



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

Variación del seston en lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”,
Chiapas, México

TESIS

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

(Limnología)

PRESENTA:

Lic. en C.T. MARIANA VARGAS SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL:

DR. JAVIER ALCOGER DURAND

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DRA. MAITE MASCARÓ MIQUELAJAUREGUI

FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI SISAL, UNAM

DR. ÓSCAR ESCOLERO FUENTES

INSTITUTO DE GEOLOGIA, UNAM

DR. FELIPE GARCÍA OLIVA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CD. MX., MAYO, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Variación del seston en lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

(Limnología)

PRESENTA:

Lic. en C.T. MARIANA VARGAS SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL:

DR. JAVIER ALCO CER DURAND

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DRA. MAITE MASCARÓ MIQUELAJAUREGUI

FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI SISAL, UNAM

DR. ÓSCAR ESCOLERO FUENTES

INSTITUTO DE GEOLOGIA, UNAM

DR. FELIPE GARCÍA OLIVA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

MÉXICO, CDMX, MAYO 2019

Variación del seston en lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México

Lic. en C.T. Mariana Vargas Sánchez
Tutor: Dr. Javier Alcocer Durand



Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por brindarme una formación integral y multidisciplinaria a lo largo de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Javier Alcocer, por el conocimiento compartido, por cada una de las lecciones, por el tiempo dedicado a este trabajo y sobre todo por su apoyo a lo largo de mi formación académica.

Al comité académico encargado de la revisión de este trabajo por cada una de sus valiosas observaciones. Muchas gracias; Dra. Gloria Vilaclara, Dra. Maite Mascaró, Dr. Oscar Escolero y Dr. Felipe García.

Al Dr. Luis Oseguera por el apoyo y enseñanzas en campo y laboratorio.

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 proyectos PAPIIT IN219215 "Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas" y PAPIIT IV200319 "Area Experimental de Lagos Tropicales". 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), Comisario Ejidal de Tzisco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tzisco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

Dedicatoria

A mis héroes...

Porque ustedes me han enseñado que los límites los ponemos nosotros mismos y que los sueños son para cumplirse. Porque en esta vida no encuentro mejor ejemplo a seguir que ustedes.

¡Gracias Male, Luis y Jorge!

A mi compañero...

Por caminar de mi mano. Por hacer de éste tiempo el más bonito del mundo. Por el apoyo incondicional.

¡Gracias por tanto amor, Eduardo!

Contenido

Agradecimientos -----	III
Resumen-----	IX
Abstract -----	X
Introducción -----	1
<i>Antecedentes</i>	4
<i>Justificación</i>	7
<i>Hipótesis</i>	9
<i>Objetivos</i>	9
Materiales y métodos -----	11
<i>Descripción del área de estudio</i>	11
<i>Preparación previa de materiales</i>	16
<i>Trabajo de campo</i>	16
<i>Trabajo de laboratorio</i>	19
<i>Trabajo de gabinete</i>	20
Resultados-----	23
<i>Caracterización fisicoquímica</i>	23
<i>Seston</i>	38
<i>Carbono total particulado</i>	44
<i>Proporción S:COP</i>	53
Discusión-----	57
Conclusiones-----	69
Referencias -----	71

Índice de tablas

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM y clasificación geomorfológica y <i>a priori</i> con base en el color aparente.	17
Tabla 2. Promedio \pm desviación estándar de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y profundidad de la zona eufótica y capa de mezcla en los lagos de estudio del PNLM durante la temporada cálida/lluvias.	26
Tabla 3. Promedio \pm desviación estándar de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y profundidad de la zona eufótica y capa de mezcla en los lagos de estudio del PNLM durante la temporada fría/secas.	27
Tabla 4. Matriz de componentes, valores propios de las variables originales evaluadas y varianza total explicada, obtenidos del ACP para las variables fisicoquímicas durante las dos temporadas de muestreo.	30
Tabla 5. Presencia/ausencia de clinas en los lagos del PNLM durante la temporada 1 (cálida/lluvias) y la temporada 2 (fría/secas). Ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante.	33
Tabla 6. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E.) de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}) y pH en los diferentes grupos establecidos del PNLM.	37
Tabla 7. Concentraciones mínima y máxima (ubicación), promedio \pm desviación estándar (D.E.) del seston (mg L^{-1}) en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante las temporadas estudiadas.	39
Tabla 8. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E) del seston en los diferentes grupos establecidos del PNLM.	40
Tabla 9. Concentraciones mínima y máxima (ubicación), promedio \pm desviación estándar (D.E.) del CTP (mg L^{-1}) en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante las temporadas estudiadas.	46
Tabla 10. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E) del CTP en los diferentes grupos establecidos del PNLM.	47
Tabla 11. Contribución porcentual del material terrígeno y biogénico en la composición total del seston en los lagos estudiados del PNLM durante las dos temporadas muestreadas.	54
Tabla 12. Coeficientes de correlación lineal obtenidos para las distintas variables en estudio.	55
Tabla 13. Masa total del seston (mg L^{-1}) y el CTP (mg L^{-1}) en distintos lagos con diferente ubicación latitudinal y estado trófico en comparación con los lagos estudiados del PNLM, ordenados con base en su estado trófico.	63

Índice de figuras

Figura 1. Extremos en la coloración que presentan actualmente los lagos del PNLM.	8
Figura 2. Localización del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México.	11
Figura 3. Mapa geológico de la cuenca Río Grande de Comitán–Lagos de Montebello.	12
Figura 4. Delimitación de las trece unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán–Lagos de Montebello, Chiapas.	14
Figura 5. Temperatura y precipitación media mensual registrada en la estación Tzisco.	15
Figura 6. Equipos utilizados para la obtención del registro in situ de variables ambientales y muestras de agua durante el trabajo en campo.	18
Figura 7. Valor promedio (\pm D.E.) de T, OD K ₂₅ y pH durante la temporada 1 (cálida/lluvias) en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante.	24
Figura 8. Valor promedio (\pm D.E.) de T, OD K ₂₅ y pH durante la temporada 2 (fría/secas) en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante	25
Figura 9. Representación bidimensional de los dos primeros componentes principales para la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha).	29
Figura 10. Perfiles verticales de T, OD, K ₂₅ y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Yalalush, ejemplificando un lago prístino–funcionalmente somero.	34
Figura 11. Perfiles verticales de T, OD, K ₂₅ y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Chaj Chaj, ejemplificando un lago impactado–funcionalmente somero.	35
Figura 12. Perfiles verticales de T, OD, K ₂₅ y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Tzisco, ejemplificando un lago prístino–profundo.	36
Figura 13. Perfiles verticales de T, OD, K ₂₅ y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Bosque Azul, ejemplificando un lago impactado–profundo.	37

Índice de figuras

Figura 14. Concentración promedio (\pm D.E.) de seston durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha) en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante.	38
Figura 15. Concentración promedio (\pm D.E) de seston durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas en los diferentes grupos establecidos del PNLM.	40
Figura 16. Distribución vertical del seston en lagos 'prístinos-funcionalmente someros', y en lagos 'impactados-funcionalmente someros', durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas.	42
Figura 17. Distribución vertical del seston en lagos 'impactados-profundos, y en lagos 'impactados-profundos durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas.	43
Figura 18. Concentración promedio (\pm D.E.) de CTP durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante.	45
Figura 19. Concentración promedio (\pm D.E) de CTP durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas en los diferentes grupos establecidos del PNLM.	47
Figura 20. Distribución vertical del CTP en lagos 'impactados-funcionalmente someros', durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas.	49
Figura 21. Distribución vertical del CTP en lagos 'prístinos profundos' y en lagos 'impactados-profundos, durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas.	50
Figura 22. Dispersión de los promedios de la concentración de seston (izquierda) y CTP (derecha) para ambas temporadas de muestreo.	52
Figura 23. Contribución porcentual y concentración del material terrígeno y biogénico en la composición total del seston en los lagos estudiados del PNLM, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas.	53
Figura 24. Correlaciones lineales de la concentración promedio de seston con la profundidad de la Z_{EU} , la concentración promedio de CTP y la profundidad de la Z_{MIX} , durante la temporada cálida/lluvias (arriba) y la temporada fría/secas (abajo).	56

Resumen

En el año 2003 se reportaron cambios en la coloración y transparencia del agua en algunos de los lagos pertenecientes al Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas. En el presente trabajo se estudió la concentración, variación temporal y espacial del seston y el carbono total particulado (CTP), así como la transparencia de la columna de agua (Z_{EU}), en un conjunto de dieciocho lagos en el PNLM incluyendo impactados y no impactados. Lo anterior con el objetivo de analizar los cambios acaecidos en los lagos impactados al compararlos con los no impactados, a través de reconocer el papel que juega el seston, el CTP y la Z_{EU} en la dinámica limnológica general de los lagos del PNLM.

Los muestreos se llevaron a cabo en dos épocas climáticas contrastantes, que se anticipaba conllevarían las dos épocas hidrodinámicas características de la zona tropical: la temporada cálida/lluvias (mayo de 2014, estratificación) y la fría/secas (febrero de 2015, circulación). El perfil vertical de cada uno de los lagos fue caracterizado *in situ* (T, OD, K_{25} , pH y PAR). Para determinar la concentración de seston y CTP en los lagos se tomaron entre una y cinco muestras de agua a lo largo de la columna de agua dependiendo de la profundidad de los lagos.

Las concentraciones promedio de seston se registraron en un intervalo de 0.7–21.1 mg L⁻¹ en la temporada cálida/lluvias y de 0.4–11.2 mg L⁻¹ durante la temporada fría/secas. Las concentraciones promedio de CTP variaron en un intervalo de 0.5–3.0 mg L⁻¹ en la temporada cálida/lluvias y de 0.5–7.9 mg L⁻¹ durante la temporada fría/secas. La exploración de la fisicoquímica del agua permitió clasificar a los lagos en dos grupos, prístinos e impactados y estos presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la concentración y distribución vertical del seston y del CTP. Las concentraciones promedio de seston se registraron en un intervalo de 0.7–6.3 mg L⁻¹ en los lagos prístinos y de 4.3–21.0 mg L⁻¹ en los impactados. Las concentraciones promedio de CTP variaron en un intervalo de 0.5–1.2 mg L⁻¹ en los lagos prístinos y de 2.7–7.9 mg L⁻¹ en los impactados.

Los cambios acaecidos en los lagos ubicados en la zona NW del PNLM y que fueron clasificados como impactados, conllevan un incremento en la concentración del material particulado –seston– y CTP presente en los mismos así como una distribución diferencial en el perfil vertical y una concentración mayor en las aguas superficiales, además de una disminución en la Z_{EU} .

Abstract

Since 2003, changes in the color and transparency of water were reported in some of the lakes of “Lagunas de Montebello” National Park (LMNP). In this work, the concentration and temporal and vertical variation of the seston and the total particulate carbon (TPC), as well as the transparency of the water column (Z_{EU}), were studied in a series of eighteen lakes in the PNLM, with the aim of analyzing the role played by seston in the general limnological dynamics of the PNLM lakes.

The samplings were carried out in two contrasting hydrodynamic periods: the warm/rainy season (May 2014, stratification) and the cold/dry season (February 2015, circulation). Vertical profiles of temperature (T), dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (K_{25}), pH and PAR, were measured for each lake. For the evaluation of seston and particulate carbon (PTC), between one and five water samples were collected throughout the column.

The average seston concentration varied in a range between 0.7–21.1 mg L⁻¹ along the warm/rainy season and in a range between 0.4–11.2 mg L⁻¹ during the cold/dry season. The average PTC concentration varied in a range between 0.5–3.0 mg L⁻¹ during the warm/rainy season and in a range between 0.5–7.9 mg L⁻¹ during the cold/dry season. Physical and chemical characterization of the water allowed to classify the lakes into two groups, pristine and impacted. There were significant differences ($p < 0.05$) in the concentration and vertical distribution of seston and CTP between pristine and impacted lakes. The average seston concentrations varied in a range between 0.7–6.3 mg L⁻¹ in pristine lakes and 4.3–21.0 mg L⁻¹ in impacted ones. Average concentrations of CTP varied in a range between 0.5–1.2 mg L⁻¹ in pristine lakes and 2.7–7.9 mg L⁻¹ in impacted ones.

Finally, it was concluded that the changes that occurred in the lakes located in the NW zone of the LMNP, classified as impacted, are associated with an increase in the concentration of particulate material –seston– present in them.

Introducción

Capítulo 1

Los lagos tropicales son aquellos cuerpos de agua lénticos que se ubican geográficamente dentro de los límites marcados por los trópicos de Cáncer y Capricornio (23° 26' 16" N y S). Dicha "tropicalidad" está dada por tres condiciones básicas, todas ellas relacionadas con la ubicación latitudinal del cuerpo de agua (Straskraba 1980): a) la cantidad de radiación solar anual, b) la variación anual en la radiación solar y c) el efecto de la fuerza de Coriolis. De los factores antes mencionados, la radiación solar es la que se considera de mayor importancia en los estudios limnológicos ya que casi toda la energía que impulsa y controla el metabolismo de los lagos se deriva a partir de esta energía, que es bioquímicamente convertible en energía química potencial a través de la fotosíntesis (Wetzel y Likens 1979).

Estas condiciones afectan directamente a los lagos tropicales en diversas formas, entre las cuales destacan la temperatura del cuerpo de agua, la estabilidad de la estratificación, el espesor de la capa de mezcla, la eficiencia en el reciclamiento de nutrientes, el agotamiento de OD hipolimnético, la producción primaria y la diversidad de especies (Lewis 1987) y, por lo tanto, ejercen controles regulatorios importantes en la fisiología y el comportamiento de los organismos acuáticos (Wetzel y Likens 1979). Así, la intensidad lumínica que recibe una zona o región está determinada por distintas variables que actúan en diferentes escalas temporales y espaciales, como la estación del año, la hora del día, la nubosidad, así como la absorción del agua y las partículas suspendidas en ella que afectan la radiación subacuática (Cervantes *et al.* 2005). Dentro del agua la luz se atenúa rápidamente conforme aumenta la profundidad mediante mecanismos físicos como la absorción y la dispersión (lo

que, en conjunto, se denomina atenuación) (Wetzel y Likens 1979) y, posteriormente, dicha energía se transforma en calor (Westlake 1965). La absorción es influenciada por la estructura molecular del agua en sí, por los compuestos orgánicos disueltos y, en particular, por las partículas suspendidas en la columna de agua (Wetzel y Likens 1979). Estos mecanismos son dinámicos y cambian según la temporada y las condiciones ambientales de cada región.

