna de agua en seis lagos impactados y tres prístinos, del “Parque Nacional Lagunas de Montebello”, Chiapas, empleando para ello la concentración de clorofila “a” como *proxi* de la concentración de la biomasa fitoplanctónica en dos épocas ambientales contrastantes: estratificación y circulación.

Objetivos particulares

- Determinar la concentración y distribución en la vertical de la clorofila “a” en nueve lagos del PNLM.
- Comparar la variabilidad de la concentración y distribución de la clorofila “a” en dos periodos de muestreo (estratificación y circulación).
- Determinar con base en la concentración de la clorofila “a” el estado trófico de los lagos en estudio.
- Medir los perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y radiación fotosintéticamente activa (PAR).
- Relacionar la concentración y distribución de la clorofila “a” con las variables ambientales medidas.

Área de estudio

El Parque Nacional Lagunas de Montebello se localiza en la región sureste del estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala, abarca una superficie de 6,022 hectáreas y comprende parte de los municipios llamados La Independencia y La Trinitaria, este último abarcando el 95% del Área Natural Protegida (ANP). Sus coordenadas extremas se encuentran entre los 16° 04'40'' y 16°10'20'' para la latitud norte, mientras que para la longitud oeste son 91° 37'40'' y 91°47'40''. La altitud varía entre los 1,380 y 1,740 m s.n.m. (CONANP, 2011). El lugar presenta rocas sedimentarias, las cuales tienen un intenso fallamiento, fracturamiento y alto grado de disolución, lo que ocasiona la formación de una gran cantidad de dolinas. El sistema lagunar está directamente relacionado con el sistema de fracturamiento y fallamiento regional (CFE-GEIC, 2012a).

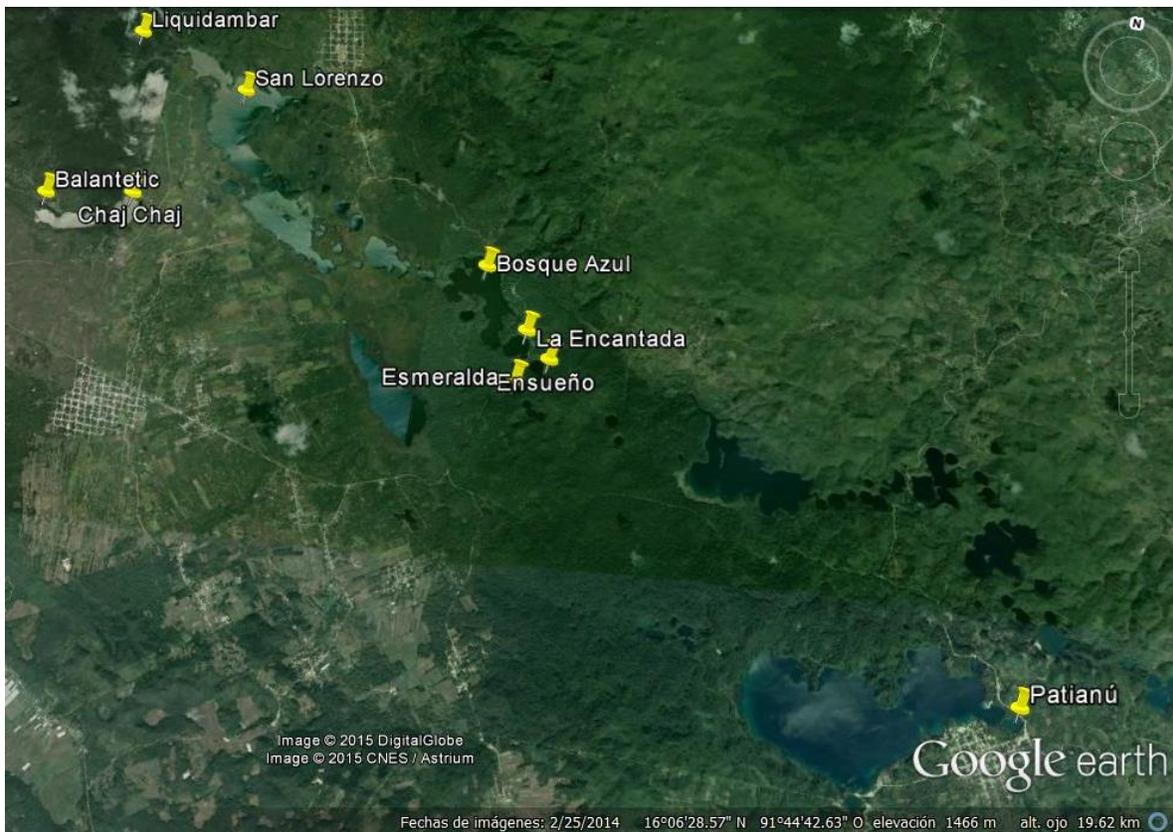


Figura 1. Parque Nacional Lagunas de Montebello. Se muestra la ubicación de los lagos seleccionados para este estudio. (Tomado de Google Maps).

El PNLM presenta clima de tipo C (fm), templado húmedo con lluvias todo el año y en el extremo noroeste uno A (cm), cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y con ausencia de heladas en los meses más fríos (CONANP, 2009). La temperatura media mensual es de 23.6 °C con una oscilación térmica anual de 5.6°C, el mes más frío es enero con un promedio de 20.9°C y el más cálido abril con un promedio de 26.5°C (CONANP, 2011).

La precipitación media del mes más seco es menor a 40 mm. Durante la temporada de lluvia, la precipitación es de 1,200 a 1,400 mm con 90 a 119 días de lluvia. El mes más húmedo es septiembre. La precipitación total anual es de 1,862 mm distribuida en dos periodos bien definidos, uno de alta humedad y otro de relativa sequía. Durante el periodo húmedo (de mayo a diciembre) llueve un promedio de 1,716 mm, el 92% de la precipitación total anual, mientras que el 8% restante (146 mm), se distribuye en las escasas lluvias del periodo seco (INEGI, 1984).

Con respecto a sus dimensiones, son siete los lagos principales del Parque. El Sistema Tepancoapan de 13 km de longitud está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne además a los lagos de San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, Encantada, Esmeralda, Bartolo y Peñasquito. Éstos se comunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. El desagüe parcial del sistema se realiza a través de un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul, a través de un sumidero en el sitio denominado "El Arco". Con base en sus dimensiones, le siguen en importancia los lagos de Tzisco (3.6 km de longitud), Montebello (2 km de longitud) y Pojoj (un kilómetro de longitud).

El Río Grande es el río principal de la subcuenca donde se ubica el PNLM. Las aguas negras de la ciudad de Comitán de Domínguez desembocan a éste y representan una seria amenaza de contaminación al sistema del PNLM. No obstante, existe inconsistencia en la información sobre el sitio en que el río vierte el contenido de sus aguas. Se ha descrito que este río no tiene desagüe directo y que sí lo tiene con el Sistema de Lagos Tepancoapan (Vásquez y Méndez, 1994).

Metodología

Los cuerpos lacustres seleccionados fueron Balantetic, Bosque Azul, Chaj Chaj, Encantada, Ensueño, Esmeralda, Liquidambar, Patianú y San Lorenzo (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM y clasificación *a priori*. (Zmax = profundidad máxima, Zmed = profundidad media, S = somero, P = profundo, I = impactado, P = prístino).

Nombre	Lat (N°)		Long (W°)		Zmax (m)	Zmed (m)	S/P	Estado
Balantetic	16.1255	16.1284	91.7932	91.7852	3	1.7	S	I
Bosque Azul	16.1199	16.1313	91.7290	91.7392	58	20.0	P	I
Chaj Chaj	16.1275	16.1315	91.7798	91.7830	12	5.3	S	I
Ensueño	16.1173	16.1191	91.7249	91.7268	35	21.6	P	P
Esmeralda	16.1176	16.1186	91.7277	91.7289	7	3.6	S	P
La Encantada	16.1189	16.1218	91.7270	91.7307	89	29.4	P	I
Liquidambar	16.1505	16.1609	91.7812	91.7903	21	11.2	P	I
Patianú	16.0851	16.0867	91.6627	91.6651	26	10.8	P	P
San Lorenzo	16.1256	16.1533	91.7531	91.7807	67	11.8	P	I

Trabajo de campo:

El presente estudio se llevó a cabo en dos periodos climáticos contrastantes: mayo de 2014 (verano) y febrero de 2015 (invierno) (Fig. 3), que a su vez se corresponden con las épocas de estratificación y circulación de la columna de agua de aquellos lagos suficientemente profundos para desarrollar una estratificación estable.



Figura 3. Muestreos en el PNLM. Contraste de los días soleados (2014) con los días de niebla y lluvia (2015).

En la parte central y profunda de los lagos se midieron perfiles verticales metro a metro de temperatura (T) y oxígeno disuelto (OD), mediante una sonda multiparamétrica de calidad de agua, marca Hydrolab modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4a. Para determinar la zona eufótica ($Z_{eu} = 1\%$ de la radiación fotosintéticamente activa –PAR- en superficie -SPAR-) se utilizó un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300 (Fig. 4).

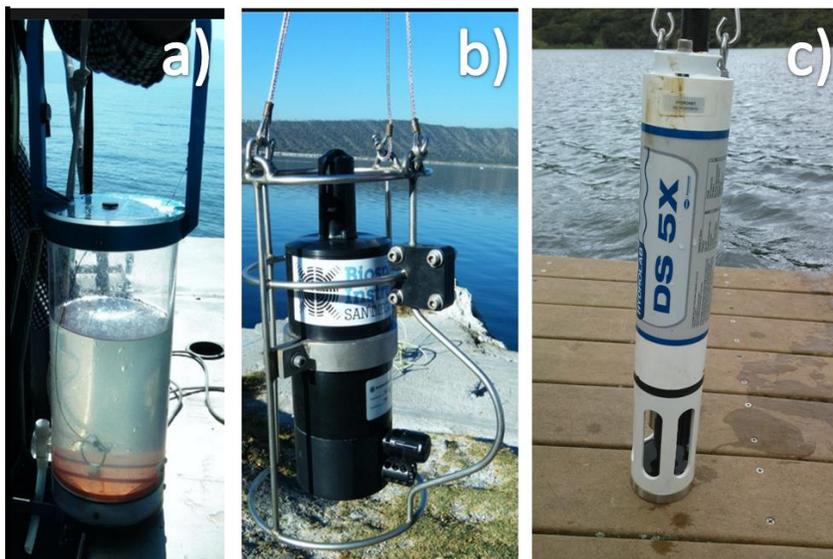


Figura 4. Equipos utilizados para la obtención de muestras de agua y el registro *in situ* de variables ambientales durante el trabajo en campo: a) botella muestreadora de agua UWITEC, b) perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300, c) equipo multisensor de calidad de agua Hydrolab DS5X.

Se recolectaron muestras de agua de los nueve lagos en estudio, utilizando una botella muestreadora UWITEC de 5 L de capacidad (Fig. 4) Se tomaron muestras a cinco diferentes profundidades en caso de ser un lago profundo y a una sola profundidad en los lagos someros, clasificados de acuerdo a Moss *et al.* (1994). Las muestras fueron colocadas en frascos limpios de polietileno previamente etiquetados.