Al conjunto de material particulado suspendido en la columna de agua se le denomina seston. El origen de las dos fracciones del seston (orgánico e inorgánico) puede ser tanto alóctono (p. ej., precipitación seca y húmeda, calcita o aragonita y como aporte de ríos) como autóctono (p. ej., la producción de fitoplancton y la resuspensión de sedimentos del fondo y de la zona litoral de los lagos) (Lenz 1977, Peng *et al.* 2004). Además estos sistemas están sujetos a una entrada importante de partículas alóctonas tanto litogénicas (p.ej., arcillas, material volcánico) como biogénicas (p.ej., polen, hojas y ramas).

La cantidad de seston presente en los sistemas acuáticos es el principal indicador del grado de eutroficación e influencia terrestre acaecida en dichos cuerpos de agua (Lenz 1977). Este tipo de partículas tienen también un papel relevante en la ecología y calidad del agua de los sistemas acuáticos, ya que muchas de ellas constituyen alimento y/o presentan superficies activas que intervienen en procesos metabólicos de los organismos; del mismo modo, producen una mayor turbidez en la columna de agua (Peng *et al.* 2004).

La distribución del material sestónico en los lagos es resultado tanto de la interacción de procesos biológicos (producción y descomposición) como físicos (sedimentación, resuspensión del fondo y el transporte horizontal) (Callieri *et al.* 1991). Este material tiene un papel importante dentro de los ecosistemas acuáticos, pues sus componentes, además de formar parte de las redes tróficas, determinan la profundidad de la zona fótica o eufótica (Z_{EU}), que es la zona donde hay suficiente radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés; espectro de la luz que corresponde a las longitudes de onda de 400–700

nm) para que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis. En consecuencia, también se le denomina zona productiva e influye en la tasa de producción de la zona pelágica y bentónica (Lenz 1977). La Z_{EU} constituye la capa de la columna de agua desde la superficie y hasta donde el PAR alcanza el 1% de la PAR que llega en la superficie (SPAR por sus siglas en inglés).

Respecto a la distribución espacial y la atenuación de la luz en la columna de agua, se ha observado que se forma un gradiente lumínico en las distintas profundidades, de tal manera que se distinguen tres zonas en relación con el crecimiento fitoplanctónico: 1) zona de fotoinhibición, presente en la capa superficial donde la alta radiación solar inhibe parcialmente la fotosíntesis; 2) la zona de producción máxima, en la que la radiación disponible permite la tasa máxima de fotosíntesis, y 3) la zona de declive progresivo, en la cual la radiación disminuye conforme se profundiza, hasta alcanzar cantidades muy bajas que imposibilitan la fotosíntesis (Horne 1994). En este sentido, las variaciones en la intensidad de la radiación tienen importantes consecuencias en el proceso de la fotosíntesis y en las tasas de crecimiento del fitoplancton, aunque éstas son diferentes en cada especie.

Uno de los principales elementos que integran el seston es el carbono particulado. El carbono representa uno de los elementos esenciales para la vida de los organismos sobre la Tierra. El conocimiento adecuado de su ciclo en los diferentes medios (atmósfera, océano y tierra) es uno de los retos de la comunidad científica actual. Debido al aporte antropogénico de compuestos de carbono (principalmente CO_2 , CO y CH_4), la importancia del estudio de este elemento, trascendental para la vida vegetal y animal, se ha ampliado a ser factor importante en el cambio climático del planeta (Hernández y Gaxiola 2007).

Tradicionalmente, los sistemas acuáticos epicontinentales habían sido considerados como componentes menores en el ciclo del carbono global. Sin embargo, Cole *et al.* (2007) mostraron que estos ecosistemas reciben anualmente, a partir de la suma de los aportes del ambiente y fuentes antropogénicas, aproximadamente 1.9 PgC año^{-1} , de los

cuales alrededor de 0.2 PgC año⁻¹ se depositan y atrapan en los sedimentos acuáticos, al menos 0.8 PgC año⁻¹ regresan a la atmósfera y 0.9 PgC año⁻¹ llega a los océanos.

El carbono particulado en sistemas lacustres puede tener tres fuentes: alóctona, autóctona y la resuspensión de material del fondo y de la zona litoral de los lagos. La porción que cada uno de ellos aporta a la masa del seston varía dependiendo de la profundidad, de la morfometría de la cuenca, del régimen de vientos y del estado trófico del lago, y determinará si el carbono particulado que se está aportando es predominantemente orgánico o inorgánico (Eckert *et al.* 2003). El carbono particulado juega un papel importante en el ciclo biogeoquímico del carbono en los sistemas lacustres y se vincula estrechamente con la producción, transferencia y descomposición de la materia orgánica en el ecosistema (Longhurst y Pauly 1997); además, presenta una relación cercana a la dinámica del fitoplancton (Punning *et al.* 2003).

El flujo vertical de la materia particulada desde la Z_{EU} hacia el fondo representa un proceso central en el ciclo del carbono. Este proceso en particular constituye la componente principal de la “bomba biológica” responsable de “secuestrar” el CO₂ atmosférico, esto es, retirar el carbono fuera de la circulación por un plazo >100 años (García-Pámanes *et al.* 2011).

Antecedentes

Debido a los problemas de contaminación de los cuerpos acuáticos del estado de Chiapas, la Gerencia Regional Frontera Sur de La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) junto con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), impulsaron en el año 2007 el programa “*Proyecto de Transferencia de Tecnologías de Conservación del Suelo y Agua en Microcuencas Rurales*”, inscrito el marco del Programa

de Manejo del Agua y Preservación de Suelos (MAPS) que la CONAGUA ha estado instrumentado desde mediados de la década de los noventas.

En el año 2010, el gobierno del estado de Chiapas solicitó al CONACyT la demanda tecnológica, a través del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua. Área 2, Sistema Hidrológico Nacional Estudios de Calidad del Agua el *“Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas”*. CONACyT declaró desierta la solución de la demanda (CFE-GEIC 2012a).

En 2011, la Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural, del Gobierno de Chiapas (SEMAHN), solicitó apoyo a Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la realización de este estudio. La CFE presentó una propuesta técnica del proyecto denominado *“Visión general de la problemática del cambio de coloración desde la laguna de Chinkultic hasta la Laguna Vuelta del Agua en el Parque Nacional Lagunas de Montebello en Chiapas”*, Primera Etapa (CFE-GEIC 2012a).

Para atender la problemática del sistema lacustre 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. Dichos modelos se generaron a partir de mediciones sistemáticas en los cuerpos lacustres, tanto hidrodinámicas como de calidad del agua (CFE-GEIC 2012c).

Aunado a lo anterior y más recientemente, diversos esfuerzos académicos se han sumado a dicha labor de investigación. Juárez (2014) realizó diversos análisis hidrogeoquímicos en la cuenca del Río Grande de Comitán y propuso que el origen de la composición química del agua se debe a los iones que componen a las rocas sedimentarias en las que se localiza la cuenca, tales como el calcio y el magnesio aportados por rocas calizas y dolomías. Las aguas con mayor concentración de nitratos se

ubicaron en zonas de cultivo, por lo que es fácil deducir la presencia de aguas contaminadas por agroquímicos, ya que por lo general, los fertilizantes contienen sulfatos, nitratos y fosfatos.

Además, Almeida (2014) estudió la estructura funcional y taxonómica del fitoplancton en un grupo representativo de lagos del PNLM concluyendo que los grupos funcionales más importantes por su aporte a la biomasa en estos lagos están mayormente relacionados con características de ambientes eutróficos. Aunado a lo anterior, describe que los cuerpos de agua muestran heterogeneidad en la vertical en su composición taxonómica y funcional del fitoplancton, a pesar de que se encuentran muy cercanos entre sí, mostrando que hay lagos con diferente nivel trófico.

Villalpando (2015) estimó el índice trófico de diferentes lagos del PNLM por medio de un sistema de adquisición de datos a distancia basado en las propiedades de la radiación electromagnética (percepción remota) y su interacción con la superficie de un grupo de lagos ubicados en la porción NW del PNLM. El trabajo concluye que el estado trófico de esos cuerpos de agua, en general, es de eutrofia, restringiéndose a los lagos estudiados y ubicados en la zona NW del Parque Nacional.

Alcocer *et al.* (2016) presentaron los primeros estudios batimétricos y descripciones de los parámetros morfométricos de los principales lagos del PNLM. Seleccionaron 18 lagos representativos a lo largo de un transecto NW-SE. Encontraron que las longitudes máximas de los lagos van de 0.14 a 3.2 km, las áreas superficiales varían de 1.1 ha a 306.6 ha, y los volúmenes varían de 4.0×10^{-5} a 8.8×10^{-2} km³. Además, reportaron que seis lagos del PNML se encuentran entre los lagos más hondos de México con una profundidad máxima promedio de más de 50 m. Concluyeron que estas profundidades favorecen la estratificación prolongada, lo que aumenta la probabilidad de acumular contaminantes.

Recientemente se reconoció que algunos cuerpos de agua del PNLM se han visto afectados por procesos de eutroficación; sin embargo, el estado trófico de los lagos del PNLM fluctúa entre el ultraoligotrófico en los prístinos, mientras que los lagos impactados resultan mesotróficos, eutróficos o incluso hipereutróficos (Hernández 2016, Vargas 2016, Maya 2017). El proceso de eutroficación, si bien es natural, puede ser acelerado significativamente por factores antrópicos (Juárez 2014). Por tal motivo, el PNLM ha sido objeto de varias investigaciones científicas que buscan conocer sus características, así como determinar las causas de la severa afectación a algunos de los cuerpos de agua y, con ello, poder finalmente proponer alternativas de mitigación y/o remediación de los ecosistemas (González *et al.* 2005).

Debido a que en el PNLM existen escasos estudios limnológicos, el presente trabajo buscó entender la dinámica limnológica de los cuerpos acuáticos del PNLM. Se planteó estudiar la concentración y distribución vertical del seston y el carbono total particulado (CTP) con el fin de reconocer las diferencias entre los lagos no impactados e impactados y las consecuencias en la penetración de la luz y la estructura térmica de la columna de agua (transparencia). Lo anterior se utilizó como una herramienta descriptiva del estado de salud de los lagos para finalmente reconocer el tipo y grado de deterioro que presentan.

Justificación

El PNLM toma su nombre del complejo hidrológico constituido por más de 60 cuerpos lacustres que varían en extensión, forma y tonalidad del agua, con colores que, originalmente, van desde el azul pálido al esmeralda y el turquesa (CONANP 2007). En 1959, se decretó al PNLM, como un área natural protegida a través del Diario Oficial de la Federación (DOF), de acuerdo a la política ambiental del gobierno Mexicano, con el objetivo de proteger y conservar los ecosistemas que alberga el patrimonio natural del país.

Asimismo, en mayo del 2009, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) incorporó al PNLM como una nueva red mundial de reservas de la biósfera. El PNLM es reconocido como un Área de Importancia para la Conservación de las Aves, y como humedal de importancia mundial, Sitio Ramsar, desde el 2003 (CONAGUA 2009).

El PNLM es reconocido como uno de los escenarios naturales más hermosos de Chiapas y constituye un sitio icónico para el estado dada su importancia económica, ambiental y social. Este sistema de lagos cumple una función ecológica de vaso regulador regional, regulador climático, corredor biológico y es fuente de sustento de un número considerable de comunidades, recibiendo anualmente a más de 339,000 visitantes al año (Secretaría de Turismo del Estado de Chiapas 2018).



Figura 1. Extremos en la coloración que presentan actualmente los lagos del PNLM. A la izquierda el color azul “no impactado” ejemplificado por el lago Pojoj y a la derecha el color verde-amarillento observado en los lagos “impactados” que mostraron cambio de coloración cómo en Bosque Azul.

En el año 2003 se reportó un cambio en la coloración y transparencia de las aguas en algunos de los lagos del PNLM, de azul y transparente (lagos prístinos) a amarillo-verdoso y turbio (de aquí en adelante lagos impactados) (Fig. 1), 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.

La necesidad de reconocer el origen de este cambio impulsó a estudiar con mayor detalle las características del sistema lacustre, así como la problemática registrada. Para determinar las condiciones de los lagos diferentes dependencias de gobierno han realizado muestreos aislados en el PNLM, encontrando en general sulfatos y sulfuros en concentraciones relativamente elevadas (CFE-GEIC, 2012a). El deterioro de los sistemas se ve reflejado en la fragmentación del paisaje, una acelerada erosión hídrica del suelo, contaminación de las aguas por residuos sólidos, inundaciones y una grave disminución de los avistamientos de fauna silvestre asociada a estos ecosistemas (SEMARNAT 2008).

Hipótesis

H₁: Si la concentración del material total particulado –seston– es un indicador de los cambios acaecidos en los lagos del PNLM, tales como procesos eutroficación y erosión de la cuenca circundante, entonces se espera que existan diferencias entre lagos no impactados e impactados y, que ello se exprese en diferencias en la penetración de la luz (transparencia del agua) y en la estructura térmica.

H₂: Si la turbidez de los lagos del PNLM es biogénica (autóctona, producción primaria) y no terrígena (alóctona, lodos) derivada de la erosión de la cuenca, entonces se espera que la proporción con la que contribuye el carbono particulado a la concentración del seston sea mayoritaria.

Objetivos

General. Elucidar el papel que juega la materia total particulada (seston) en la dinámica limnológica general de los lagos del PNLM y, en particular, sobre la penetración de la luz y

por ende en su estructura térmica. Asimismo, se busca reconocer los cambios en la concentración del seston, la penetración de la luz y la estructura térmica, acaecidos en los lagos impactados al compararlos con los no impactados.

Particulares:

I. Análisis de la variación espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos (temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}), pH y PAR) en la columna de agua en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

II. Análisis de la variación espacial y temporal de la materia total particulada -seston- mediante el análisis de la concentración y distribución vertical de la misma en los lagos en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

III. Evaluación de la relación existente entre las variaciones de la Z_{EU} y Z_{MIX} y la distribución vertical de la materia total particulada - seston- en la columna de agua en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

IV. Análisis de la variación de la proporción del material orgánico (biogénico) y mineral (terrígeno) en la concentración de total del seston presente en los lagos.

V. Análisis de las posibles relaciones entre las variables ambientales y la variación de la concentración (vertical y temporal) del seston, con el fin de elucidar algunos de los cambios acaecidos en los lagos impactados en contraste con los prístinos.

Materiales y métodos

Capítulo 2

Descripción del área de estudio

Localización. El PNLM se encuentra en la región sureste del Estado de Chiapas, en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre de Chiapas, en la frontera con Guatemala (Fig. 2).

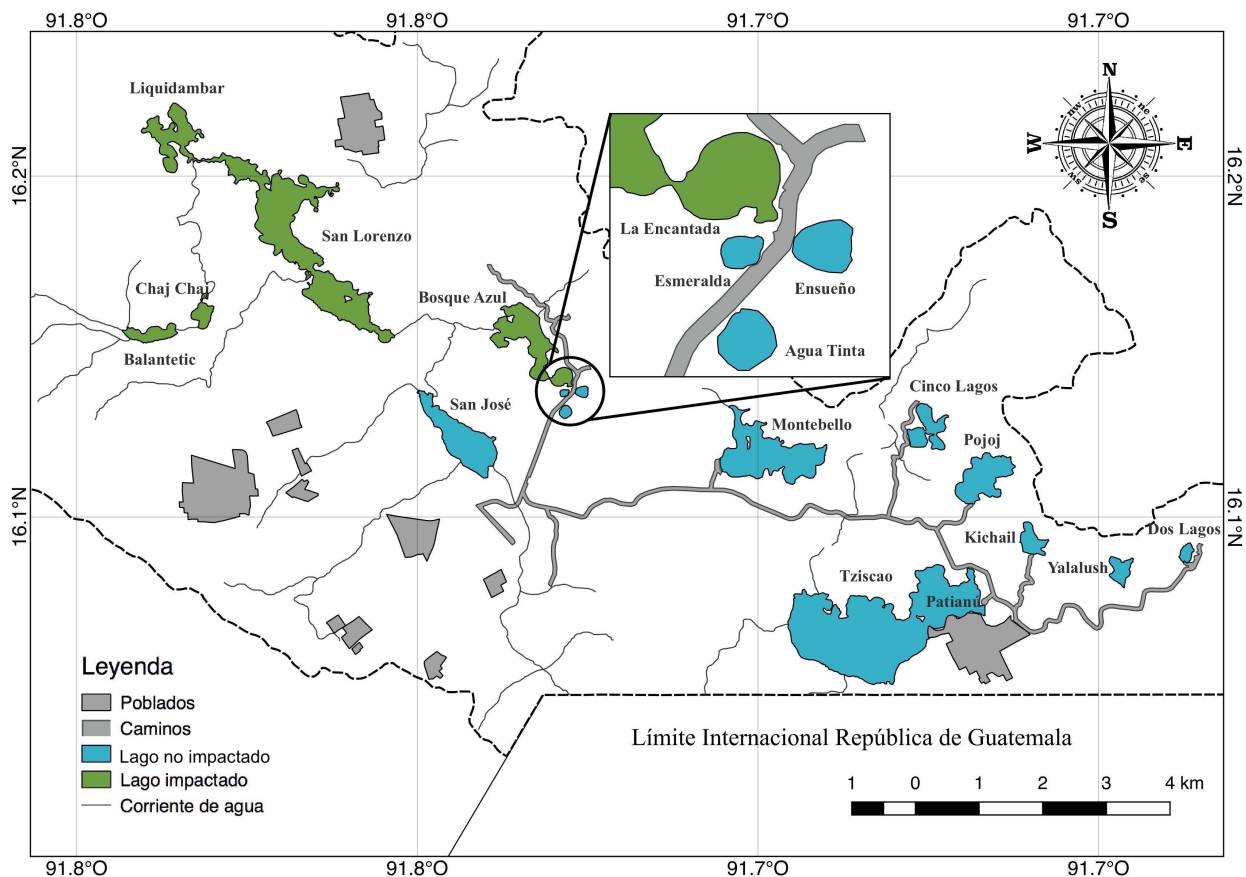


Figura 2. Localización del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México. Los lagos seleccionados para este estudio marcados en azul (lagos prístinos) y en verde (lagos impactados).

Se ubica a los 16°04'–16°10' N y 91°37'–91°47' O, a una altitud de 1,500 m s.n.m. (CONANP 2007). El parque, se localiza en el km 39.5 carretera Comitán–Lagos de Montebello; abarca una superficie de aproximadamente 6,425 hectáreas y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria (CONANP 2011); éste último abarca 95% de la superficie del Parque Nacional.

Geología. El PNLM pertenece a la cuenca del Río Grande de Comitán–Lagos de Montebello. Esta cuenca es parte de la Región Hidrológica No. 30 Grijalva–Usumacinta en la región Sur–Sureste en el estado de Chiapas conocida como la provincia de la Meseta Central (Altiplanicie o Altos de Chiapas) (CFE–GEIC 2012b).

La cuenca del Río Grande de Comitán está conformada por el afluente principal Río Grande. Este recorre zonas urbanas y agrícolas hasta desembocar en el sistema “Lagos de Montebello”. La alimentación de la zona lacustre es principalmente subterránea generando un sistema de dolinas y otras formas originadas por la disolución de las rocas calizas (Vázquez y Méndez 1994). Es una cuenca kárstica conformada por secuencias sedimentarias de origen marino y transicional.

Esta región ha estado sujeta a diversos procesos geológicos como son la sedimentación, plegamiento y fallamiento. Todos estos eventos actuaron en diferentes periodos con distintas direcciones de esfuerzos y generaron el estilo de deformación que conforma el marco tectónico–estructural actual de la región en la que se encuentra el PNLM. Los planos axiales de los pliegues principales tienen un rumbo NW coincidente con el rumbo de las principales fallas normales (Mora *et al.* 2016).

En el PNLM existe una relativa heterogeneidad morfológica y de origen del relieve, a pesar de la existencia de homogeneidad litológica, lo cual podría explicarse por la interacción de los procesos kársticos (i.e. exógenos) y tectónicos (i.e. endógenos) que tienen lugar en la zona. Los procesos kársticos quedan latentes por el gran número de

unidades geomorfológicas relacionadas con la disolución, como son las uvalas, dolinas, poljes y valles ciegos. En el caso de la tectónica, su expresión está representada por estructuras plegadas y por sistemas de fallas y fracturas (Durán 2014).

Los cuerpos lacustres se desarrollaron sobre unidades estratigráficas del Cretácico, principalmente sobre el grupo Sierra Madre del Cretácico Superior y las formaciones Malpaso y Chinameca del Cretácico Inferior (Durán 2014). En el área lacustre se encuentran aflorando rocas caliza-dolomía y caliza-lutita (Mora *et al.* 2016) de la Formación Sierra Madre de edad Albiano-Cenomaniano, de color café a gris blanquecino, de aspecto sacaroide, fracturadas, con estratificación en capas gruesas a masiva (CFE- GEIC, 2012c) (Fig. 3).

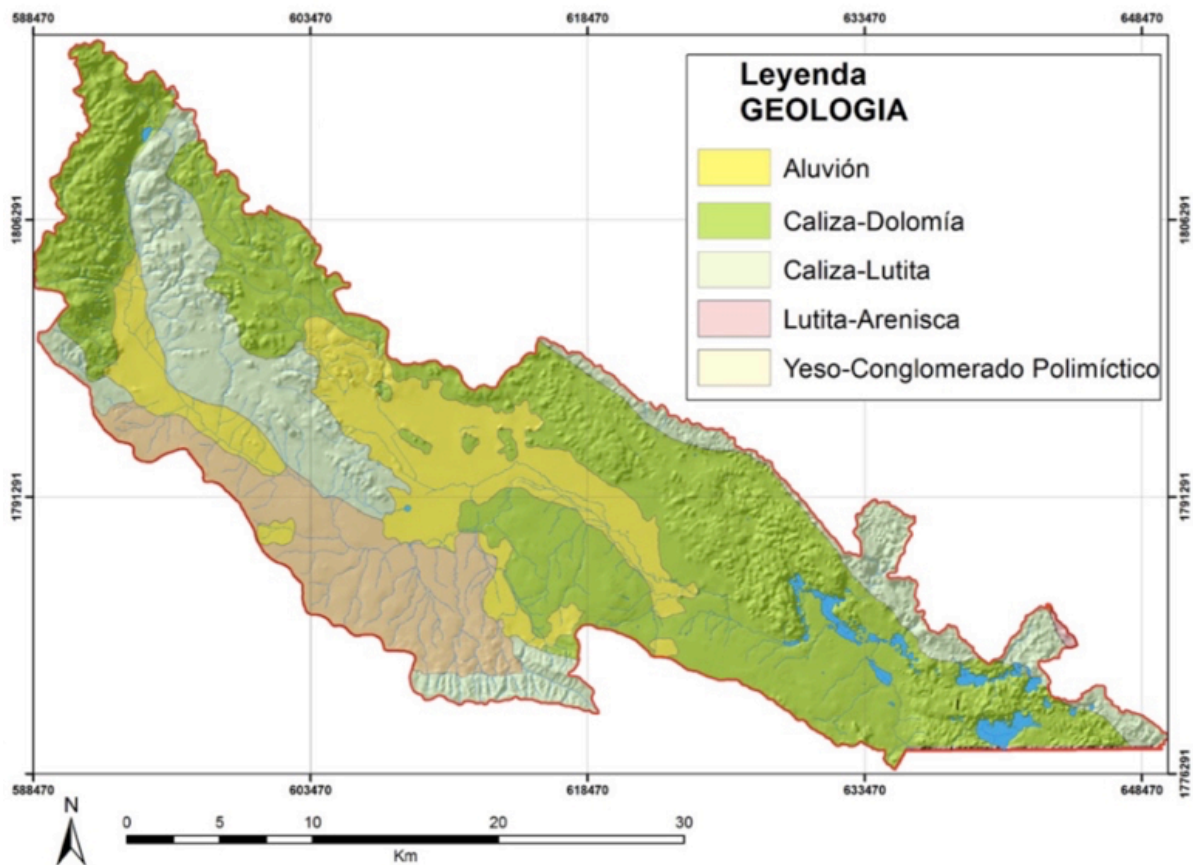


Figura 3. Mapa geológico de la cuenca Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello. (Modificado de Mora *et al.* 2016).

Durán *et al.* (2014) clasificaron los lagos del PNLM en dos grupos: (a) lagos de montaña, cuerpos de agua a mayor altura en relación con los otros lagos y alimentados principalmente por aguas subterráneas a través de los sistemas regionales de fallas y fracturas (Fig. 4, I) y (b) lagos de planicie, alimentados principalmente por el escurrimiento de la superficie del Río Grande de Comitán (Fig. 4 II y XII).

Los lagos de planicie están conectados mediante una red de canales que posiblemente fueron construidos hace más de 500 años por los antiguos habitantes para fines de transporte. Los habitantes actuales han conservado y ampliado dichos canales (Alcocer *et al.* 2018).

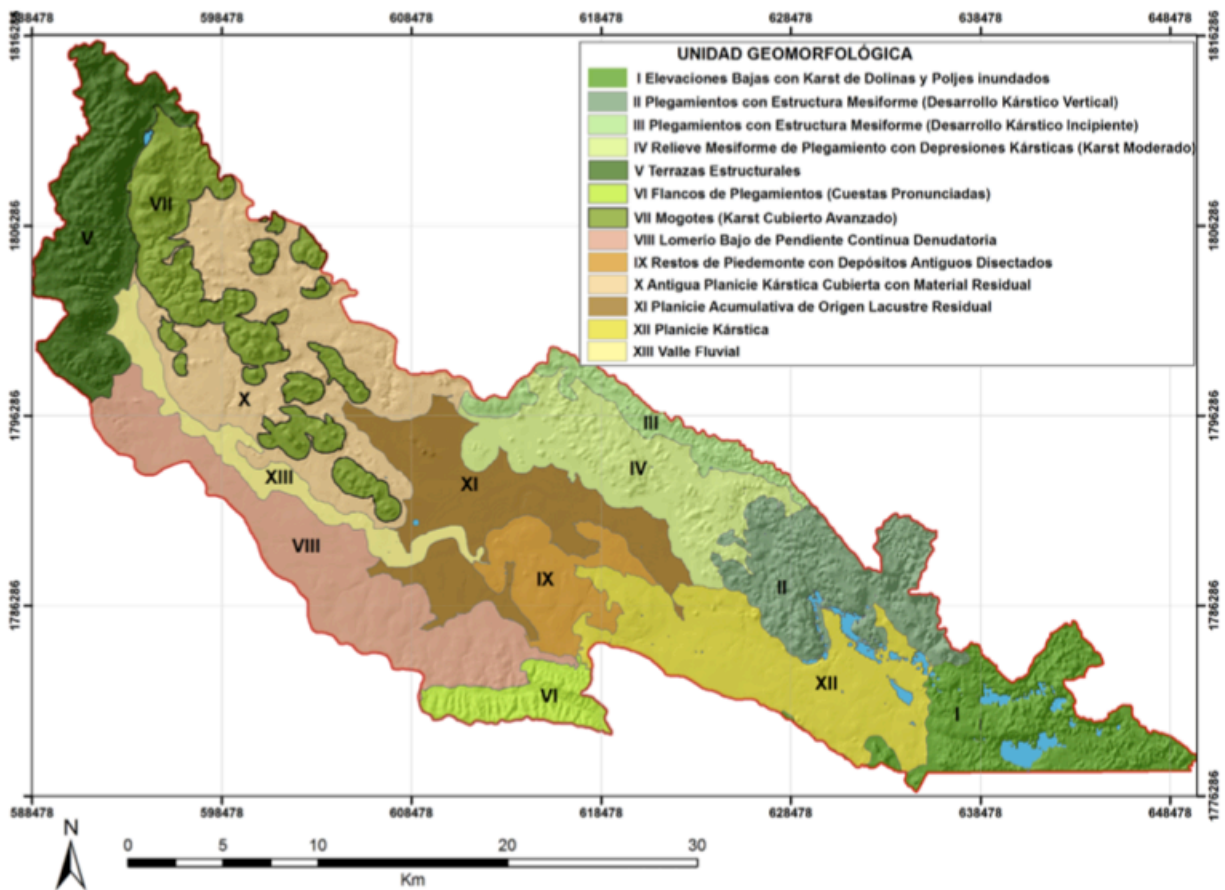


Figura 4. Delimitación de las trece unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, Chiapas. (Tomado de Mora *et al.* 2016).

Clima. Los datos de la estación meteorológica “Tzisco” (16.1°N, 91.63°W; 1475 m s.n.m.) indican que la temperatura media anual es de 17.4°C, la precipitación media anual es de 2,279 mm y la evaporación media anual es de 948 mm (CFE-GEIC, 2012a) (Fig. 5). Según la clasificación de García (2004), el clima de la región es Cb(m)(f)ig, que representa un verano largo y fresco, húmedo y con un régimen típico de precipitación en verano (CFE-GEIC, 2012a).

Los meses más calurosos del año son abril y mayo, y la temporada de cálida/lluvias se presenta entre junio y octubre, mientras que la temporada fría/seca se observa entre enero y mayo (Fig. 5). La temperatura media mensual es de 23.6°C; el mes más frío es enero, con 20.9°C de temperatura promedio, y el más cálido es abril, con un promedio de 25.6°C. La dirección del viento proviene principalmente del sur. La región no presenta heladas, comúnmente (CONAGUA 2009).