El mismo día de la colecta se tomaron entre 20 y 150 mL de agua de cada muestra y se filtraron con ayuda de una bomba de vacío a través de filtros de fibra de vidrio marca Whatman GF/F de 13 mm de diámetro con apertura de poro nominal de 0.7 μm . El volumen filtrado varió en cada lago dependiendo de la

cantidad de clorofila presente en cada muestra. Los filtros fueron empaquetados en sobres de papel previamente etiquetados con el nombre del lago, fecha, profundidad, volumen filtrado y número de repetición (tres repeticiones por profundidad) (Fig. 5). Los filtros se mantuvieron en congelación y oscuridad para su traslado y posterior análisis en el laboratorio del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical de la FES Iztacala, UNAM, en la Ciudad de México.

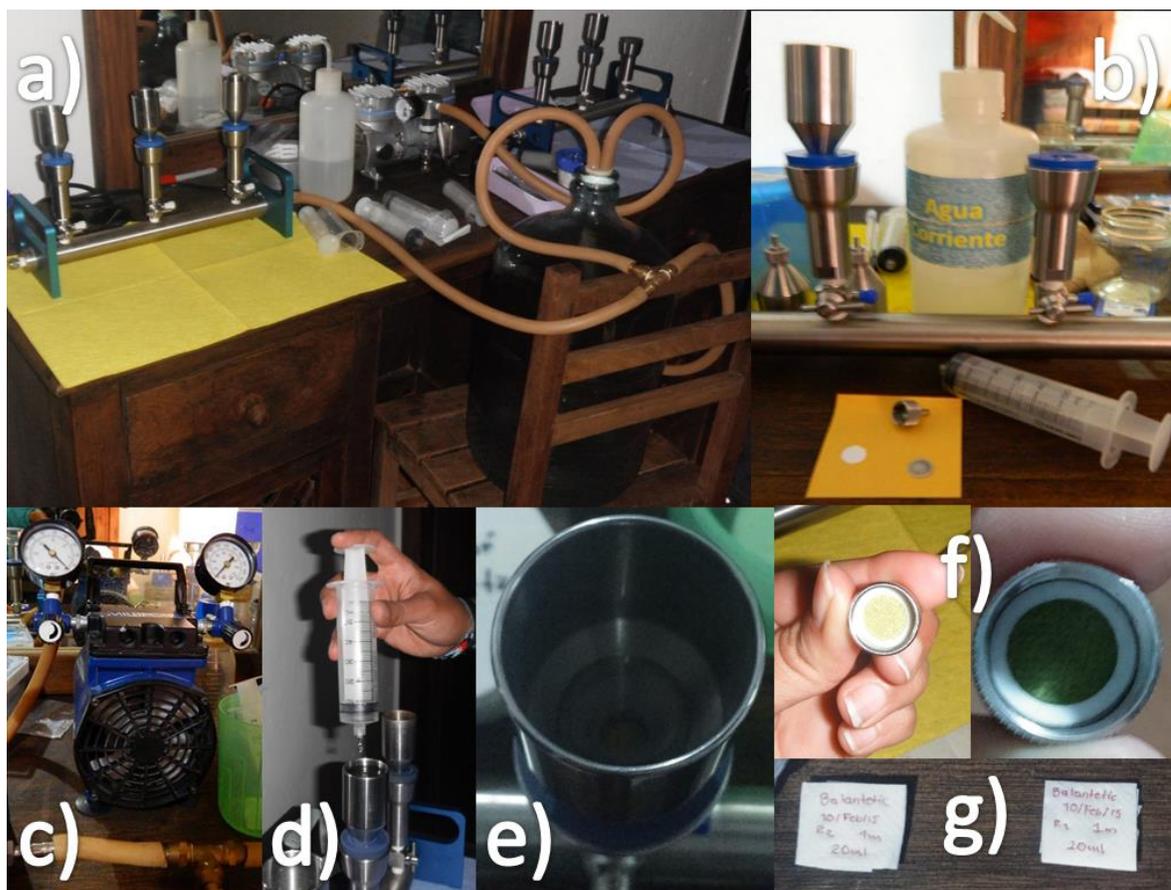


Figura 5. Equipo de filtración: a) instalación completa, b) equipo de filtración y materiales para llevar a cabo el proceso, c) bomba de vacío, d) vertido de la muestra de agua en el cono, e) proceso de filtración, f) filtros con fitoplancton y g) filtros empaquetados.

Trabajo de laboratorio

El cálculo de la Z_{eu} consideró desde la superficie y hasta la profundidad a la cual se alcanza el 1% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en superficie.

Para la determinación de la concentración de la clorofila "a" se siguió el Método 445.0 de la United States Environmental Protection Agency -EPA- (Arar y Collins, 1997). Este método fue diseñado para utilizar la misma marca y modelo del fluorómetro empleado en esta investigación (i.e., Turner Desings, modelo 10 AU), utilizando para la determinación *in vitro* de la Clor-a por medio de fluorescencia. En términos generales, la concentración de Clor-a en el agua es proporcional a la biomasa algal presente, por esto, se considera a la Clor-a como un buen parámetro para elaborar un índice sencillo y útil que permite comparar los estados tróficos (Salas y Martino, 1996).

En el laboratorio se trituró cada uno de los filtros de fibra de vidrio GF/F, por medio de un macerador de tejidos de teflón de 50 mm x 20 mm añadiendo 10 mL de acetona al 90%, en un tubo de vidrio esmerilado o de trituración. Primero se maceró el filtro, añadiendo 5 mL de solvente y posteriormente se agregaron 5 mL más para enjuagar tanto el macerador como el tubo de trituración (Fig. 6). Al inicio y al término del procesamiento de cada filtro, se limpió el macerador de tejidos con un pañuelo de papel limpio para evitar interferencia o contaminación en los resultados.

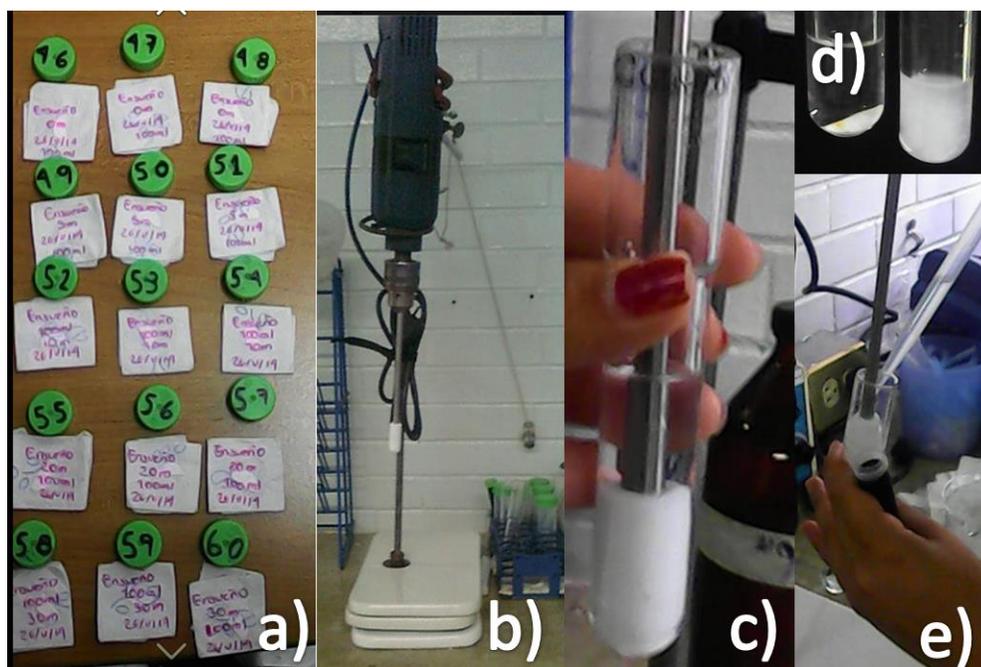


Figura 6. Macerado de muestras: a) paquetes de filtros con las tres repeticiones por profundidad, b) macerador de tejidos, c) proceso de maceración con tubo esmerilado, d) filtro sin macerar (derecha) y filtro macerado (izquierda), e) enjuague con acetona al 90%, el macerado se coloca en un tubo de centrifuga obscuro.

Las muestras maceradas se dejaron en frío y oscuridad por aproximadamente 20 horas para la extracción de la Clor-a. Pasado este tiempo, el extracto se centrifugó a 3,000 r.p.m durante 15 minutos. El sobrenadante se transfirió a una cubeta de cuarzo, en la cual se realizaron las lecturas de fluorescencia correspondiente en el (TD 10 AU), para determinar la absorbancia del extracto obtenido. Previamente, el fluorómetro fue calibrado con un estándar secundario de Clor-a y se utilizó como blanco la acetona al 90%. A este proceso se le conoce como ajuste máximo de sensibilidad, el límite de detección de la técnica (DLM) se encuentra determinado por 0.025 µg/L en 10 mL (Fig. 7).



Figura 7. Lectura fluorométrica: a) calibración mediante estándar secundario de clorofila "a", b) centrifugado de las muestras, c) medición del volumen extraído después de la centrifugación d) equipo de disoluciones para realizar lectura de fluorescencia (micropipetas y probetas), y TD 10 AU en función.

Trabajo de gabinete

Las lecturas de Clor-a medidas con el fluorómetro se convirtieron a unidades de $\mu\text{g/L}$ utilizando el algoritmo de la siguiente ecuación.

$$C_{S,u} = \frac{C_{E,u} \times EV \times FD}{V_m}$$

Donde:

$C_{S,u}$ = Concentración de Clor-a ($\mu\text{g/L}$) en toda la muestra de agua

$C_{E,u}$ = Concentración de Clor-a ($\mu\text{g/L}$) no corregida

EV = Volumen (L) de la extracción antes de ser diluida

FD = Factor de dilución

V_m = Volumen (L) de toda la muestra de agua.

Posteriormente se obtuvieron las medias, la desviación estándar (D.E) y el porcentaje relativo de D.E correspondiente.

Resultados

Por problemas ejidales no se nos permitió el acceso a San Lorenzo en el verano (2014) ni a Liquidambar en el invierno (2015), por lo que no se pudieron realizar los muestreos respectivos.

Parámetros físico-químicos

Temperatura, oxígeno disuelto y Zeu

De acuerdo a Moss *et al.* (1994), los lagos se pueden diferenciar en profundos y someros, en función de que puedan desarrollar una estratificación térmica estable o no lo cual está en gran medida determinado por su profundidad media siendo ésta de 3 m. En función de esta clasificación se tiene que los lagos profundos son: Ensueño, Patianú, Bosque Azul, San Lorenzo, La Encantada y Liquidambar, mientras que en los someros se encuentran Esmeralda, Chaj Chaj y Balantetic.

La temperatura (T) del agua en verano se registró en un intervalo de 17.8°C a 26°C con un promedio de $21.4 \pm 1.55^\circ\text{C}$. La temperatura máxima ($T_{\text{MÁX}}$) se obtuvo a nivel superficial en Liquidambar y San Lorenzo, mientras que la temperatura mínima ($T_{\text{MÍN}}$) se obtuvo en Bosque Azul en el fondo. En invierno el intervalo se registró entre 17.3°C y 20.7°C con un promedio de $18.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$. La $T_{\text{MÁX}}$ se obtuvo a nivel superficial en Balantetic, mientras que la $T_{\text{MÍN}}$ se registró en Patianú y San Lorenzo en el fondo (Fig. 8).