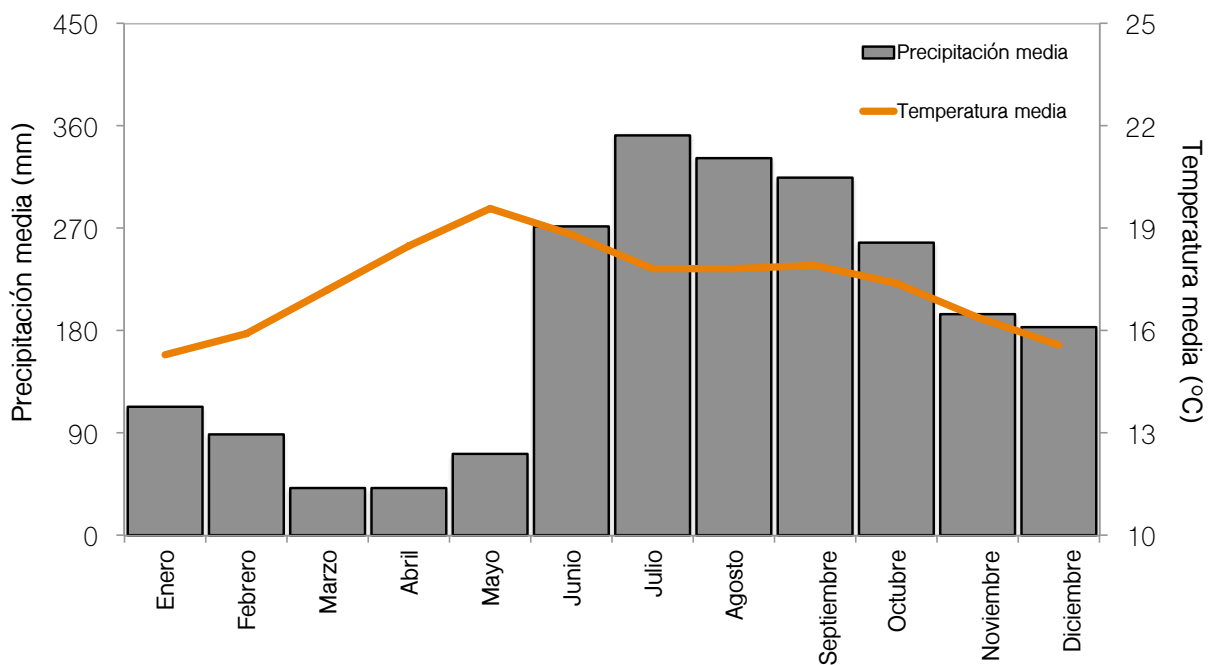


Figura 5. Temperatura (línea naranja) y precipitación media mensual (barras grises) registradas en la estación Tzisco (CFE-GEIC, 2012a).

Preparación previa de materiales

Seston. Se utilizaron filtros marca *Whatman* tipo GF/F de 47 mm de diámetro (0.7 μm de apertura nominal de poro), éstos fueron previamente combustiónados a 550°C por cuatro horas en una mufla marca *Thermolyne* modelo 48000 y posteriormente envueltos en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros, con el fin de eliminar cualquier material que pudiera estar presente en ellos. Los filtros fueron pesados en una balanza analítica marca *Sartorius* modelo CP 124 (asignada etiqueta de “Peso 1”) y posteriormente, almacenados en un desecador hasta su posterior utilización.

CTP. Se utilizaron filtros *Whatman* GF/F de 13 mm (0.7 μm de apertura nominal de poro) previamente combustiónados por cuatro horas en una mufla marca *Thermolyne* modelo 48000 a 550°C y, posteriormente, envueltos en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros, con el fin de eliminar cualquier material que pudiera estar presente en ellos y posteriormente fueron almacenados en un desecador hasta su posterior utilización.

Trabajo de campo

Se seleccionaron dieciocho lagos que representaran los distintos grados de impacto presente en los cuerpos acuáticos del PNLM. Estos se dividieron *a priori* (con base en el color aparente de sus aguas) en no impactados: Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos (Dos Lagunas), Ensueño, Esmeralda, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, San José, Tzisco y Yalalush e impactados: Balantetic, Bosque Azul, Chaj Chaj, La Encantada, Liquidambar y San Lorenzo (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM y clasificación geomorfológica (Durán *et al.* 2014) y *a priori* con base en el color aparente (Z_{MAX} = profundidad máxima, Z_{MED} = profundidad media, No Impactado = NI, impactado = I).

Lago	Etiqueta	Localización			Z_{MAX} (m)	Z_{MED} (m)	Clasificación Geomorfológica	Estado
		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (m s.n.m.)				
Liquidambar	Li	16° 09'01.8"	91° 46'52.3"	1,461	24	11.2	De Planicie	I
Chaj Chaj	Ch	16° 07'53.4"	91° 46'58.8"	1,426	12	5.3	De Planicie	I
Balantelic	Ba	16° 07'31.8"	91° 47'35.5"	1,466	3	1.7	De Planicie	I
San Lorenzo	SL	16°07'32.2"	91° 45'11.2"	1,455	67	11.8	De Planicie	I
San José	SJ	16° 06'34.0"	91° 44'29.2"	1,454	30	10.3	De Planicie	NI
Bosque Azul	BA	16° 07'7.1"	91° 43'44.4"	1,458	58	20.0	De Planicie	I
La Encantada	LE	16°07'08.1"	91° 43'37.2"	1,454	89	29.4	De Planicie	I
Esmeralda	Es	16° 07'03.4"	91° 43'39.2"	1,461	7	3.6	De Montaña	NI
Ensueño	En	16° 07'02.3"	91° 43'29.6"	1,430	35	21.6	De Montaña	NI
Agua Tinta	AT	16° 06'25.5"	91° 41'19.8"	1,465	24	14.7	De Montaña	NI
Montebello	Mo	16° 06'32.0"	91° 40'57.5"	1,490	45	12.3	De Montaña	NI
Cinco Lagos	CL	16° 06'35.6"	91°40'20.6"	1,486	162	42.5	De Montaña	NI
Pojoj	Po	16° 06'22.2"	91° 40'03.3"	1,499	198	35.2	De Montaña	NI
Kichail	Ki	16° 05'39.5"	91° 39'25.2"	1,475	2	9.5	De Montaña	NI
Tziscoao	Tz	16° 04'59.0"	91° 40'46.8"	1,490	86	28.9	De Montaña	NI
Patianú	Pa	16° 05'06."	91° 39'45.7"	1,484	26	10.8	De Montaña	NI
Yalalush	Ya	16° 05'30.3"	91° 38'47.8"	1,452	23	9.9	De Montaña	NI
Dos Lagos	DL	16° 07'02.3"	91° 43'29.6"	1,427	42	25.2	De Montaña	NI

Los muestreos se llevaron a cabo en las dos épocas hidrodinámicas contrastantes identificadas con base en un análisis de clasificación de los registros de temperatura y precipitación (Fig. 5), con fin de tener una visión más integral de la problemática: 1) Temporada 1: inicio de época cálida/lluvias (mayo 2014), donde se esperaba que los lagos suficientemente profundos para estratificarse estuvieran estratificados, y 2) Temporada 2: fría/secas (febrero 2015), asociado al invierno hemisférico, donde se esperaba que los lagos estuvieran circulando. Todos los muestreos realizados se llevaron a cabo en un intervalo de tiempo entre las 9 am y las 3 pm.

Caracterización físico-química. En la parte central y más profunda de los lagos se midieron perfiles verticales metro a metro de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica estandarizada a 25°C (K_{25}) y pH mediante una sonda multiparamétrica de calidad de agua marca *Hydrolab* modelo DS5X acoplado a un sistema de captura de información modelo SVR4a (Fig. 6). Con base en los perfiles verticales obtenidos se estimó la capa de mezcla (Z_{MIX}).

Para determinar la zona eufótica se midió la PAR con un perfilador de fluorescencia natural marca *Biospherical* modelo PNF-300 (Fig. 6). Para el cálculo de la Z_{EU} se consideró la columna de agua desde la superficie y hasta la profundidad a la cual se alcanza el 0.1% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que llega a la superficie (SPAR), que coincide con la presencia de DCMs. Cabe señalar que comúnmente es utilizado el 1% de la PAR para delimitar la Z_{EU} , sin embargo existen diversos estudios en sistemas oligotróficos donde se ha visto que existe actividad fotosintética por debajo del 1% de la SPAR (Palmer *et al.* 2013), por ello el establecimiento de un valor menor justificado por el desarrollo de DCMs en los lagos de Montebello a intensidades lumínicas inferiores al 1% de la SPAR.

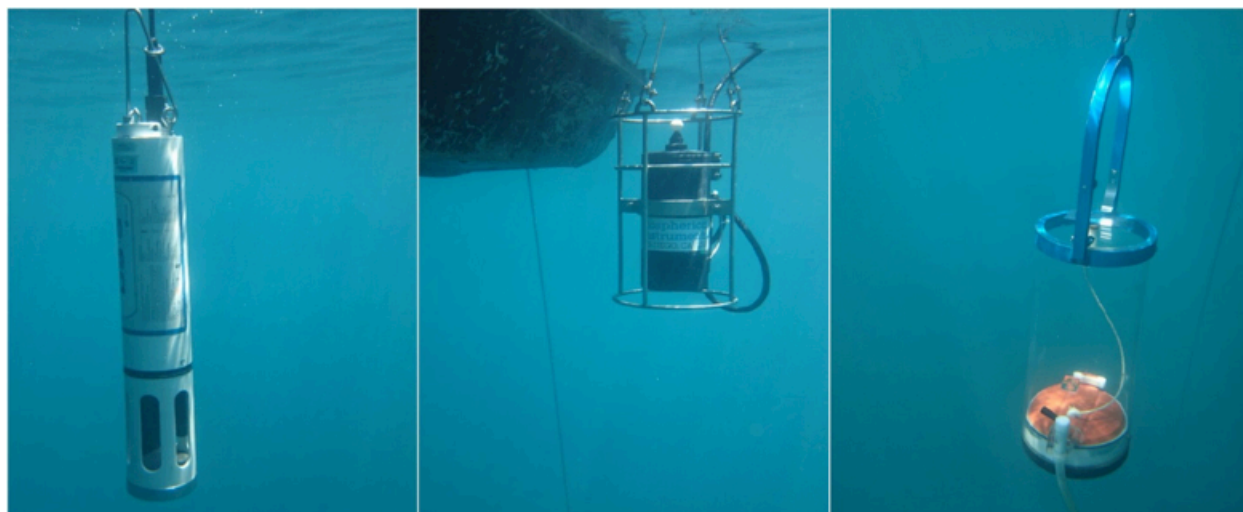


Figura 6. Equipos utilizados para la obtención del registro *in situ* de variables ambientales y muestras de agua durante el trabajo en campo. De izquierda a derecha: sonda multiparamétrica de calidad de agua *Hydrolab* DS5X, perfilador de fluorescencia natural *Biospherical* PNF-300 y botella muestreadora de agua *UWITEC*. (Fotografías: Rigel González Contreras).

Seston y CTP. Para la evaluación del seston y CTP se tomaron entre una y cinco muestras de agua a lo largo de la columna de agua, dependiendo de la profundidad de cada lago y con base en los perfiles de T y OD que se emplearon para reconocer la presencia de clinas (termo, oxi y/o haloclina). Las muestras fueron tomadas con una botella muestreadora de agua marca *UWITEC* de 5 litros de capacidad (Fig. 6). Dichas muestras fueron filtradas *in situ* a través de una malla de 100 μm de apertura para eliminar al zooplancton grande o “nadador” –que no corresponde al seston– y no afectar la precisión de la evaluación del seston (Jellison y Melack 2001, Karl *et al.* 1991).

Posteriormente, las muestras fueron colocadas en frascos limpios de polietileno previamente etiquetados y se mantuvieron en oscuridad y a baja temperatura (dentro de una hielera con una cama de hielo) para evitar su alteración durante su transporte al laboratorio (máximo 4 horas).

Trabajo de laboratorio

Seston. Las muestras de agua de cada profundidad se filtraron a través de filtros marca *Whatman* tipo GF/F de 47 mm de diámetro previamente preparados. El volumen de muestra filtrado varió entre 800 y 1,200 ml dependiendo de cada lago (menos volumen en lagos de aguas turbias y mayor volumen en lagos con aguas claras). Para la filtración de las muestras se usaron equipos de vidrio *Pyrex* con soporte de vidrio sinterizado marca *Millipore*.

El filtrado de las muestras se llevó a cabo con ayuda de una bomba de vacío a una presión de entre 0.3 y 0.5 atm para evitar la pérdida de material orgánico. Para determinar y corregir la posible contaminación por manipulación y almacenamiento de las muestras, así como la retención de sales en la matriz del filtro se utilizó un filtro como blanco. Este filtro se colocó debajo del filtro en el que se retuvo la muestra.

Después de la filtración de las muestras, los filtros se colocaron en una estufa de secado a 60°C durante 48 h (Weyhenmeyer 1997, Wetzel y Likens 2000, Jellison y Melack 2001) y se pesaron nuevamente a temperatura ambiente. La gravimetría del seston retenido en los filtros se estimó en los filtros completamente secos y pesados en el mismo comparador de masas *Mettler Toledo*, hasta alcanzar peso constante (peso seco, “Peso 2”).

CTP. Las muestras para el análisis de CTP de cada profundidad se filtraron a través de filtros *Whatman GF/F* de 13 mm previamente preparados. El volumen de muestra filtrado fue de entre 20 y 300 ml dependiendo de cada lago. Para la filtración de las muestras se usaron equipos de acero inoxidable marca *Millipore*.

El filtrado de las muestras se llevó a cabo con una bomba de vacío, a una presión de entre 0.3 y 0.5 atm para evitar la pérdida de material orgánico. La medición del CTP se realizó en un analizador elemental *Carlo Erba* ® modelo NC2100 (Veronesi *et al.* 2002) en el Center of Marine Sciences at the University of North Carolina at Wilmington.

Trabajo de gabinete

Seston. La diferencia entre el Peso 1 y el Peso 2 se relacionó primero al volumen filtrado y después se estandarizó a un litro de agua, representando así la masa total de seston (MTS en mg L⁻¹) (Eq. 1).

$$MTS = \frac{((Peso\ 2 - Peso\ 1) - Blanco)}{V}$$

MTS: masa total del seston (mg L⁻¹)

Peso 2: peso seco, filtro con muestra (mg)

Peso 1: filtro sin muestra (mg)

V: volumen filtrado (L)

Debido a que el fitoplancton contribuye en gran medida a la masa total del seston en un cuerpo acuático y este presenta una relación cercana a la dinámica del COP (carbono orgánico particulado) (Jellison y Melack 2001, Punning *et al.* 2003), el COP ha sido tomado como equivalente de la fracción orgánica del seston (turbidez orgánica).

Los valores promedio de COP utilizados en el presente trabajo fueron previamente reportados por Vargas *et al.* (2017) para los mismos lagos en estudio.

La proporción de material terrígeno y biogénico en la concentración de la masa total del seston se estimó por medio de la diferencia de la concentración de seston menos la concentración de COP (Eq. 2).

$$Mt = MTS - COP$$

Mt: Material Terrígeno

MTS: masa total del seston (mg L⁻¹)

COP: Carbono Orgánico Particulado

Análisis estadísticos. Para estudiar las relaciones que se presentan entre las variables fisicoquímicas estudiadas (T, OD, pH y K₂₅) se realizó una transformación del conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables intercorrelacionadas entre sí. Lo anterior mediante un análisis de componentes principales (ACP).

EL ACP se realizó con el valor promedio de cada variable para cada uno de los lagos y para ambas temporadas de muestreo por separado. El ACP se utilizó para revelar la estructura interna de los datos y detectar conglomerados (grupos), valores atípicos y tendencias.

Se realizaron Análisis de Varianza (ANOVA por su acrónimo en inglés, Analysis of Variance) para comparar lagos y temporadas. Se evaluaron las diferencias e interacciones entre las dos temporadas de muestreo, la profundidad y el estado utilizando como factores

fijos los criterios antes mencionados. Los análisis se realizaron siguiendo una distribución F ($\alpha=0.05$).

Por último, se evaluó la posible correlación lineal existente entre algunas de las variables en estudio. En el caso de las correlaciones lineales que incluyen a la Z_{EU} y a la Z_{MIX} como variables, se realizó una transformación en la escala de la misma (a escala logarítmica) con el fin de promover la linealidad en la relación de las dos variables. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo en R Core Team (2016).

Resultados

Capítulo 3

Es importante mencionar que no se permitió el acceso al lago Liquidambar en la temporada fría/secas por problemas ejidales, no pudiéndose realizar el muestreo respectivo en este lago.

Caracterización fisicoquímica

Temperatura. Durante la temporada cálida/lluvias se registraron temperaturas (T) en el agua que oscilaron entre 17.5°C y 26.0°C, con un promedio de 20.1±1.4°C; la temperatura mínima (T_{\min}) se registró en el hipolimnion de Montebello y la máxima (T_{\max}) se localizó en Liquidambar y San Lorenzo a nivel superficial (Tabla 2, Fig. 7). El promedio de temperatura durante la temporada fría/secas fue de 18.3±0.9°C en un intervalo de 17.1–20.7°C, con la T_{\min} observada nuevamente en el fondo de Montebello y la T_{\max} en la superficie de Balantetic (Tabla, 3, Fig. 8).

Oxígeno disuelto. La concentración de OD en el agua de los lagos durante la temporada cálida/lluvias se registró en un intervalo desde 0 (*i.e.*, por debajo de límite de detección) hasta 25.7 mg L⁻¹ con un promedio de 4.0±1.7 mg L⁻¹ (Fig. 8). La condición de anoxia se presentó en el fondo de todos los lagos a excepción de Esmeralda y Yalalush donde la concentración de OD fue de 4.5 mg L⁻¹ y 4.4 mg L⁻¹, respectivamente, lo que confirmó que estos lagos estaban circulando aún en la temporada cálida de lluvias (Tabla 2).

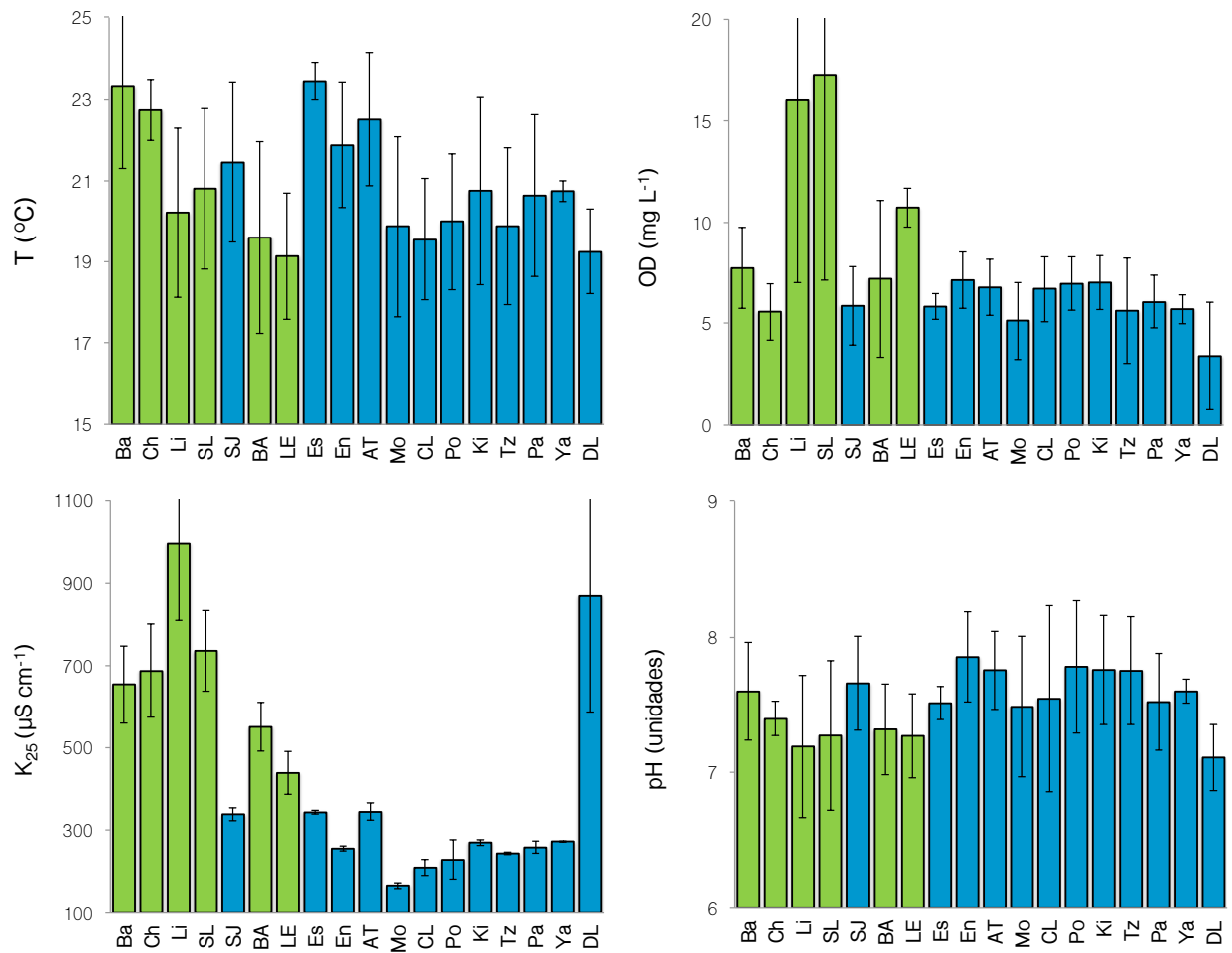


Figura 7. Valor promedio (\pm D.E.) de T, OD K₂₅ y pH durante la temporada cálida/lluvias en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. En verde lagos impactados y en azul lagos no impactados.

Durante la temporada fría/secas, el OD se registró en un intervalo de 0 a 18.2 mg L⁻¹, con un promedio de 7.2 \pm 4.4 mg L⁻¹. La OD_{máx} (18.2 mg L⁻¹) se alcanzó en la superficie de Balantetic, mientras que la OD_{mín} (0.05 mg L⁻¹) se obtuvo en el fondo de Dos Lagos, La Encantada y San Lorenzo (Tabla 3, Fig. 8).

Conductividad eléctrica (K₂₅). La conductividad eléctrica máxima (K_{25máx}) registrada en la temporada cálida/lluvias tuvo lugar en Dos Lagos con un valor de 1,429 μ S cm⁻¹,

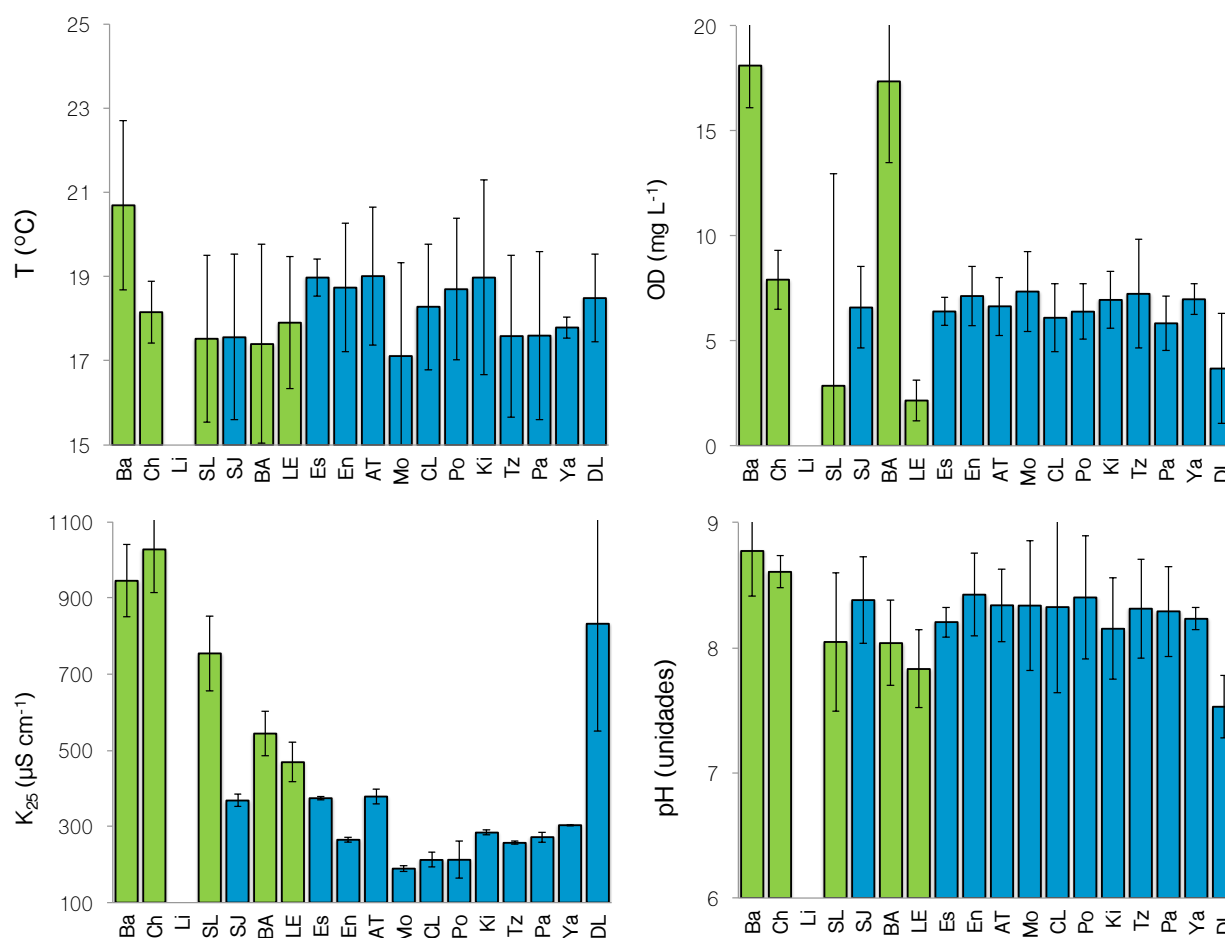


Figura 8. Valor promedio (\pm D.E.) de T, OD K₂₅ y pH durante la temporada fría/secas en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. En verde lagos impactados y en azul lagos no impactados.

mientras que la mínima fue registrada en Montebello con un valor de 156 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 2, Fig. 7). El valor promedio de la K₂₅ durante esta temporada fue de $436 \pm 250 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Durante la temporada fría/secas el valor promedio de K₂₅ fue de $452 \pm 271 \mu\text{S cm}^{-1}$. El valor K_{25máx} fue registrado en Dos Lagos ($1,545 \mu\text{S cm}^{-1}$), mientras que el valor mínimo $179 \mu\text{S cm}^{-1}$ fue registrado en Montebello (Tabla 3, Fig. 8).

Con base en los registros de K₂₅, los lagos del PNLM se clasificaron en dos grupos:

1. Los relativamente más “concentrados”, con valores superiores a 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en ambas temporadas de muestreo: Liquidambar, Balantetic, Chaj Chaj, Bosque Azul, San Lorenzo y Dos lagos.

2. Los “diluidos”, con valores inferiores a 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en ambas temporadas de muestreo: San José, La Encantada, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Kichail, Tziscoa, Patianú y Yalalush.

Tabla 2. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E.) de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}), pH en y profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y capa de mezcla (Z_{MIX}) en los lagos de estudio del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante la temporada cálida/lluvias. * = Toda la columna de agua; - = sin datos; Z_{MED} = Profundidad media.

Lago	Z_{MED} (m)	T ($^{\circ}\text{C}$)		OD(mg L^{-1})		pH (unidades)		K_{25} ($\mu\text{S cm}^{-1}$)		Z_{EU} (m)	Z_{MIX} (m)
		X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.		
Ba	1.7	23.3	2.02	5.2	4.59	7.6	0.36	654	94.47	3.0*	3.0*
Ch	5.3	22.7	0.74	3.5	3.08	7.4	0.13	686	113.3	1.8	12.0*
Li	11.2	20.2	2.10	2.4	6.56	7.2	0.53	995	185.5	2.9	4.0
SL	11.8	20.8	1.99	2.9	7.52	7.3	0.55	736	98.45	-	1.0
SJ	10.3	21.4	1.97	4.1	3.20	7.7	0.35	338	15.78	21.7*	6.8
BA	20.0	19.6	2.36	1.7	3.55	7.3	0.34	550	58.83	3.6	7.0
LE	29.4	19.1	1.57	1.0	3.19	7.3	0.31	438	51.84	4.1	5.0
Es	3.6	23.4	0.45	5.8	0.66	7.5	0.12	342	4.28	7.0*	7.0*
En	21.6	21.9	1.54	6.5	2.41	7.9	0.33	254	6.05	35.0*	16.0
AT	14.7	22.5	1.64	5.7	2.88	7.8	0.29	343	20.79	20.3*	12.0
Mo	12.3	19.9	2.23	2.7	2.91	7.5	0.52	165	7.45	18.7	16.0*
CL	42.5	19.5	1.50	4.5	3.40	7.5	0.69	208	19.73	36.1	24.0
Po	35.2	20.0	1.68	4.7	3.46	7.8	0.49	227	48.32	73.1*	24.0
Ki	9.5	20.7	2.31	5.3	3.27	7.8	0.40	269	7.22	18.9*	4.0
Tz	28.9	19.9	1.93	5.0	3.03	7.7	0.40	243	3.29	70.0*	23.0
Pa	10.8	20.6	2.00	4.6	3.28	7.5	0.36	257	14.08	14.1*	11.0*
Ya	9.9	20.7	0.26	5.7	0.72	7.6	0.09	272	1.68	13.1	23.0*
DL	25.2	19.3	1.05	1.7	2.49	7.1	0.25	869	282.3	27.3	5.0

pH. Durante la temporada cálida/lluvias el valor promedio del pH registrado fue 7.4 ± 0.2 . El valor mínimo (5.1) se observó en Cinco Lagos, mientras que el máximo (8.9) se midió en Liquidambar y San Lorenzo (Fig. 7). Durante la temporada cálida/lluvias el valor promedio del pH fue 8.3 ± 0.3 . El valor mínimo (7.2) fue registrado en Dos Lagos mientras que el máximo (8.8) fue obtenido en Balantetic (Fig. 8).