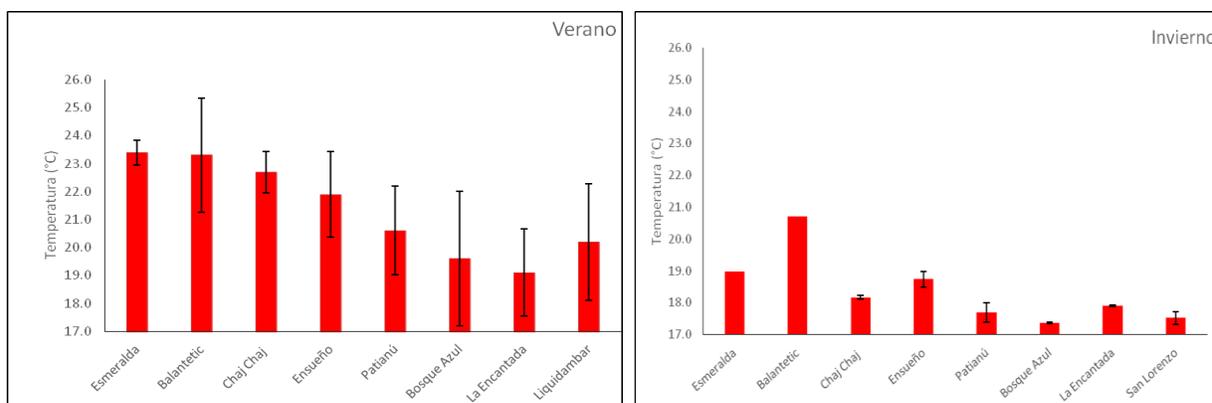


Figura 8. Temperatura promedio y d.e. durante el verano (2014) y el invierno (2015) en los lagos estudiados del PNLM.

La termoclina es la parte del perfil donde la temperatura cambia drásticamente conforme aumenta la profundidad (Horne y Goldman, 1994). Sin embargo, la diferencia de temperaturas es más reducida –pero igualmente efectiva- en los lagos tropicales (Lewis, 1996). Debido a lo anterior Kalff (2002) ha definido la termoclina en lagos tropicales como el intervalo de profundidad en el que el gradiente de temperatura es mayor que 0.1 ó $0.2^{\circ}\text{C m}^{-1}$.

En función de lo anterior los lagos profundos se encontraron estratificados térmicamente en el muestreo de verano; la mayor diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo (7.3°C) se encontró en Liquidambar, mientras que la mínima (3.8°C) se registró en Ensueño. Durante el invierno, difiriendo de lo esperado, San Lorenzo y La Encantada siguieron estratificados térmicamente. En el resto, la mayor diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo (0.8°C) se encontró en Ensueño, mientras que la mínima (0.01°C) se registró en Bosque Azul. Los lagos someros presentaron temperaturas homogéneas en toda la columna de agua en ambas épocas.

De acuerdo a lo anterior, se puede suponer que los lagos someros presentan un patrón térmico polimíctico cálido, mientras que los lagos profundos se caracterizaron como monomícticos cálidos.

La concentración de oxígeno disuelto (OD) en el agua de los lagos durante el verano se registró en un intervalo de 0 a 25.7 mg/L con un promedio de 3.82 ± 3.37 mg/L. La concentración máxima de oxígeno disuelto ($\text{OD}_{\text{MÁX}}$) se obtuvo en el epilimnion de San Lorenzo, mientras que la mínima ($\text{OD}_{\text{MÍN}}$) se presentó en el hipolimnion de todos los lagos. En invierno el intervalo se registró entre 0 y 18.2 mg/L con un promedio de 9.5 ± 0.7 mg/L. La $\text{OD}_{\text{MÁX}}$ se obtuvo en el epilimnion de Balantetic, mientras que la $\text{OD}_{\text{MÍN}}$ se midió en el hipolimnion de La Encantada y San Lorenzo (Fig. 9).

Durante el verano todos los lagos (profundos y someros) presentaron condiciones anóxicas en el hipolimnion, a excepción de Esmeralda, ya que además de ser un lago prístino es somero. En el invierno solo La Encantada y San

Lorenzo (lagos impactados) presentaron condiciones anóxicas, el resto de los lagos se encontraron oxigenados.

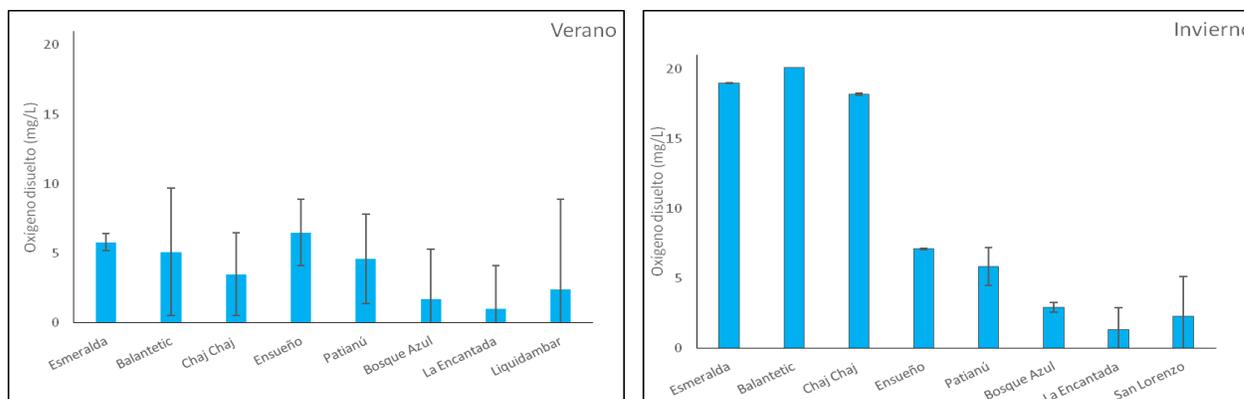


Figura 9. Concentración promedio de oxígeno disuelto y d.e. durante el verano (2014) y el invierno (2015) en los lagos estudiados del PNLM.

En general se observa una tendencia en los lagos hacia una mayor oxigenación de verano a invierno.

La Z_{eu} de los cuerpos acuáticos se registró durante el verano en un intervalo de 2 a 31 m. La Z_{eu} máxima se obtuvo en Ensueño, mientras que la Z_{eu} mínima se obtuvo en Chaj Chaj. En invierno se registraron valores entre 1.5 y 36 m. La Z_{eu} máxima se obtuvo nuevamente en Ensueño, pero esta vez abarcando toda la columna de agua, mientras que la Z_{eu} mínima se registró en Balantetic.

La Z_{eu} aumentó en los lagos profundos durante el invierno, mientras que en los someros tiende a la reducción de ésta.

Lagos prístinos-profundos

Durante el verano Ensueño y Patianú, -lagos prístinos y profundos-, se encontraron térmicamente estratificados. El OD mostró un perfil ortogrado, presentando condiciones anóxicas desde los 33 y 14 m de profundidad respectivamente y hasta el fondo. En invierno, ambos lagos estaban circulando involucrando toda la columna de agua –holomixis-, Ensueño muestra una columna de agua más homogénea y oxigenada en comparación con Patianú el cual presentó una ligera termoclina (Fig. 10).

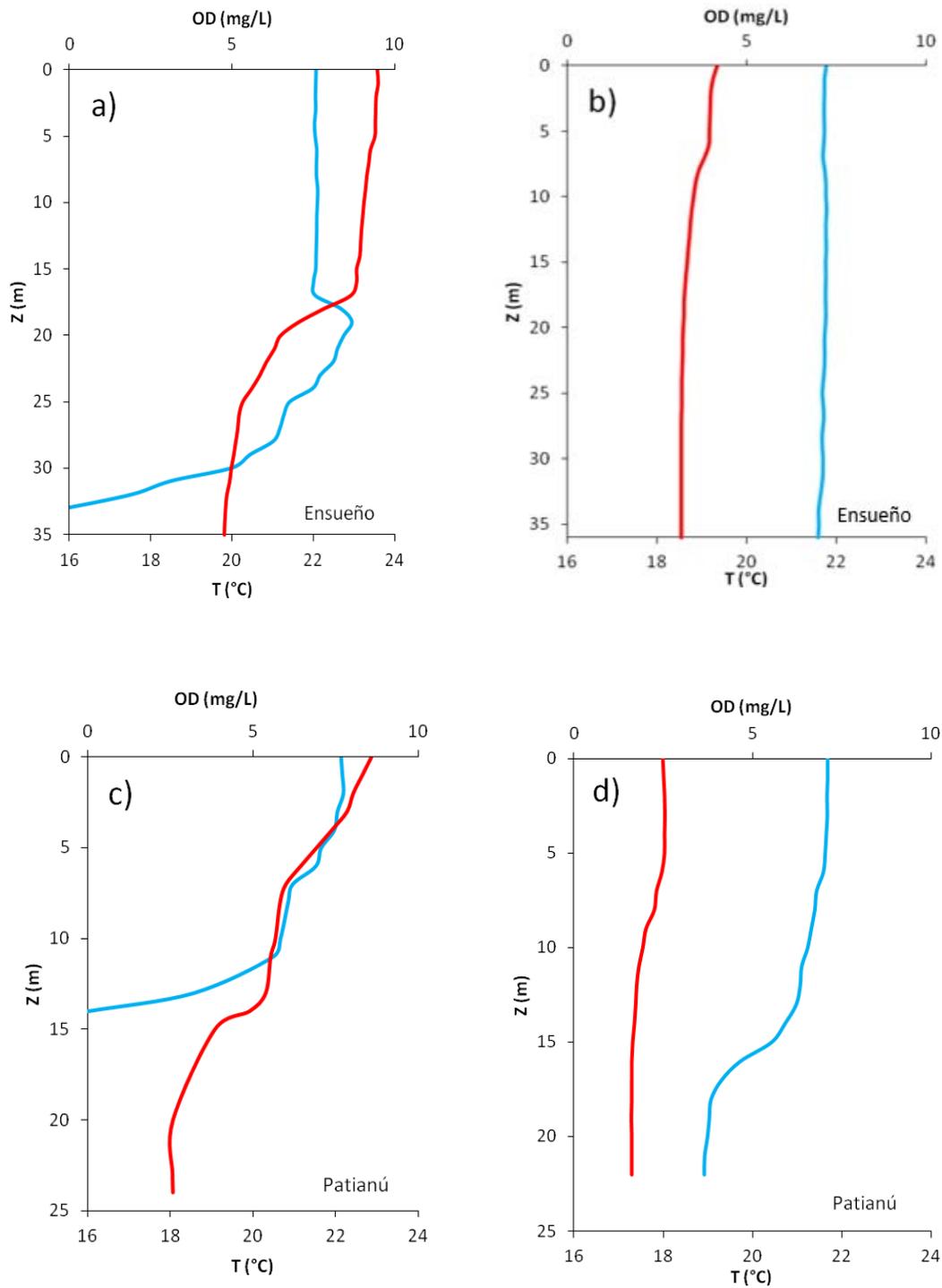
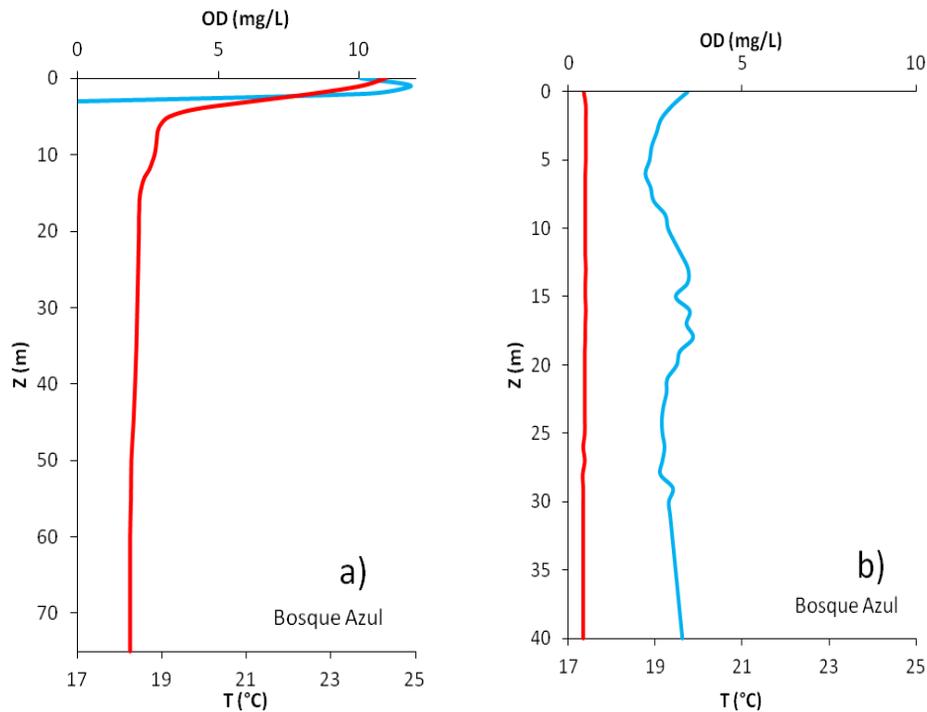


Figura 10. Perfiles verticales de temperatura (línea roja) y oxígeno disuelto (línea azul) en los lagos prístinos-profundos: Ensueño: a) y b), Patianú c) y d) durante el verano (lado izquierdo) y el invierno (lado derecho).