Zona eufótica (Z_{EU}). Las Z_{EU} de los cuerpos acuáticos durante la temporada cálida/lluvias se registraron en un intervalo de 1.8–73.1 m, siendo Chaj Chaj el lago con una Z_{EU} menor y Pojoj el lago con la Z_{EU} más profunda (Tabla 2). El valor promedio durante esta temporada

Tabla 3. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E.) de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}), pH en y profundidad de la zona eufótica (Z_{EU}) y capa de mezcla (Z_{MIX}) en los lagos de estudio del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante la temporada fría/secas. * = Toda la columna de agua; - = sin datos; Z_{MED} = Profundidad media.

Lago	Z_{MED} (m)	T (°C)		OD(mg L ⁻¹)		pH (unidades)		K_{25} (μ S cm ⁻¹)		Z_{EU} (m)	Z_{MIX} (m)
		X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.		
Ba	1.7	20.7	0.04	7.9	0.12	8.8	0.02	945	1.20	3.0*	3.0*
Ch	5.3	18.2	0.06	18.1	1.12	8.6	0.02	1028	5.63	-	-
Li	11.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SL	11.8	17.5	0.25	2.3	2.88	8.0	0.22	754	8.37	2.8	67.0*
SJ	10.3	17.6	0.58	6.6	0.76	8.4	0.06	368	1.15	12.7	30.0*
BA	20.0	17.4	0.02	17.4	0.38	8.0	0.04	544	7.03	6.7	58.0*
LE	29.4	17.9	0.04	1.3	1.59	7.8	0.13	469	6.72	9.3	89.0*
Es	3.6	19.0	0.02	6.4	0.03	8.2	0.03	374	0.55	7.0*	7.0*
En	21.6	18.7	0.26	7.1	0.06	8.4	0.03	265	0.26	35.0*	35.0*
AT	14.7	19.9	0.40	6.6	0.18	8.3	0.03	379	0.41	15.7*	24.0*
Mo	12.3	17.1	0.07	7.3	0.16	8.3	0.03	189	1.53	38.3*	45.0*
CL	42.5	18.3	0.07	6.1	0.10	8.3	0.01	212	0.14	48.0*	162.0*
Po	35.2	18.7	0.14	6.4	0.06	8.4	0.03	212	0.96	-	198.0*
Ki	9.5	18.0	0.02	7.0	0.17	8.2	0.02	284	0.43	19.5*	22.0*
Tz	28.9	17.6	0.14	7.2	0.10	8.3	0.03	257	0.32	36.9	86.0*
Pa	10.8	17.6	0.32	5.8	1.36	8.3	0.17	272	5.22	17.9*	26.0*
Ya	9.9	17.8	0.39	7.0	0.17	8.2	0.08	303	0.55	23.0*	23.0*
DL	25.2	18.5	0.27	2.6	2.50	7.5	0.26	832	308.4	27.7	12.0

fue 21.8 ± 22.5 m. Durante la temporada fría/secas la Z_{EU} máxima se presentó en Cinco Lagos (48.8 m), mientras que la Z_{EU} mínima se registró en San Lorenzo (2.8 m) con un promedio general de 22.6 ± 14.5 m (Tabla 3).

En ambas temporadas los lagos considerados prístinos presentaron Z_{EU} superiores a 13 m. En contraste, los lagos denominados impactados tuvieron como máximo Z_{EU} de 4 m (Tablas 2 y 3). En general los lagos impactados presentaron valores de Z_{EU} cerca de cinco veces menores en contraste con los prístinos, evidenciando en estos últimos una mayor transparencia en sus aguas, relacionado con una mayor presencia de material particulado y por ende menor penetración de la luz.

Capa de mezcla (Z_{MIX}). San Lorenzo fue el lago que presentó el valor mínimo de Z_{MIX} (1 m) durante la temporada cálida/lluvias y Pojoj el lago con el valor más alto (24 m). El promedio durante la temporada 1 fue 11.3 ± 7.9 m. Durante la temporada fría/seca y a excepción de Dos Lagos, la Z_{MIX} abarcó toda la columna de agua debido a que los lagos se encontraban circulando (Tabla 3).

Análisis de Componentes Principales (ACP)

La descripción de los resultados del ACP realizado para cada temporada de muestreo por separado se hizo tomando en cuenta los dos primeros componentes obtenidos. Estos componentes explicaron en conjunto el 86% de la variación total durante la temporada cálida/lluvias y el 74% durante la temporada fría/secas y permitieron una representación gráfica en dos dimensiones con el fin de analizar la estructura de los datos.

El análisis mostró que durante la temporada cálida/lluvias, el OD, el pH y la K_{25} tuvieron la correlación más fuerte con el Componente 1 y este explicó el 56% de la variación total, siendo el pH la variable con más peso dentro del componente. En el Componente 2, la T y la Z_{EU} fueron las variables con correlación mayor y explicó el 30% de

la variación total, siendo la T la variable con mayor peso en el componente, seguido de la Z_{EU} (Tabla 4).

En la figura 9 se puede observar que los lagos no impactados se agrupan por separado de los lagos impactados. La Z_{EU} y K_{25} fueron las dos variables que diferenciaron más fuertemente a los lagos impactados de los no impactados. Los lagos no impactados se caracterizan por tener concentraciones de OD elevadas, T bajas, valores de K_{25} bajos, pH mayores y Z_{EU} superiores en comparación con los lagos impactados que se reúnen con un patrón opuesto.

Durante la temporada fría/secas, la T, el OD y el pH presentaron la correlación más fuerte con el Componente 1 y explicaron el 46% de la variación total. El pH fue la variable con más peso dentro de este componente. En el Componente 2, Z_{EU} y K_{25} fueron las variables más correlacionadas, en general explicando el 28% de la variación total. La Z_{EU} fue el parámetro con mayor peso dentro del componente (Tabla 4).

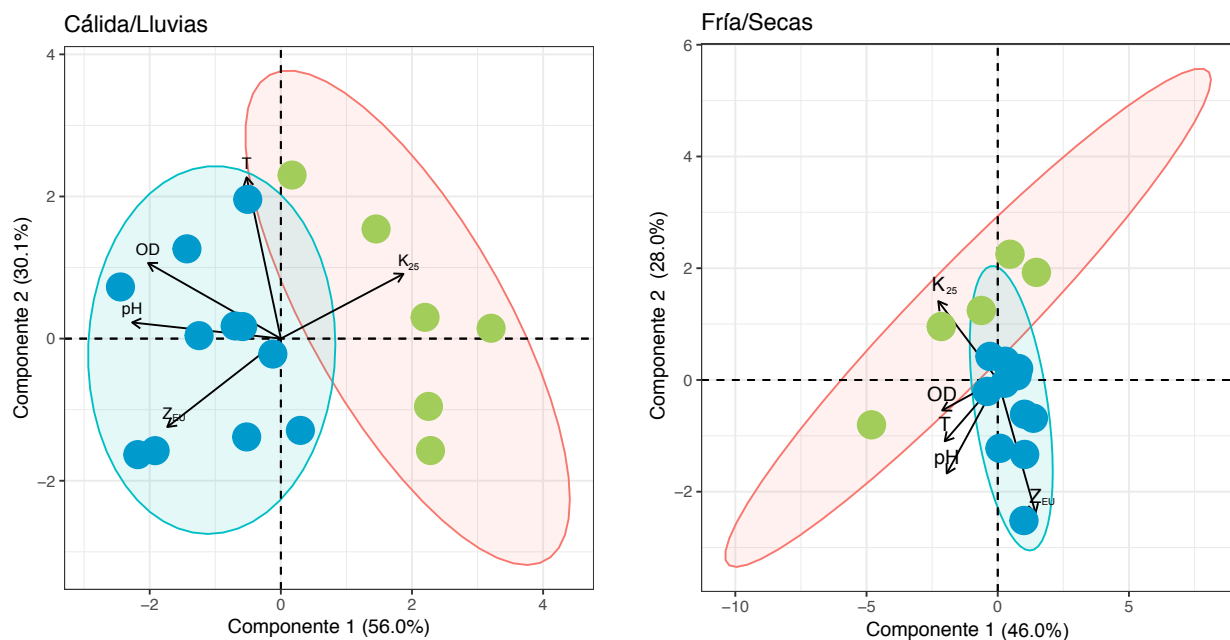


Figura 9. Representación bidimensional de los dos primeros componentes principales para la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha). En verde lagos impactados y en azul lagos no impactados.

Los lagos no impactados se agruparon una vez más por separado de los lagos impactados. Los lagos impactados se caracterizan por un contenido de OD menor (en general), T elevadas, K_{25} alta, pH menor y Z_{EU} reducidas en contraste con los lagos no impactados, que muestran un patrón inverso (Fig. 9).

Tabla 4. Matriz de componentes, valores propios de las variables originales evaluadas y varianza total explicada, obtenidos del ACP para las variables fisicoquímicas durante las dos temporadas de muestreo.

Variable	Temporada cálida/lluvias		Temporada fría/secas	
	Componente 1	Componente 2	Componente 1	Componente 2
Temperatura	-0.130	0.769	-0.457	-0.317
Oxígeno Disuelto	-0.506	0.361	-0.479	-0.158
Conductividad eléctrica	0.467	0.309	-0.439	-0.484
pH	-0.567		-0.512	0.408
Z_{EU}	-0.433	-0.421	0.326	-0.688
Desviación Estándar	1.68	1.24	1.52	1.19
Proporción de varianza	0.56	0.30	0.46	0.28
Proporción acumulada	0.56	0.86	0.46	0.74

En ambas temporadas de muestreo, las cinco variables fisicoquímicas medidas se agruparon de manera similar, denotando dos conjuntos bien establecidos, los lagos *prístinos* y los *impactados*, confirmando que la caracterización realizada en campo *a priori* y con base en el color aparente de sus aguas fue adecuada. Esta exploración de la fisicoquímica del agua permitió que, a partir de este momento, lo que inició como una observación en campo sea un argumento robusto para determinar la clasificación de los cuerpos de agua.

Descripción de perfiles verticales

Temperatura. Durante la temporada cálida/lluvias todos los lagos presentaron estratificación térmica, exceptuando a Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush, los cuales se encontraron circulando. En la temporada fría/secas, todos los lagos mostraron temperaturas homogéneas a lo largo de toda la columna de agua, sugiriendo circulación (mezcla) en la misma. Los lagos fueron separados en tres grupos basados en la dinámica térmica de cada uno de ellos:

I. Profundos/holomícticos, monomícticos cálidos, aquellos que se mezclaron una vez al año en coincidencia con el invierno hemisférico: Agua Tinta, Bosque Azul, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, La Encantada, Kichail, Liquidambar, Montebello, Patianú, San José, San Lorenzo, Pojoj y Tzisco.

II. Funcionalmente someros/holomícticos, polimícticos cálidos, lagos que tienen un comportamiento similar a lagos de poca profundidad donde toda la columna de agua se mezcla con frecuencia (Scheffer 2004): Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush.

III. Profundo/meromíctico, mixolimnion monomíctico cálido: Dos Lagos presentó una mezcla vertical incompleta. El mixolimnion se comportó como monomíctico cálido.

Con base en los perfiles verticales de temperatura, se distinguieron dos grupos predominantes de lagos, profundos y funcionalmente someros. Este criterio de clasificación, aunado a la clasificación por estado (prístino y impactado), permitirán separar a los dieciocho lagos pertenecientes al PNLM en cuatro grupos (a. prístinos–funcionalmente someros, b. prístinos–profundos, c. impactados–funcionalmente someros y d. impactados–profundos) y así identificar diferencias entre los mismos.

Los lagos impactados-profundos presentaron termoclinas superficiales (0-1 m) y amplias (en promedio 6.0 ± 2.0 m) en contraste con los lagos prístinos-profundos que presentaron una termoclina a mayor profundidad (7-25 m) y con menor amplitud (4.0 ± 2.2 m). En los lagos impactados el gradiente térmico que se presentó en el metalimnion fue de $0.8 \pm 0.2^\circ\text{C m}^{-1}$ en contraste con los lagos prístinos que presentaron un gradiente de $0.5 \pm 0.1^\circ\text{C m}^{-1}$. En promedio, los lagos profundos del PNLM durante la temporada cálida/lluvias presentaron un gradiente térmico de $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C m}^{-1}$. En la temporada fría/secas, todos los lagos presentaron temperaturas homogéneas a lo largo de toda la columna de agua sugiriendo circulación en la misma.

Oxígeno Disuelto. Los lagos impactados-profundos presentaron oxiclina superficiales (0-1 m) y angostas (en promedio 4.0 ± 1.7 m) en contraste con los lagos prístinos-profundos que presentaron oxiclina a mayor profundidad (4-26 m) y amplias (19.0 ± 16.9 m). En los lagos impactados el gradiente de OD que se presentó en la oxiclina fue 3.9 ± 2.4 mg OD m^{-1} en contraste con los lagos prístinos que presentaron un gradiente de 0.6 ± 0.4 mg OD m^{-1} en la oxiclina. Los dos lagos impactados-funcionalmente someros presentaron el fondo anóxico, a pesar de mostrar perfiles homotermos, probablemente debido a la alta carga de materia orgánica que se deposita en el fondo, lo que conduce al rápido consumo de OD.

En general los lagos del PNLM durante la temporada cálida/lluvias presentaron un gradiente de OD de 1.7 ± 2.2 mg OD m^{-1} . Con base en los registros de OD se distinguieron cinco tipos de lagos (Tabla 5):

- I. Lagos que presentaron toda la columna de agua bien oxigenada en ambas temporadas:
Esmeralda y Yalalush (prístinos-funcionalmente someros).

- II. Lagos que presentaron toda la columna de agua bien oxigenada en fría/secas y anoxia en el fondo a pesar de estar homotermos durante la cálida/lluvias: Chaj Chaj y Balantetic (impactados–funcionalmente someros).
- III. Lagos que presentaron anoxia hipolimnética durante la estratificación y aguas oxigenadas durante la circulación: lagos profundos, prístinos e impactados, salvo La Encantada y San Lorenzo.
- IV. Lagos que presentaron anoxia en ambas temporadas a pesar de estar homotermos en fría/secas: La Encantada y San Lorenzo.
- V. Lagos meromóctico, con monimolimnion anóxico y el mixolimnion oxigenado: Dos Lagos.

Tabla 5. Presencia/ausencia de clinas en los lagos del PNLM durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas. X = presencia, - = sin datos.

Lago	Temporada cálida/lluvias			Temporada fría/secas		
	Termoclina	Oxiclina	Haloclina	Termoclina	Oxiclina	Haloclina
Ba		X				
Ch		X	X			
Li	X	X	X	-	-	-
SL	X	X	X		X	
SJ	X	X	X			
BA	X	X	X			
LE	X	X	X		X	
Es						
En	X	X				
AT	X	X	X			
Mo	X	X				
CL	X	X	X			
Po	X	X	X			
Ki	X	X				
Tz	X	X	X			
Pa	X	X	X			
Ya						
DL	X	X	X		X	X

Conductividad Eléctrica. Durante de la temporada cálida/lluvias, a excepción de Balantetic que mostró un perfil homogéneo de K_{25} a lo largo de la columna de agua, los demás lagos impactados (someros y profundos) mostraron la presencia de una haloclina superficial (0–6 m) y angosta (6.6 ± 3.6 m). Por otro lado, los lagos prístinos que presentaron haloclina fueron: Agua Tinta, Cinco Lagos, San José, Pojoj y Tzisco, siendo ésta profunda (9–69 m) y amplia (20.0 ± 11.9 m). Para los lagos impactados el gradiente de K_{25} que se presentó en la haloclina fue de $0.2 \pm 0.5 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ en contraste con los lagos prístinos que presentaron un gradiente de $0.1 \pm 0.07 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ en la haloclina. En general los lagos del PNLM durante la temporada cálida/lluvias presentaron un gradiente de K_{25} de $0.1 \pm 0.4 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Lagos prístinos-funcionalmente someros (Esmeralda y Yalalush)

Dentro de esta clasificación los lagos no presentaron estratificación térmica durante la temporada cálida/lluvias. El valor mínimo de $T_{\text{mín}}$ fue registrado en el fondo de Yalalush (20.4°C) y la $T_{\text{máx}}$ (23.9°C) en la superficie de Esmeralda (Tabla 5). El OD presentó perfiles verticales ortogrados en los dos lagos. La K_{25} mostró valores homogéneos a lo largo de ambas columnas de agua. En la temporada fría/seca, T, OD, K_{25} y pH mostraron perfiles

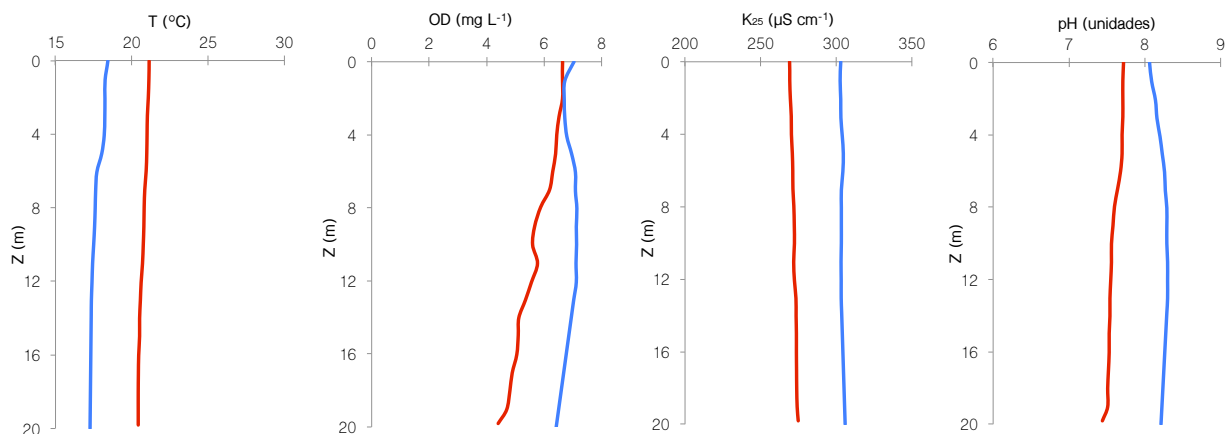


Figura 10. Perfiles verticales de T, OD, K_{25} y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Yalalush, ejemplificando un lago prístino-funcionalmente somero.

homogéneos a lo largo de la columna de agua, indicando que los lagos se encontraban circulando (Tabla 6, Fig. 10).

Lagos impactados-funcionalmente someros (Balantetic y Chaj Chaj)

Durante la temporada cálida/lluvias, el valor mínimo de temperatura (T_{\min}) fue registrado en el fondo de Chaj Chaj (21.2°C) y la T_{\max} (25.6°C) en la superficie de Balantetic. A pesar de no estar estratificados térmicamente, ambos lagos presentaron perfiles de OD clinogrados, alcanzándose la anoxia en los últimos metros de profundidad debido a la alta carga de materia orgánica que se deposita en el fondo, como se había mencionada con anterioridad. En la temporada fría/seca, T, OD (columna de agua oxigenada en su totalidad), K_{25} y pH mostraron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua, indicando que los lagos se encontraban circulando (Tabla 6, Fig. 11).

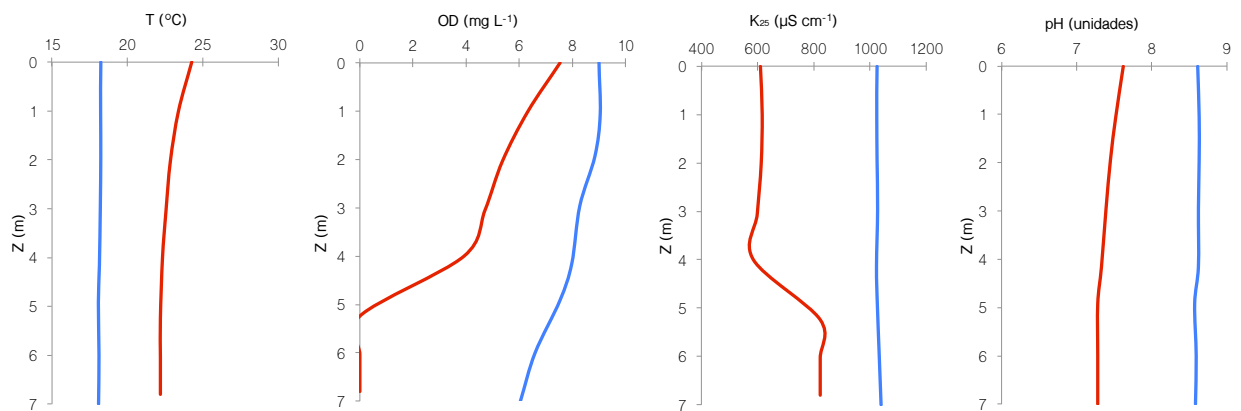


Figura 11. Perfiles verticales de T, OD, K_{25} y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Chaj Chaj, ejemplificando un lago impactado-funcionalmente somero.

Lagos prístinos-profundos (Agua Tinta, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Kichail, Montebello, Patianú, Pojoj, San José y Tziscoa)

Todos los lagos dentro de esta clasificación presentaron estratificación térmica durante la temporada cálida/lluvias. El gradiente térmico promedio fue $0.5 \pm 0.1^\circ\text{C m}^{-1}$. El OD presentó perfiles verticales clinogrados en todos los lagos, alcanzándose la anoxia en el

fondo. La K_{25} muestra valores ligeramente menores cerca de la superficie para aumentar conforme disminuye la profundidad (Fig. 12). En la temporada fría/seca T, OD, K_{25} y pH mostraron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua, indicando que los lagos se encontraban circulando a excepción de Dos Lagos, que presentó meromixis con los primeros 15 m estratificados térmicamente, un perfil de OD clinogrado y un perfil de K_{25} heterogéneo, así como presencia de una haloclina que confirma se trata de un lago meromítico (Tabla 6, Fig.12).

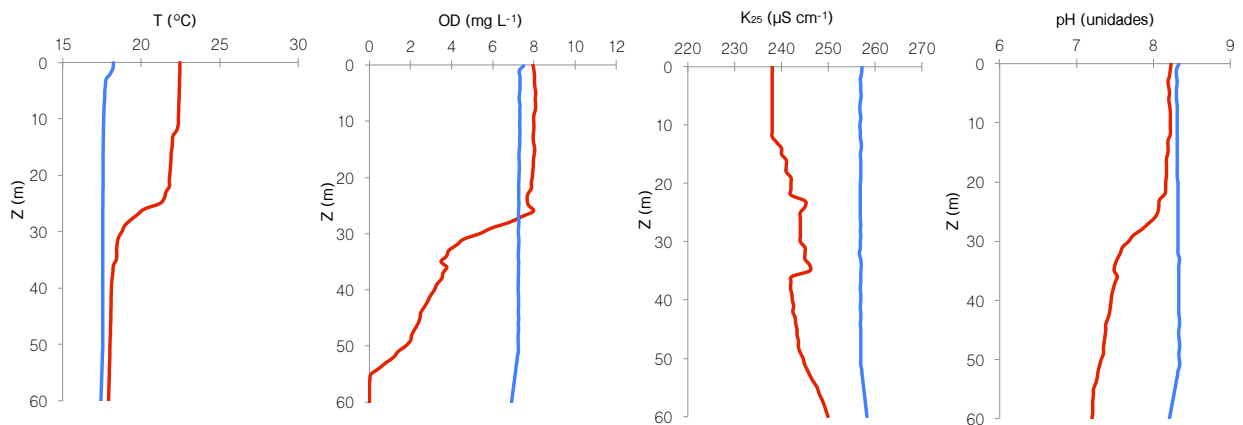


Figura 12. Perfiles verticales de T, OD, K_{25} y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Tziscoa, ejemplificando un lago prístino-profundo.

Lagos impactados-profundos (Bosque Azul, La Encantada, Liquidambar y San Lorenzo)

Dentro de esta clasificación, todos los lagos presentaron estratificación térmica durante la temporada cálida/lluvias. Los cuatro lagos pertenecientes a este grupo mostraron termoclinas superficiales con un gradiente promedio de $0.8 \pm 0.2^\circ\text{C m}^{-1}$. En todos los lagos el OD presentó perfiles verticales clinogrados, alcanzándose la anoxia en los primeros metros de profundidad. Los cuatro lagos presentaron haloclinas superficiales y estrechas (en promedio 7.0 ± 1.8 m). En la temporada fría/seca T, OD (columna de agua oxigenada en su totalidad), K_{25} y pH mostraron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua, indicando que los lagos se encontraban circulando (Tabla 6, Fig. 13).

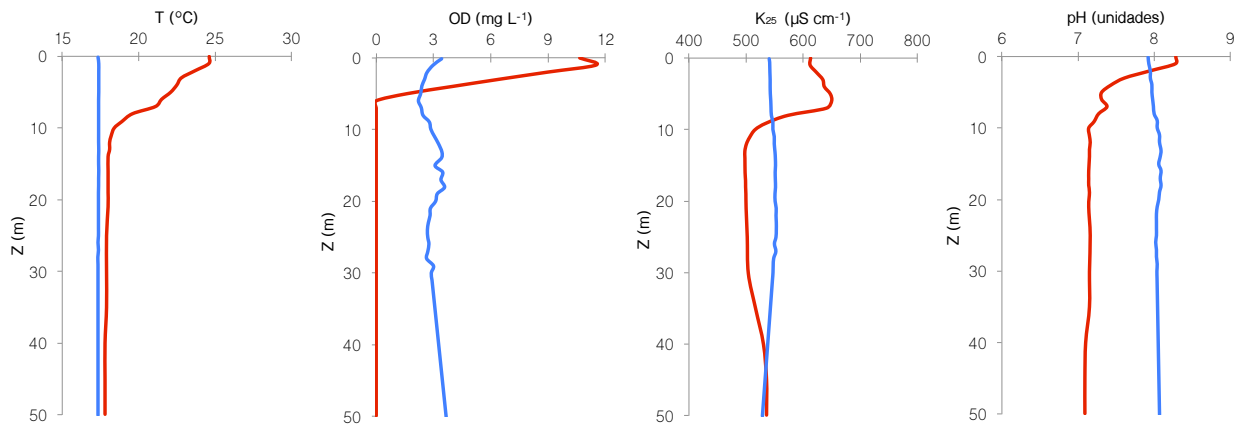


Figura 13. Perfiles verticales de T, OD, K_{25} y pH para ambas temporadas de muestreo (cálida/lluvias línea roja y fría/secas línea azul) registrados en Bosque Azul, ejemplificando un lago impactado-profundo.

Tabla 6. Promedio (X) \pm desviación estándar (D.E.) de temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}), pH y Z_{EU} en los diferentes grupos establecidos del PNLM.

Cálida/lluvias										
Grupo	T (°C)		OD (mg L ⁻¹)		K_{25} (µS cm ⁻¹)		pH (unidades)		Z_{EU} (m)	
	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.
Imp-Fsom	23.02	0.41	4.32	1.18	670.26	22.86	7.50	0.14	2.6	1.06
Imp-Prof	19.93	0.73	1.99	0.82	679.86	243.50	7.26	0.05	3.5	0.60
Pris-Fsom	22.09	1.90	5.75	0.07	307.18	49.70	7.55	0.06	10.1	4.31
Pris-Prof	20.57	1.07	4.48	1.40	317.44	201.10	7.62	0.22	33.4	21.27

Fría/secas										
Grupo	T (C°)		OD (mg L ⁻¹)		K_{25} (µS cm ⁻¹)		pH (unidades)		Z_{EU} (m)	
	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.	X	D.E.
Imp-Fsom	19.43	1.80	13.0	7.21	986.46	58.25	8.7	0.1	-	-
Imp-Prof	17.61	0.26	7.5	8.99	589.08	148.10	8.0	0.1	6.3	3.27
Pris-Fsom	18.39	0.84	6.7	0.41	338.79	50.12	8.2	0.0	23.0	-
Pris-Prof	18.21	0.69	6.4	1.37	327.09	188.17	8.2	0.3	28.0	12.22

Seston

Durante la temporada cálida/lluvias se obtuvieron concentraciones de seston (S) en la columna agua que oscilaron entre 0.4 mg L⁻¹ y 21.1 mg L⁻¹, con un promedio de 4.6±5.5 mg L⁻¹. La concentración mínima (S_{mín}) tuvo lugar en Ensueño a 5 m de profundidad, mientras que la concentración máxima (S_{máx}) se registró en la superficie de Balantetic (21.1 mg L⁻¹) (Fig. 14). Durante la temporada fría/seca, S_{mín} fue de 0.2 mg L⁻¹ y la S_{máx} fue 18.5 mg L⁻¹, y fueron registradas en Yalalush a 12 m de profundidad y San Lorenzo en superficie, respectivamente. La concentración promedio de seston durante esta temporada fue de 3.8±4.0 mg L⁻¹ (Fig. 14).