Lagos impactados-profundos

Durante el verano Bosque Azul y La Encantada se encontraron térmicamente estratificados. El OD mostró un perfil clinogrado, presentando condiciones anóxicas a partir de los 6 y 3 m de profundidad, respectivamente, y hasta el fondo. Tanto Bosque Azul, como La Encantada, presentaron concentraciones de OD semejantes. En invierno Bosque Azul se encontró circulando, mientras que La Encantada parece que estaba aún estratificado, ya que a pesar de que el perfil térmico era homotérmico, se encontraron condiciones anóxicas en el hipolimnion a partir de los 44 m de profundidad. Bosque Azul muestra una columna de agua más homogénea y oxigenada en comparación con La Encantada (Fig.11).



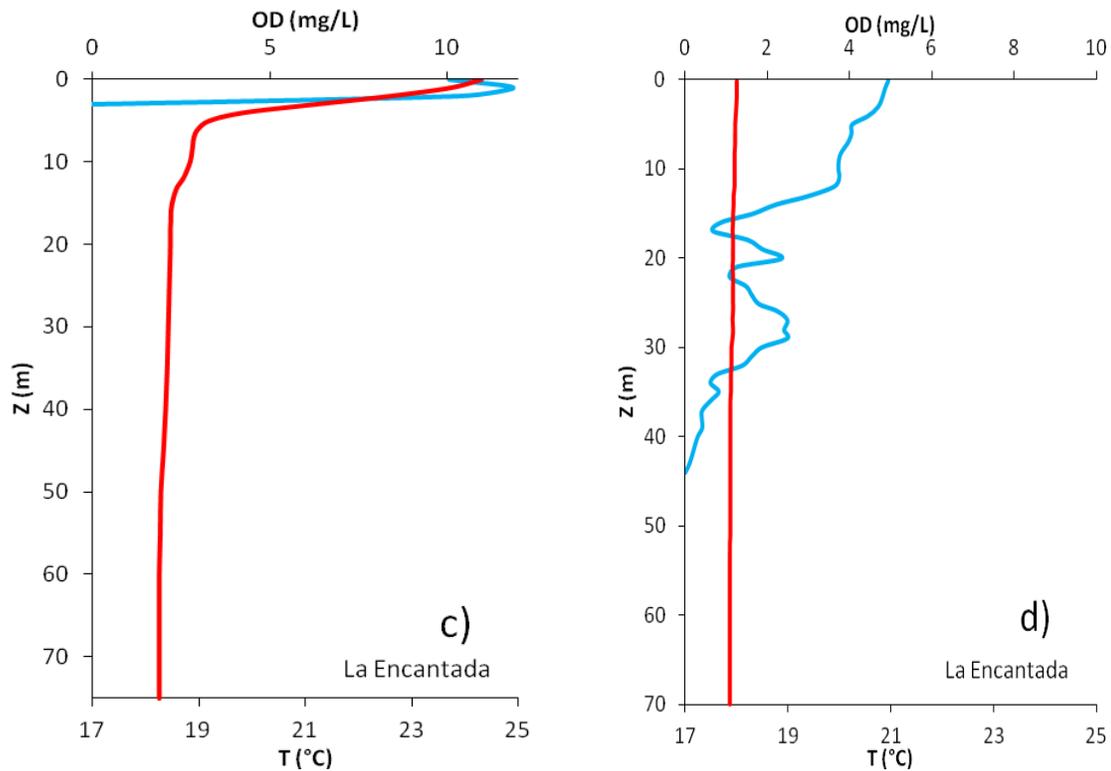


Figura 11. Perfiles verticales de temperatura (línea roja) y oxígeno disuelto (línea azul) en los lagos impactados-profundos: Bosque Azul: a) y b), La Encantada: c) y d), durante el verano (lado izquierdo) y el invierno (lado derecho).

Tanto los lagos prístinos como impactados profundos se encontraron estratificados y con hipolimnion anóxico durante el verano; en los perfiles de temperatura varía la posición de la termoclina registrándose un nivel más superficial en los impactados.

Liquidambar se encontró térmicamente estratificado durante el verano y en San Lorenzo se presentó una ligera termoclina en invierno, ratificando la estratificación por la presencia de una oxiclina. El OD mostró un perfil clinogrado presentando condiciones anóxicas a los 3 y 11 m de profundidad respectivamente. La capa de mezcla (epilimnion) en Liquidambar abarca 3 m de profundidad, mientras que en San Lorenzo es más amplia (11 m). A pesar de encontrarse en invierno y que San Lorenzo muestra un perfil de temperatura casi homogéneo, no se encuentra mezclado aún como lo demuestra las condiciones anóxicas en el hipolimnion (Fig. 12).

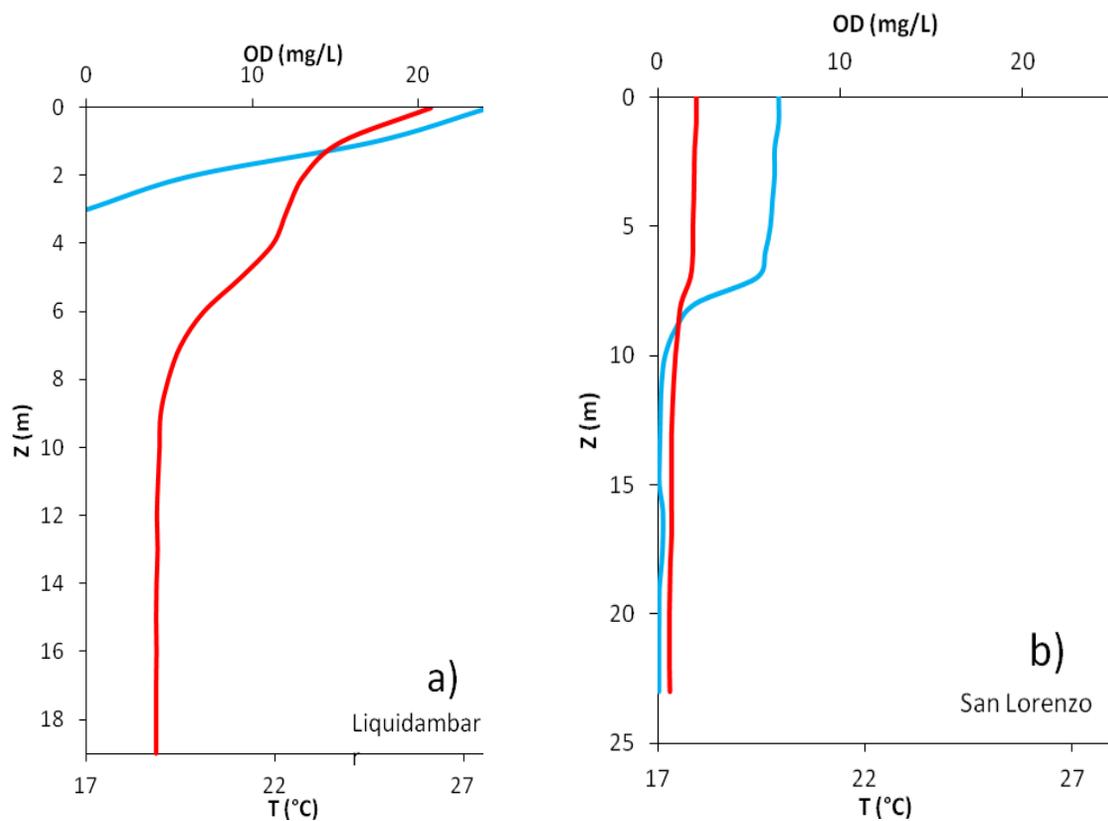


Figura 12. Perfiles verticales de temperatura (línea roja) y oxígeno disuelto (línea azul) en los lagos impactados-profundos: Liquidambar: a), durante el verano y San Lorenzo: b), en el invierno.

Lagos prístinos-someros

Esmeralda presentó una ligera termoclina durante el verano y una columna de agua térmicamente homogénea en invierno. El OD mostró un perfil ortogrado. En ambas épocas se encontró mezclado, pero durante el invierno presentó una mayor oxigenación y menor temperatura (Fig. 13).

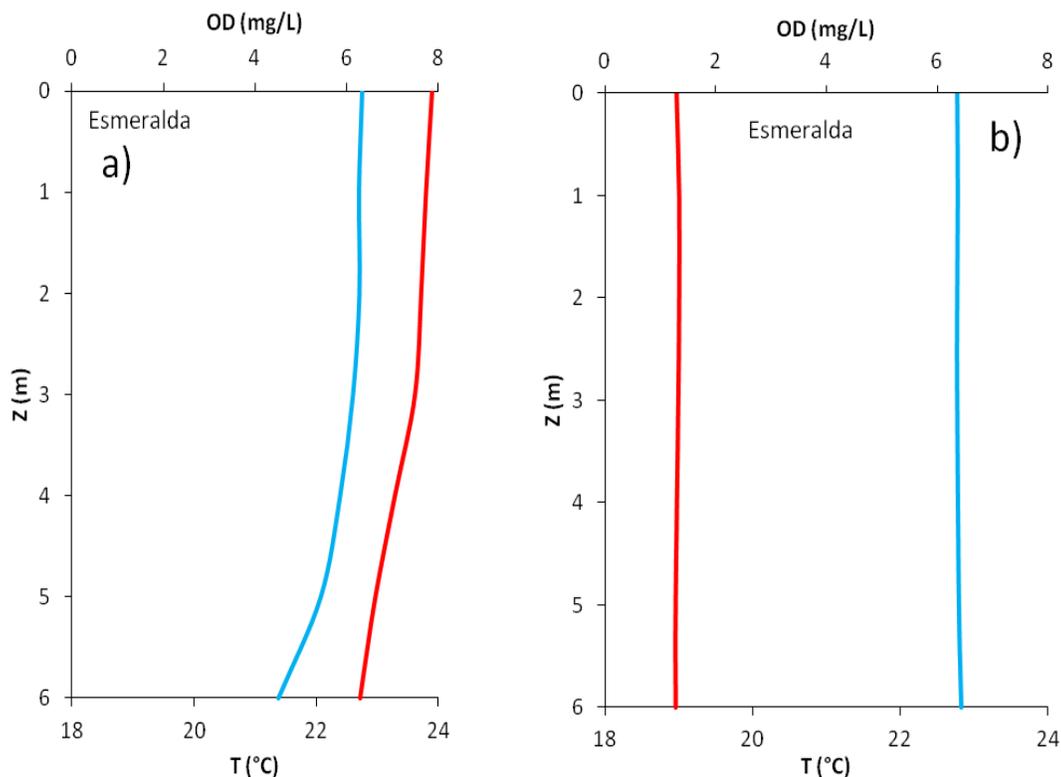


Figura 13. Perfiles verticales de temperatura (línea roja) y oxígeno disuelto (línea azul) en el lago pristino-somero: Esmeralda a) durante el verano y b) para el invierno.

Lagos impactados-someros

Durante el verano Balantetic y Chaj Chaj presentaron una ligera termoclina, de manera contraria en invierno durante el cual presentan una columna de agua térmicamente homogénea. El OD mostró un perfil clinogrado, presentando condiciones anóxicas a los 3 y 5 m de profundidad, respectivamente. Balantetic presentó mayores concentraciones de OD que Chaj Chaj. En invierno ambos lagos estaban circulando, Balantetic registrando mayor oxigenación (Fig. 14).

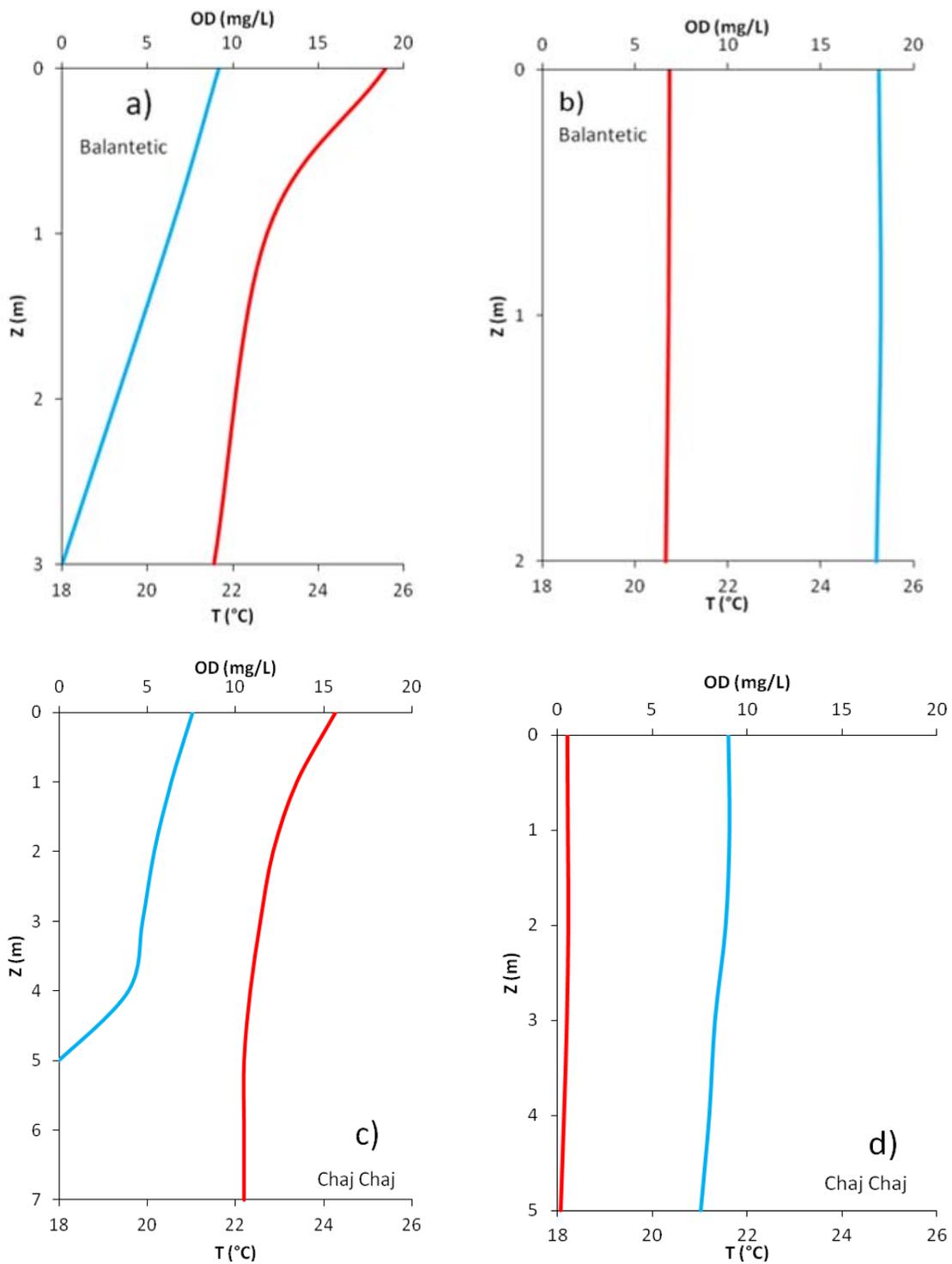


Figura 14. Perfiles verticales de temperatura (línea roja) y oxígeno disuelto (línea azul) en los lagos impactados-profundos: Balantetic: a) y b), Chaj Chaj: c) y d), durante el verano (lado izquierdo) y el invierno (lado derecho).

De acuerdo a la clasificación propuesta por Wetzel (2001) los lagos estudiados se clasificaron en lagos ortogradados, los cuales presentan una baja actividad fotosintética, baja productividad, la distribución de oxígeno varía en función de la temperatura, tal es el caso de Ensueño, Patianú y Esmeralda. Los lagos clinogradados que presentan un contenido relativamente mayor de oxígeno cerca de la superficie, donde se desarrolla la actividad fotosintética, se observa en cuerpos de agua estratificados, con una alta productividad, se produce una gran reducción de oxígeno en el hipolimnion, resultado de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica generada por los fototrofos, tal es el caso de Bosque Azul, Balantetic, La Encantada, Chaj Chaj, San Lorenzo y Liquidambar.

Biomasa fitoplanctónica

La concentración de clorofila “a” (Clor-a) para el verano de 2014 varió de 0.18 a 45.73 µg/L. La concentración máxima se obtuvo a nivel superficial en Liquidambar, mientras que la mínima se obtuvo en Ensueño a nivel superficial. En invierno de 2015 se registró entre 0.41 y 148.4 µg/L. La concentración máxima se obtuvo en Balantetic a 1 m, mientras que la mínima se obtuvo nuevamente en Ensueño a nivel superficial (Tabla 2).

Tabla 2. Concentraciones mínimas y máximas, promedio (\bar{X}) y desviación estándar (D.E.) de clorofila “a” en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM. (Z_{MÁX}= profundidad máxima). [Zona eufótica (Zeu) * = toda la columna de agua].

Clasificación	Lago	Z _{MÁX} (m)	Z _{eu} (m)		Clorofila-a (µg/L)							
					2014				2015			
			2014	2015	Mín	Máx	\bar{X}	D.E	Mín	Máx	\bar{X}	D.E
Pristinos-Profundos	Ensueño	35	31	36.0*	0.18	0.44	0.28	±0.12	0.41	0.83	0.58	±0.18
	Patianú	26	13	17.5	0.38	4.24	1.31	±1.64	0.61	1.09	0.87	±0.18
Impactados-profundos	Bosque Azul	58	2.5	4.5	1.64	25.98	14.79	±9.47	37.43	56.74	46.86	±7.73
	La Encantada	89	3.5	5	0.92	16.67	8.23	±6.69	22.09	70.04	38.86	±18.38
	Liquidambar	24	3	-	3.63	45.73	15.25	±20.39	-	-	-	-
	San Lorenzo	67	-	2.5	-	-	-	-	25.06	76.92	49.77	±25.08
Pristinos-someros	Esmeralda	7	7.0*	3	0.34	0.34	0.34	±0.03	1.07	1.07	1.07	±0.01
Impactados-someros	Balantetic	3	2.1	1.5	42.09	42.09	42.09	±5.94	148.4	148.4	148.4	±14.2
	Chaj Chaj	12	2	2.1	13.73	13.73	13.73	±9.47	111.24	111.24	111.24	±5.24

De acuerdo a la clasificación trófica propuesta por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982), los lagos ultra-oligotróficos se caracterizan por bajas concentraciones de Clor-a, las que oscilan entre 1.0 y 2.5 µg/L (Tabla 3). El valor utilizado para la clasificación trófica de los lagos fue el promedio superficial de Clor-a.

Con base en lo anterior, tres de los nueve lagos se clasifican como ultra-oligotróficos: Ensueño, Patianú y Esmeralda. De los cinco lagos restantes, Liquidambar se clasificó como eutrófico, mientras que San Lorenzo fue hipereutrófico. Los demás lagos (todos impactados), presentaron variaciones elevadas en la concentración de Clor-a de un periodo de muestreo con respecto al otro, clasificándose en dos estados tróficos diferentes, tal es el caso de Bosque Azul que en verano se clasifica como mesotrófico y en invierno como eutrófico, Chaj Chaj mesotrófico-hipereutrófico, La Encantada mesotrófico-eutrófico y Balantetic eutrófico-hipereutrófico respectivamente.

Tabla 3. Concentración de Clor-a para la determinación del estado trófico en un cuerpo acuático según la OCDE (1982).

Estado trófico	Clor-a (µg/L)
Ultra-oligotrófico	< 1.0 - < 2.5
Oligotrófico	< 2.5 - < 8.0
Mesotrófico	8 – 25
Eutrófico	25 – 75
Hipereutrófico	> 25 - > 75

Distribución de Clor-a en la columna de agua

Los lagos prístinos mostraron un máximo profundo de clorofila (DCM por sus siglas en inglés), característico de las aguas oligotróficas, marinas y epicontinentales, como es el caso de Patianú. Por otro lado, en los lagos impactados, la distribución vertical de la Clor-a mostró un patrón con la máxima concentración cerca de la superficie y disminuyendo rápidamente en profundidad, característico de los lagos eutróficos.

Lagos prístinos-profundos

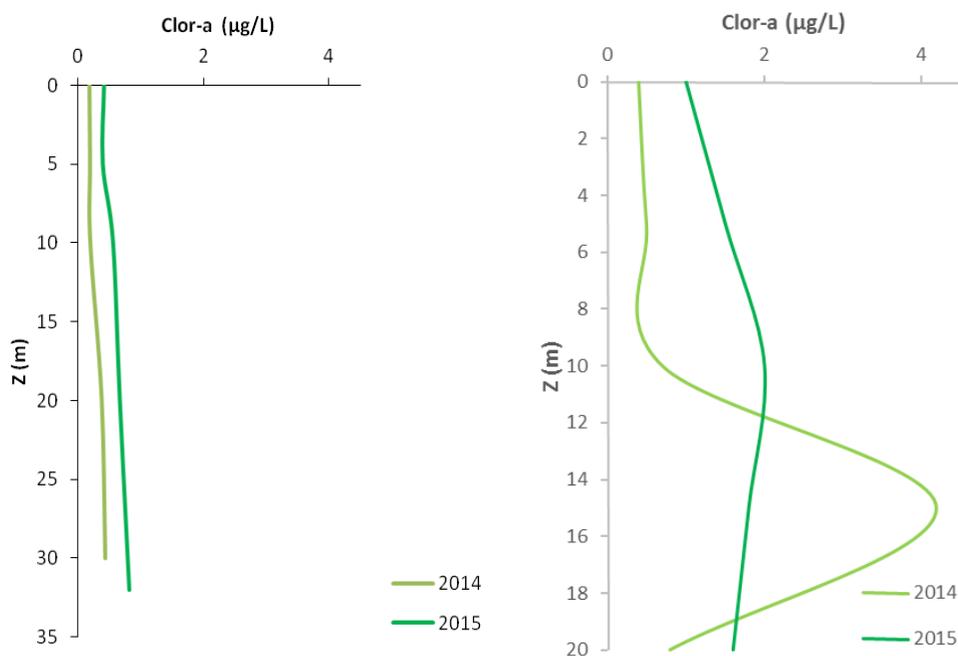


Figura 15. Distribución vertical de la Clor-a en Ensueño (izquierda) y Patianú (derecha).

Ensueño: en verano las concentraciones de Clor-a en la columna de agua presentaron valores de 0.18 µg/L registrado en la superficie y la máxima concentración obtenida a la profundidad de 30 m con 0.44 µg/L. En el invierno se registraron concentraciones de 0.43 µg/L en superficie, llegando a la concentración máxima de 0.83 µg/L a los 32 metros de profundidad.

Patianú: en verano las concentraciones de Clor-a en la columna de agua presentaron valores desde 0.38 µg/L registrado en la superficie y la máxima concentración obtenida a la profundidad de 15 m con 4.24 µg/L, a partir de este punto las concentraciones disminuyen en profundidad hasta los 30 m con un valor registrado de 0.78 µg/L. En el invierno se registraron concentraciones de 0.88 µg/L en superficie, llegando a la concentración máxima de 1.09 µg/L a 10 m de profundidad, a partir de este punto las concentraciones disminuyen en profundidad hasta los 20 m con un valor de 0.61 µg/L.

Para estos lagos las concentraciones aumentaron en profundidad en las dos épocas con la formación de un DCM en el lago Patianú durante el 2014 (Fig. 15).

Lagos impactados-profundos

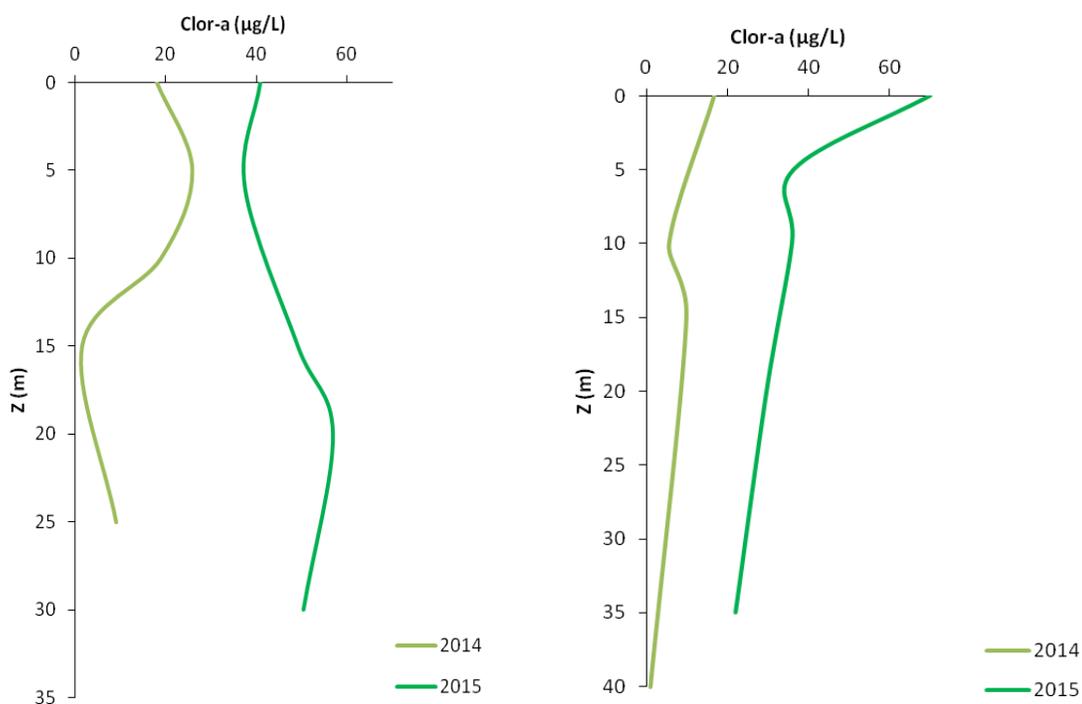


Figura 16. Concentración y distribución vertical de la Clor-a en Bosque Azul (izquierda) y La Encantada (derecha)

Bosque Azul: en verano las concentraciones de Clor-a en la columna de agua presentaron valores desde 1.6 µg/L registrado en una profundidad de 15 m, aumentando en profundidad hasta una concentración de 9.18 µg/L a los 25 m, a nivel superficial la concentración fue de 18.10 µg/L y la concentración máxima de 25.98 µg/L se obtuvo a una profundidad de 5 m. En el invierno se presentaron valores más altos que en el periodo anterior; las concentraciones registradas se encuentran desde 37.4 µg/L a 6 m, aumentando en profundidad hasta una concentración de 50.3 µg/L cerca del fondo del lago; a nivel superficial la concentración fue de 40.8 µg/L y la concentración máxima de 56.7 µg/L se obtuvo a una profundidad de 20 m.

La Encantada: en verano las concentraciones de Clor-a en la columna de agua presentaron concentraciones de 0.92 a 16.67 a $\mu\text{g/L}$, disminuyendo en profundidad. En el invierno se registraron concentraciones de 22.09 a 70.04 a $\mu\text{g/L}$ disminuyendo en profundidad (Fig. 16).

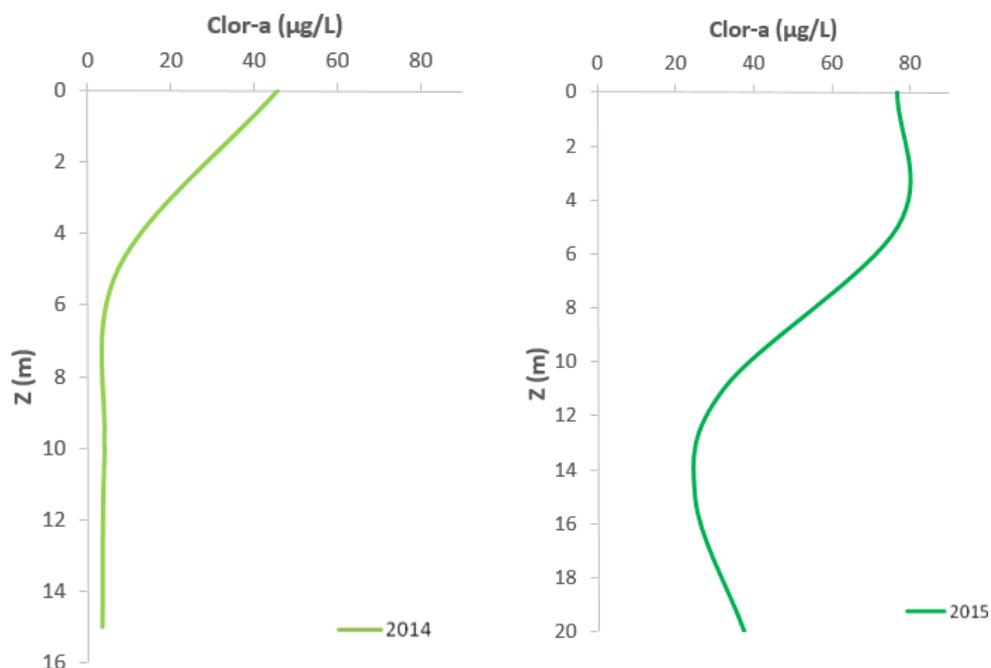


Figura 17. Distribución vertical de la Clor-a en Liquidambar (izquierda) y San Lorenzo (derecha).

San Lorenzo: en invierno se registraron concentraciones de Clor-a en la columna de agua, con valores desde 25.06 $\mu\text{g/L}$ a 15 m, aumentando en profundidad hasta los 37.7 $\mu\text{g/L}$, la concentración máxima se registró en superficie con un valor de 76.7 $\mu\text{g/L}$.

Liquidambar: en verano las concentraciones de Clor-a en la columna de agua presentaron valores desde 3.6 $\mu\text{g/L}$ en la zona más profunda, hasta los 45.7 $\mu\text{g/L}$ a nivel superficial.

En los dos lagos anteriores las concentraciones de Clor-a disminuyen en profundidad, pero en San Lorenzo se incrementa la concentración en la capa más profunda (Fig. 17)

Lagos prístinos-someros

Esmeralda: en verano la concentración de Clor-a en la columna de agua presentó un valor de 0.34 µg/L a una profundidad de 3 m y para el invierno se registró una concentración de 1.07 µg/L a una profundidad de un metro.

Lagos impactados-someros

Chaj Chaj: en verano la concentración de Clor-a en la columna de agua presentó un valor de 13.73 µg/L a una profundidad de 3 m y para el invierno se registró una concentración de 111.24 µg/L a una profundidad de un metro.

Balantetic: en verano la concentración de Clor-a en la columna de agua presentó un valor de 42.09 µg/L a nivel de superficie y para el invierno se registró una concentración de 148.4 µg/L a una profundidad de un metro.

Discusión

Cuatro de los nueve lagos se estratificaron térmicamente durante el verano; la profundidad de la termoclina se situó a nivel más superficial en los impactados y más profunda en los prístinos. De acuerdo con Talling (1993), se esperaba que para la temporada de estudio (verano), los lagos se encontraran estratificados tal y como se encontró en la mayoría de los profundos. En el caso de los lagos someros, tales como Esmeralda y Balantetic no se estratificaron. De la misma manera, en el invierno la columna de agua se mezcló en la mayoría de los lagos. Algunos lagos, aunque mostraron una columna homoterma indicando que tenían condiciones para mezclarse, aún no había iniciado la mezcla como lo mostró el perfil de oxígeno con anoxia en el fondo.

Se reconocieron diferencias en los perfiles de temperatura y OD entre lagos prístinos e impactados, pues los primeros muestran una termoclina profunda y amplia, mientras que en los impactados es estrecha y es más superficial.

Mientras que la temperatura del hipolimnion en lagos de regiones templadas oscila entre 4 y 6°C, en regiones tropicales estas temperaturas generalmente son mayores de 15°C. Lewis (2006) afirma que el desarrollo de un hipolimnion anóxico es más común en lagos tropicales debido a que presentan temperaturas hipolimnéticas más elevadas ocasionando descomposición de materia orgánica en el fondo (consumo de oxígeno), y, por ello, la cantidad de oxígeno que pueden mantener en disolución es menor, aunado a que las tasas metabólicas microbianas pueden ser desde cuatro a nueve veces más elevadas en comparación con la de los lagos templados. Por lo anterior los lagos PNLM presentaron déficit de oxígeno independientemente del nivel trófico como lo menciona Esteves (1998) para los lagos tropicales.

Por otro lado, los lagos someros del PNLM (tanto impactados como prístinos) se clasificaron como polimícticos cálidos ya que se encontraron circulando tanto en verano como en invierno.

Hutchinson y Loffler (1956) propusieron una clasificación de los lagos basada en sus patrones de circulación la cual fue modificada posteriormente por Lewis (1983). Los monomícticos cálidos son aquellos en donde la estratificación térmica es estable la mayor parte del año y se mezclan una vez por año, cumpliendo con estas características la mayoría de los lagos profundos, tanto impactados como prístinos, siendo estos: Ensueño, Patianú, Bosque Azul y La Encantada. Dentro de esta clasificación se localizan también los lagos tropicales de altura, como el Titicaca a 4,000 m s.n.m. y algunos de baja altitud como el Valencia en Venezuela (Sánchez *et al*, 2007).

Los dos patrones de mezcla mencionados, monomixis cálida y polimixis cálida, coinciden con lo mencionado por Lewis (2000) para zonas tropicales, así como por Alcocer *et al*. (2000) para los lagos mexicanos. Ejemplos de otros monomícticos cálidos son Alchichica en Puebla, el Cenote Azul de Quintana Roo

(Cervantes *et al.*, 2009) y el lago Cráter La Alberca de Tacámbaro en Michoacán (Hernández *et al.*, 2011).

Durante el verano todos los lagos presentaron hipolimnion anóxico, excepto Esmeralda que por ser el único somero y prístino se encontró circulando, pues los lagos someros impactados presentaban una ligera termoclina. En invierno la mayoría de los lagos presentó circulación, a excepción de San Lorenzo y La Encantada. Estos lagos, como se mencionó arriba, mostraron un perfil homotermo, pero permanecen anóxicos en el fondo, lo que pudiera sugerir que requerían más tiempo para comenzar a circular ya que las condiciones de temperatura eran propicias restando solamente, el agente forzante, esto es el viento.

Por otro lado, los lagos prístinos tanto someros como profundos presentaron un perfil de distribución de OD ortogrado, mientras que los lagos que presentaron curvas de distribución de tipo clinogradas son los lagos impactados tanto someros como profundos. La oxiclina es ancha y profunda en los prístinos mientras que en los impactados es estrecha y superficial, propiciando un hipolimnion muy amplio y anóxico.

El incremento de oxígeno disuelto en las capas superficiales medido durante el invierno seguramente está vinculado a las menores temperaturas registradas que pueden disolver más oxígeno, a que hay mayor turbulencia o a un incremento en la actividad fotosintética, propiciada por el aporte de nutrientes durante la circulación y que es apoyado por un aumento en la concentración de Clor-a. Estos aumentos en la concentración de Clor-a invernales son típicos en los lagos profundos tropicales y generalmente se localizan en los primeros metros, es decir, la zona iluminada, alcanzando los valores máximos superficiales de concentración de Clor-a, también puede encontrarse el fitoplancton concentrado en los distintos niveles de la columna de agua, no solo en la zona productiva (sector de la columna de agua en el que hay mayor concentración de nutrientes y de fitoplancton), propiciado por la circulación del lago.

Los florecimientos asociados a la época de mezcla en los lagos tropicales, son frecuente como en el Victoria (Talling, 1993), el Valencia (Lewis, 1986) y Alchichica (Alcocer *et al.*, 2000).

De acuerdo a los estudios realizados en el PNLM por Almeida (2014), se encontró que la diatomea central *Stephanocyclus* se encuentra en la mayoría de los lagos con elevada frecuencia, por tal motivo es de esperarse que esta especie sea la que florezca. Lewis (1987) menciona que es factible que las diatomeas tengan crecimiento máximo en condiciones de baja intensidad luminosa y alta concentración de nutrimentos, es decir justo las condiciones durante la época de circulación invernal.

La zona eufótica (Z_{eu}) disminuye durante la época de mezcla en algunos lagos, por ejemplo, en el Lago Valencia, la disminución es tal que rara vez se encuentra por debajo de los 6 m, por lo que no se puede desarrollar el fitoplancton, de esta manera la turbidez presentada es de origen terrígena (Lewis, 1986). La mayoría de los lagos presentaron turbidez biogénica, pero en los lagos someros tanto prístinos como impactados, hubo una disminución de la Z_{eu} , sin embargo, en los lagos profundos se presentó un comportamiento contrario a los del Lago Valencia, pues la Z_{eu} tiende a una disminución más severa, posiblemente por el ingreso de materiales del suelo o remoción del mismo sedimento. Además, la Z_{eu} aumentó durante la época de circulación, presentando una zona más amplia para llevar a cabo el proceso fotosintético y coincidiendo con las altas concentraciones fitoplanctónicas (aumento en la densidad de población).

De acuerdo a los estudios realizados por Ardiles *et al.* (2012), se concluye que el lago Alchichica presenta una Z_{eu} más angosta en el periodo de circulación, mientras que el grosor es mayor durante la estratificación, promediando 22 ± 4 m y fluctuando entre los 14 y 36 m. También mostró un comportamiento cíclico, pues se reconoce una fase de aguas turbias durante el periodo de circulación (16.1 ± 1.2 m) y una fase de aguas claras durante el periodo de estratificación (23.8 ± 3.5 m). Los lagos profundos del PNLM podrían presentar un comportamiento semejante al reportado en el lago Alchichica.

La variación en el grosor de la *Zeu* se debe probablemente a que tiene menores valores durante la estratificación asociado a los florecimientos superficiales que impiden la penetración de luz en los lagos impactados, mientras que en los prístinos la *Zeu* puede llegar a abarcar toda la columna de agua, como es el caso de Esmeralda, que tiende a disminuir en el invierno, probablemente debido a la turbidez biogénica por el aumento del fitoplancton coincidiendo con la liberación de nutrientes durante la circulación.

Los picos de Clor-a encontrados en los lagos del PNLM se pueden relacionar, a nivel superficial probablemente por el florecimiento mencionado durante la época de circulación, mientras que otros picos se ubican a profundidad y responden a la formación de máximos profundos de Clor-a que se desarrollan en el lago prístino profundo de Patianú durante el verano. Por otro lado, los lagos impactados presentan picos superficiales o sub-superficiales, lugar donde existe mayor disponibilidad de luz, factor indispensable para el metabolismo del fitoplancton y por lo tanto un incremento superficial en la Clor-a.

El DCM hace referencia a la concentración máxima de clorofila que es registrada en el metalimnion o en tope del hipolimnion (Gasol *et al.*, 1992).

La presencia de DCM es un rasgo típico de los sistemas acuáticos oligotróficos tanto marinos como epicontinentales. Se observó un DCM en el lago prístino-profundo: Patianú.

Lo anterior coincide con el estudio realizado por Alcocer *et al* (2000), en el cual ratifican las características oligotróficas del lago Alchichica, Puebla, con base en diferentes indicadores, uno de ellos la presencia constante de un DCM.

La presencia de un DCM es común en lagos oligotróficos con una *Zeu* que llega hasta el metalimnion y en donde se acumula el fitoplancton (Gervais *et al.*, 1997). Se necesitan realizar más estudios para reportar a lo largo de un año cuando aparece y desaparece, teniendo patrones similares como el presentado en el lago Kinneret, que presenta un DCM posterior a la época de circulación (Berman *et al.*, 1995) “típico de los lagos tropicales y subtropicales” donde el factor de incremento de nutrientes es producto de la mezcla es predominante (Talling,

1993) o presenta más de uno como el caso de Alchichica el cual tiene tres picos de concentración a lo largo de un año (González, 2013).

Diversos sistemas kársticos muestran diferentes concentraciones de Clor-a con estados tróficos que varían desde los ultraoligotróficos hasta los hipereutróficos producto de la contaminación (Tabla 4).

Tabla 4. Concentraciones de Clor-a ($\mu\text{g/L}$) y parámetros físico-químicos reportados para diversos lagos kársticos. (Z = profundidad (m), Som. = lago somero, OD = oxígeno disuelto (mg/L), T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Oli = oligotrófico, Mes = mesotrófico, Eu = eutrófico, Hip= hipereutrófico).

Lago	Ubicación	Coordenadas	Z	Clor-a	OD	T	pH	Estado trófico	Autor
Cenote Azul	Q. Roo, México.	18°38'48''N 88°24'42''W	65.0	0.005- 1.79	6.1 ± 0.9	29.2 ± 0.9	8 – 7.4	Oli	Cervantes <i>et al.</i> , 2009
Albufera	Valencia, España.	39°20'N 0°20'W	1.2	159 ± 14 266 ± 20	-	18.9-19.4	8.7-8.9	Eu	Romo <i>et al.</i> , 2008
Lagunas de las Pampas	Pampa, Argentina	36°37'00''S 64°17'00''W	Som.	250	-	-	-	Eu-Hip	Quirós, 2005
Laguna del Tejo	Las Torcas de Cañada, España	39°59'20''N 1°52'37''E	28.0	2-12	12- 0	6.3-24	8.5-9.1	Oli-Mes	Morata <i>et al.</i> , 1998
Montcortés	Lérida, España.	42°19'50''N 0°59'46''E	30.0	0.4-19.7	0.0-11.3	5.5-23.9	7-8.5	Oli-Mes	Camps <i>et al.</i> , 1976
Banyoles	Bañolas, España.	42°07'31''N 2°45'19''E	62.5	426	0-¿?	6.1-23.1	6.2-9.4	Hip	Borrego y García, 1992 ;Planas, 1990
Delta Llobregat	Catalonia, España.	41°25'N 1°58'-2°10'E	7.5	355	-	-	7.5-8.4	Mes-Hip	Catalán, 1984; Cañedo y Rideradeval, 2009
Conde de Guadhorce	Málaga , España	36°39'58'' N 4°27'18'' O	37.0	<10	-	11-21.1	-	Mes	Armengol <i>et al.</i> , 1990
Guadhorce	, Málaga , España	36°39'58'' N 4°27'18'' O	58.0	>10	-	11-22.3	-	Eu	Armengol <i>et al.</i> , 1990
Guadalteba	Málaga , España	36°39'58'' N 4°27'18'' O	58.0	290	-	11-22.2	-	Eu	Armengol <i>et al.</i> , 1990

Armengol *et al.* (1990) estudiaron la distribución vertical de clorofila en tres lagos de Málaga, España. En el Conde Guadalhorce, encontraron una distribución uniforme, lo anterior debido a la poca profundidad que presenta y que casi todo el perfil se encontró mezclado, incluso en verano, lo que impidió la pérdida de fitoplancton de la zona fótica, se clasificó como mesotrófico. Por otra parte, los lagos de Guadalhorce y Guadalteba pueden ser considerados como

eutróficos por poseer una gran cantidad de biomasa fitoplanctónica y presentan una circulación completa. Estos lagos tienen un comportamiento parecido a impactados y someros del PNLM, pues presentan un estado mesotrófico y eutrófico debido a la concentración elevada y uniforme de Clor-a en la vertical.

Morata *et al.* (1998) realizaron estudios de concentración de Clor-a en la laguna del Tejo, España. Los resultados fueron concentraciones relativamente bajas y homogéneas en toda la columna durante la época invernal para los lagos no impactados o limpios y presentó un marcado máximo invernal en la mayor parte del perfil vertical. Durante los periodos de estratificación, en cambio, los valores fueron mínimos en el epilimnion pero se localizó un máximo profundo debido mayoritariamente a una densa población, este comportamiento es parecido al que presentan los lagos prístinos, tanto someros como profundos, pues las concentraciones de Clor-a fueron bajas en toda la vertical, mientras que en el verano (periodo de estratificación) presentan un DCM como es el caso de Patianú.

Quirós (2005) realizó un estudio sobre el Sistema Lagunar de Pampaneas, describiendo que una típica laguna pampaneas en estado cuasi prístino se caracteriza por alta transparencia de sus aguas, lo que permite que la luz solar llegue al fondo y éste se encuentre colonizado por macrófitas enraizadas y la comunidad de peces sea relativamente menos abundante, pero más diversa. Por el contrario, una laguna pampaneas impactada por altas entradas de nutrientes provenientes de las actividades agropecuarias y la urbanización, se caracteriza por una alta abundancia del fitoplancton y con sedimentos comúnmente anóxicos en gran parte de su extensión. El Sistema Lagunar de Pampaneas es muy parecido al sistema del PNLM, debido a la amplia gama de cuerpos lénticos que presenta y a sus diversas características, como son, lagos tanto profundos como someros, impactados o prístinos, presencia o ausencia de anoxia en el hipolimnion, entre otras.

En el complejo lacustre kárstico de Banyoles, la laguna Coromina ($Z_{MÁX}= 5$ m) clasificada como hipereutrófica presenta una distribución de oxígeno disuelto característica de estos sistemas a lo largo de un ciclo anual con

fluctuaciones extremas que van desde periodos de sobresaturación y otros con condiciones anoxicas a partir de 3 metros de profundidad y hasta el fondo (Barica, 1980, Camps *et al.*, 1976; Sellers y Markland, 1987; Borrego y García, 1992). Este fenómeno se presenta en algunos lagos del PNLM, como el caso de Liquidambar y Balantetic registrando 12.61 mg/L hasta 0 mg/L a los 3 m de profundidad. A pesar de estas semejanzas, La Coromina es un lago templado, mientras que los lagos del PNLM son tropicales. Los lagos impactados del PNLM (eutróficos e hipereutrófico) presentan sobresaturación en la capa superficial, propiciada por la gran cantidad de biomasa fitoplanctónica presente a niveles superficiales.

Por último, la concentración de Clor-a en el agua que es proporcional a la biomasa algal presente permitió obtener las diferentes categorías en los estados tróficos de los lagos, obteniendo una mayor proporción de lagos eutrófico (siete de nueve). Por lo tanto, la mayoría de los lagos tienen un “enriquecimiento” de aguas superficiales con nutrientes lo que favorece la producción primaria de sus aguas. La eutrofización se produce de forma natural, pero cuando está asociada a fuentes antropogénicas, por ejemplo, en la agricultura, la aplicación de fertilizantes y plaguicidas aceleran el proceso incidiendo sobre el crecimiento desmedido de microorganismos acuáticos.

Conclusiones.

- Los resultados de este estudio mostraron que el cambio en la coloración de los lagos Bosque Azul, La Encantada, Liquidámbar, Balantetic y Chaj Chaj se debió al aumento en la concentración de su biomasa fitoplanctónica y por ende el estado trófico presentado.
- De acuerdo a la concentración de Clor-a obtenida en dos colectas, se pueden dividir como lagos prístinos a Ensueño, Esmeralda y Patianú, mientras que los impactados son Chaj Chaj, Balantetic, Bosque Azul, Liquidambar, La Encantada y San Lorenzo.
- La distribución vertical de Clor-a mostró 2 patrones en la estratificación: a) la presencia de un máximo profundo de clorofila en un lago prístino y b) un máximo superficial o sub-superficial de Clor-a seguido de su disminución conforme se profundiza en la columna de agua en los lagos impactados. Durante la circulación la Clor-a se distribuye de forma aproximadamente homogénea en la columna, pero sin un patrón definido.
- De acuerdo a los criterios de la OCDE, el estado trófico de los lagos prístinos, tanto someros como profundos del PNLM son ultraoligotróficos, mientras que los lagos impactados tanto someros como profundos resultan mesotróficos, eutróficos o hipereutróficos. Cuatro de los nueve lagos, todos impactados, se encontraron en estados tróficos diferentes en las diferentes épocas de muestreo.

Bibliografía:

- Alcocer, J., A. Lugo., E. Escobar., M. Sánchez., G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae*. 27: 3166-3169.
- Arar E., G. Collins. 1997. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. Environmental Protection Agency. 22 pp.
- Ardiles, V., J. Alcocer, G. Vilaclara, L. A. Oseguera y L. Velasco. 2012. Diatom fluxes in a tropical oligotrophic lake dominated by large-sized phytoplankton. *Hydrobiologia*. 679:77-90.
- Armengol, J., J. Catalán., N. Gabellone., D. Jaume., J. de Manuel., E. Martí., J. Morguí., J. Nolla., J. Peñuelas., M. Real., J. Riera., S. Sabater., F. Sabater., J. Toja. 1990. A comparative limnological study of the Guadalhorce reservoirs system (Málaga, S.E. Spain). *Scientia gerundensis*. 16 (2): 27-41.
- Astor Y., K. Fanning, L. Guzmán. 2011. Manual de métodos para el análisis de parámetros oceanográficos en la estación serie de tiempo cariac. EDIMAR. 79-87.
- Barica, J. 1980. Why hypertrophic ecosystems? En: *Hypertrophic Ecosystems*. S.I.L. Workshop on Hypertrophic Ecosystems, Developments on Hydrobiology Series (J. Barica., L. Mur, eds.), Kluwer Academic Publishers Group. 9- 11 pp.
- Berman, T. L. Stone., Y. Yacobi., B. Kaplan., M. Schlichter., A. Nishri., U. Pollinger. 1995. Primary production and phytoplankton in Lake Kinneret. A long-term record (1972-1993). *Limnology and oceanography*. 40:1064-1076.
- Borrego. C., L. García. 1992. Caracterización limnológica de La Coromina, una laguna hipereutrónica del sistema lacustre de Banyoles. Universidad de Girona. *Limnetica*., 10 (1): 43-5.

- Camps. J., I. Gonzalvo., J. Güell., P. López., A. Tejero., X. Toldra., F. Vallespinos., M. Vicens. 1976. El lago de Montcortés, descripción de un ciclo anual. *Oecologia aquatica*, 2: 99-110.
- Cañedo, M., M. Rideradevall. 2009. Quantification of environment-driven changes in epiphytic macroinvertebrate communities associated to *Phragmites australis*. *J. Limnol.*, 68 (2): 229-241.
- Catalán, J. 1984. Agregados de algas en la superficie del agua (Delta Del Llobregat). Universidad de Murcia, *Anales de biología*: 75-83 pp.
- Cervantes, A., M. Elías-Gutiérrez., E. Suárez. 2002. Limnological and morphometric data of eight karstic system “cenotes” of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February-May, 2001). *Hydrobiologia* 482 (1-3): 167-177.
- Cervantes, A., M. Mezeta, M. Gutiérrez. 2009. Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 19(2): 177-180.
- CFE-GEIC. 2012a. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo I Hidrometeorología. Comisión Federal de Electricidad. México. 11 pp.
- CFE-GEIC. 2012b. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo II Geohidrología. Comisión Federal de Electricidad. México. 13 pp.
- CFE-GEIC. 2012c. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas: Tomo III Modelos matemáticos. Comisión Federal de Electricidad. México. 14 pp.
- CONANP, 2009. Estudio para el monitoreo de calidad del agua de las lagunas en el Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. 15-35 pp.
- CONANP. 2011. Parque Nacional Lagunas de Montebello “Programa de monitoreo de calidad del agua” Estudio para monitorear lo parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. Comitán de Domínguez, Chiapas. 10-60 pp.

- Contreras, C. 2013. Variación a largo plazo de la concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica en el lago Alchichica Puebla". 51-62pp.
- Diario Oficial de la Federación de México. 2004. Segunda sección. Tomo DCLXXV. 1-50 pp.
- Esteves, F. 1998. Fundamentos de Limnología. Segunda edición. Editorial Interciencia. Sao Paolo. 409 p.
- Gasol, J., R. Guerrero., C. Pedrós Alió. 1992. Spatial and temporal dynamics of a metalimnetic *Cryptomonas* peak. Joirnal of Plankton Research. 14: 1565-1580.
- Gervais, F. 1997. Ligth-dependent growth, dark survival, and glucose uptake by cryptophytes isolated from a freshwater chemocline. Journal of Phycology. 33: 18-25.
- González, E. M., Ramírez, M. N., Ruiz, M. L. 2005. Diversidad biológica en Chiapas. Editorial Plaza Valdés. México. 197 pp.
- Horne, A., C. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill. Segunda Edición. Nueva York. 576 pp.
- Huot Y., M. Babin., F. Bruyant., C. Grob., M. Twardowski., H. Claustre. 2007. Does chlorophyll a provide the best index of phytoplankton biomass for primary productivity studies?. Biogeosciences Dicussions. 4:707-745 pp.
- Kalff, J. 2002. Limnology. Inland water ecosystem. Prentice Hall. Nueva Jersey. 592 pp.
- Lewis, W. M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 40: 1779-1787 pp.
- Lewis, W. M. 1986. Phytoplankton Succession in Lake Valencia, Venezuela. Hidrobiología. 138:189-203.
- Lewis, W. M. 1987. Tropilac Limnology. Annual Review of Ecology and Systematics. 18:159-184.

- Lewis, W. M. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. In Schiemer F. y K. Boland (eds). *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing.43-64.
- Lewis, W. M. 2000. Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 5:35-48-
- Morata, S., A. Camacho., M. Miracle., E. Vicente. 1998. Asociaciones fitoplanctónicas y su periodicidad en un lago marcadamente estratificado. *Universidad de Valencia, España*. 35-52.
- Moss, B., S. McGowan, L. Carvahlo. 1994. Determination of phytoplankton crops by top-down and bottom-up mechanisms in a group of English lakes, the West Midland meres. *Limnology and Oceanography* 39: 1020-1029 pp.
- Pollinger, U. 1990. Effects of latitude on phytoplankton composition and abundance in large lakes. 368-402.
- Planas, D. 1990. Factores de control de la distribución espacial y temporal de la producción primaria del fitoplancton del lago de Banyoles. *Scientia gerundensis*. 16(2): 193-204.
- Quirós, R. La ecología de las lagunas de las Pampas. 2005. *Investigación y Ciencia*. Universidad de Buenos Aires, Argentina.1-13.
- Reynolds, C. S. 1984. *The Ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Segunda Edición. Gran Bretaña. 384 pp.
- Reynolds, C. S. 1988. Functional morphology and the adaptive strategies of freshwater phytoplankton. En Sandgren C. D. (Ed.) *Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. USA, Australia. 442 pp.
- Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press. 535 pp.
- Romo, S., A. García., M. Villena., V. Sánchez., A. Ballester. 2008. Tendencias del fitoplancton en el lago de la Albufera de Valencia e implicaciones para su ecología, gestión y recuperación. *Limnetica*, 27 (1): 11-28 pp.

- Salas, H., P. Martino. 1996. Curso de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente. BVSDE. Lima.1-14 pp.
- Sánchez, O., M. Herzing., E. Peters., R. Márquez., L. Zambrano. 2007. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. INE-SEMARNAT. 123 pp.
- SEMARNAT-CONANP. 2009. Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2007-2012. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. 27-126pp.
- Smith, V. H. 2006. Responses of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment. *Limnology Oceanogr.* 51 (2): 377-384.
- Talling, J. F. 1963. The annual cycle of stratification and phytoplankton growth in lake Victoria (East Africa). *Internationale Reune der gesamten Hydrobiologie and Hydrographie.* 51: 545-621.
- Talling, J. F. 1993. Comparative seasonal changes, and inter-annual variability and stability, in a 26 year record of total phytoplankton biomass in four English lake basins. *Hydrobiologia.* 268: 65-98.
- Vásquez, M., A. Méndez. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. 109 pp.
- Weiaupt, G. J. 1984. Exploración de los Océanos: Introducción a la Oceanografía. Editorial C.E.C.S.A. 640 pp.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems.* Academic Press. San Diego. 120 pp.