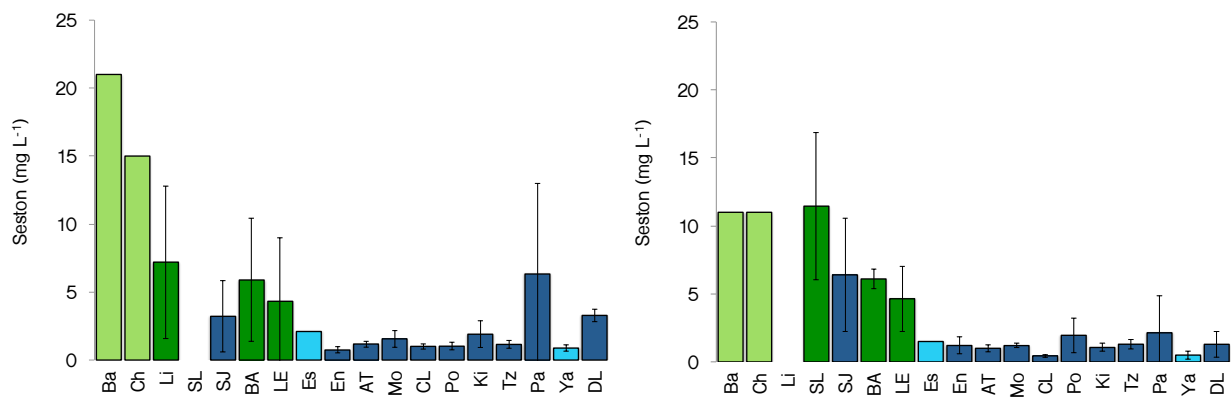


Figura 14. Concentración promedio (\pm D.E.) de seston durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha) en los lagos estudiados del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. En verde claro lagos impactados-funcionalmente someros, en verde oscuro lagos impactados-profundos, en azul claro lagos prístinos-funcionalmente someros y en azul oscuro lagos prístinos-profundos.

Tabla 7. Concentraciones mínima y máxima (ubicación), promedio \pm desviación estándar (D.E.) del seston (mg L^{-1}) en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante las temporadas estudiadas. * = solo una profundidad muestreada, - = sin datos.

Lago	Temporada cálida/lluvias			Temporada fría/secas		
	Mínimo (ubicación)	Máximo (ubicación)	Promedio (D.E.)	Mínimo (ubicación)	Máximo (ubicación)	Promedio (D.E.)
Ba	*	*	14.7*	*	*	11.0*
Ch	*	*	21.1*	*	*	11.2*
Li	3.7 (fondo)	15.5 (superficie)	7.2 (± 5.6)	-	-	-
SL	-	-	-	6.9 (fondo)	18.1 (superficie)	11.5 (± 5.4)
SJ	1.0 (superficie)	7.4 (fondo)	3.2 (± 2.6)	2.4 (superficie)	10.7 (fondo)	6.4 (± 4.2)
BA	0.1 (fondo)	10.4 (superficie)	5.9 (± 4.5)	5.3 (superficie)	6.8 (media agua)	6.1 (± 0.7)
LE	1.2 (fondo)	11.2 (superficie)	4.3 (± 4.7)	3.1 (media agua)	8.9 (superficie)	4.6 (± 2.4)
Es	*	*	2.1*	*	*	1.5*
En	0.4 (superficie)	1.1 (fondo)	0.7 (± 0.2)	1.5 (fondo)	2.1 (media agua)	1.2 (± 0.6)
AT	0.8 (superficie)	1.4 (fondo)	1.2 (± 0.2)	0.8 (fondo)	1.4 (media agua)	1.0 (± 0.3)
Mo	1.0 (superficie)	2.4 (media agua)	1.6 (± 0.6)	0.9 (superficie)	1.4 (fondo)	1.2 (± 0.2)
CL	0.8 (superficie)	1.3 (fondo)	1.0 (± 0.2)	0.3 (superficie)	0.6 (media agua)	0.4 (± 0.1)
Po	0.7 (media agua)	1.4 (superficie)	1.0 (± 0.3)	0.8 (media agua)	3.9 (media agua)	2.0 (± 1.3)
Ki	1.1 (superficie)	3.1 (fondo)	1.9 (± 1.0)	0.7 (media agua)	1.5 (fondo)	1.1 (± 0.3)
Tz	0.8 (media agua)	1.5 (superficie)	1.2 (± 0.3)	1.0 (fondo)	1.9 (superficie)	1.3 (± 0.3)
Pa	1.3 (media agua)	15.2 (fondo)	6.3 (± 6.7)	0.8 (superficie)	7.0 (fondo)	2.1 (± 2.3)
Ya	0.7 (superficie)	1.3 (fondo)	1.9 (± 0.2)	0.2 (superficie)	0.7 (media agua)	0.5 (± 0.3)
DL	2.7 (media agua)	4.0 (fondo)	3.3 (± 0.5)	0.4 (media agua)	2.9 (fondo)	1.3 (± 0.9)

Descripción por grupos

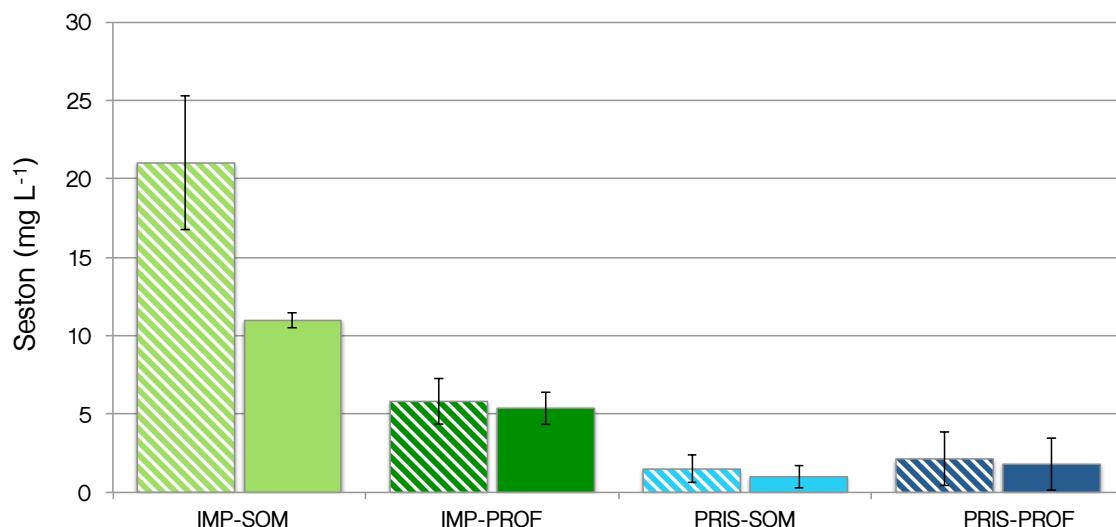


Figura 15. Concentración promedio (\pm D.E) de seston durante la temporada cálida/lluvias (barras rayadas) y la temporada fría/secas (barras sólidas) en los diferentes grupos establecidos del PNLM. IMP = impactado, SOM = funcionalmente somero, PRIS = prístino y PROF = profundo.

Tabla 8. Concentración promedio (\pm D.E) de seston (mg L^{-1}) durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas en los diferentes grupos establecidos del PNLM. IMP = impactado, SOM = funcionalmente somero, PRIS = prístino y PROF = profundo.

Grupo	Temporada cálida/Lluvias		Temporada fría/Secas	
	X	D.E.	X	D.E.
Imp-Fsom	21.00	4.24	11.00	0.50
Imp-Prof	5.17	1.72	4.10	2.46
Pris-Fsom	1.49	0.86	1.00	0.71
Pris-Prof	2.10	1.78	1.80	1.68

Lagos impactados-funcionalmente someros

En ambas temporadas este grupo de lagos presentó las concentraciones más elevadas de seston registradas en los lagos del PNLM (Tabla 8, Fig. 15). Dichas concentraciones fueron cerca de seis veces mayores en comparación sus homólogos prístinos.

Lagos prístinos-funcionalmente someros

Durante la temporada cálida/lluvias se presentó un perfil vertical heterogéneo (variación > a dos veces el valor de la desviación estándar, D.E.) a lo largo de la columna de agua de Yalalush. En contraparte, durante la temporada fría/secas se encontró un perfil homogéneo (variación < a dos veces el valor de la D.E.). En ambas temporadas este grupo de lagos presentó las concentraciones más bajas de seston registradas en los lagos del PNLM (Tabla 8, Fig. 15).

Lagos prístinos-profundos

Todos los lagos pertenecientes a este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos (variación > dos veces el valor de la D.E.) durante la temporada cálida/lluvias. Nuevamente durante la temporada fría/secas todos los lagos incluidos en este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos, a excepción de San José que presentó un perfil vertical homogéneo (variación < dos veces el valor de la D.E.). En general los lagos prístinos-profundos mostraron concentraciones de seston más elevadas con respecto a los lagos prístinos-funcionalmente someros (Tabla 8, Fig. 17).

Lagos impactados-profundos

Todo el conjunto de lagos pertenecientes a este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos (variación > dos veces el valor de la D.E.) durante la temporada cálida/lluvias (Fig. 16). De igual manera durante la temporada fría/secas todos los lagos incluidos en este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos, a excepción de Bosque Azul que presentó un perfil vertical homogéneo (variación < dos veces el valor de la D.E.). En general los lagos impactados-funcionalmente someros mostraron concentraciones más elevadas con respecto a los lagos impactados-profundos (Tabla 8, Fig. 17).

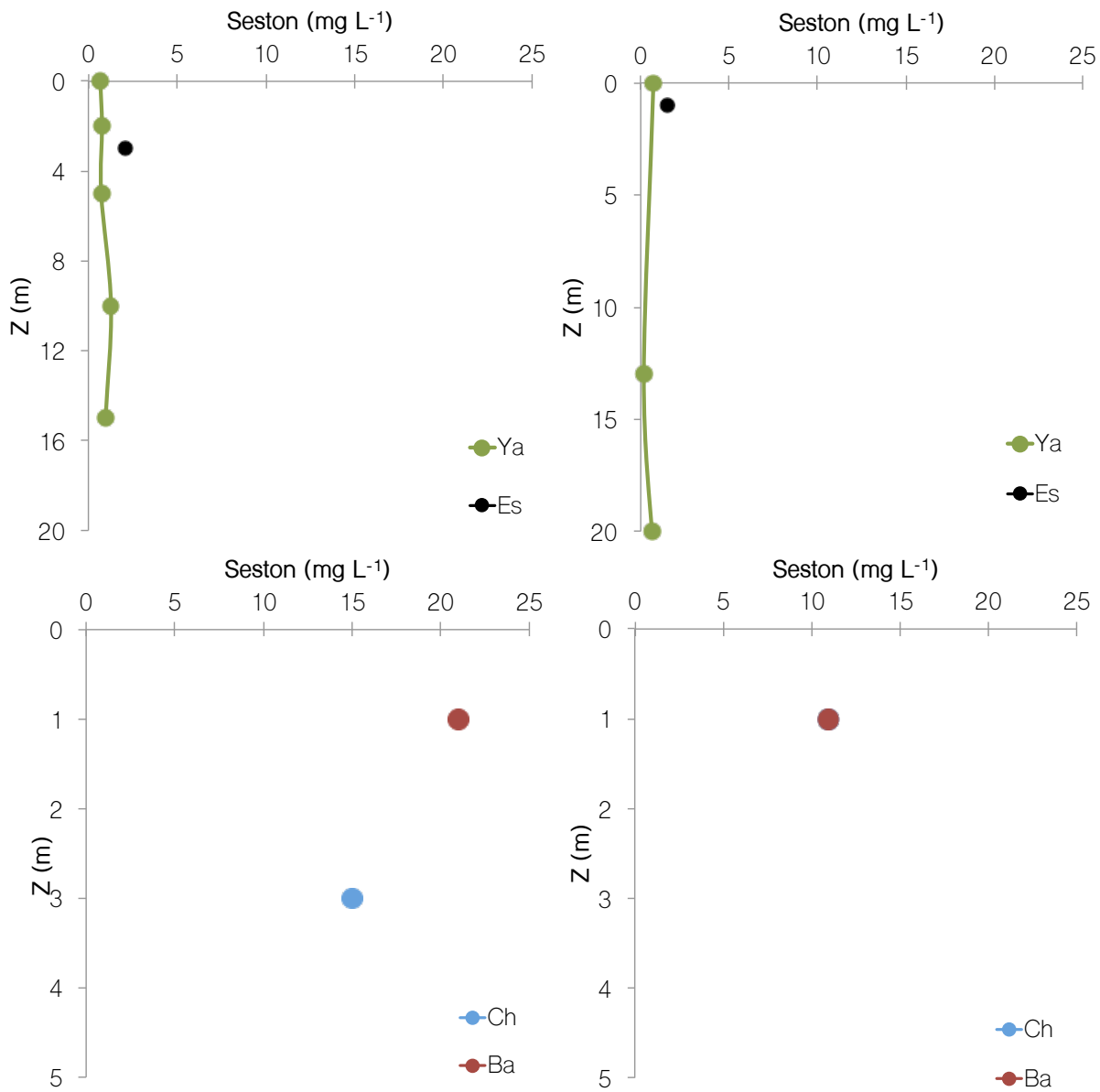


Figura 16. Distribución vertical del seston en Esmeralda (Es) y Yalalush (Ya), lagos 'prístinos-funcionalmente someros' (arriba), y en Chaj Chaj (Ch) y Balantetic (Ba), lagos 'impactados-funcionalmente someros' (abajo), durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha).

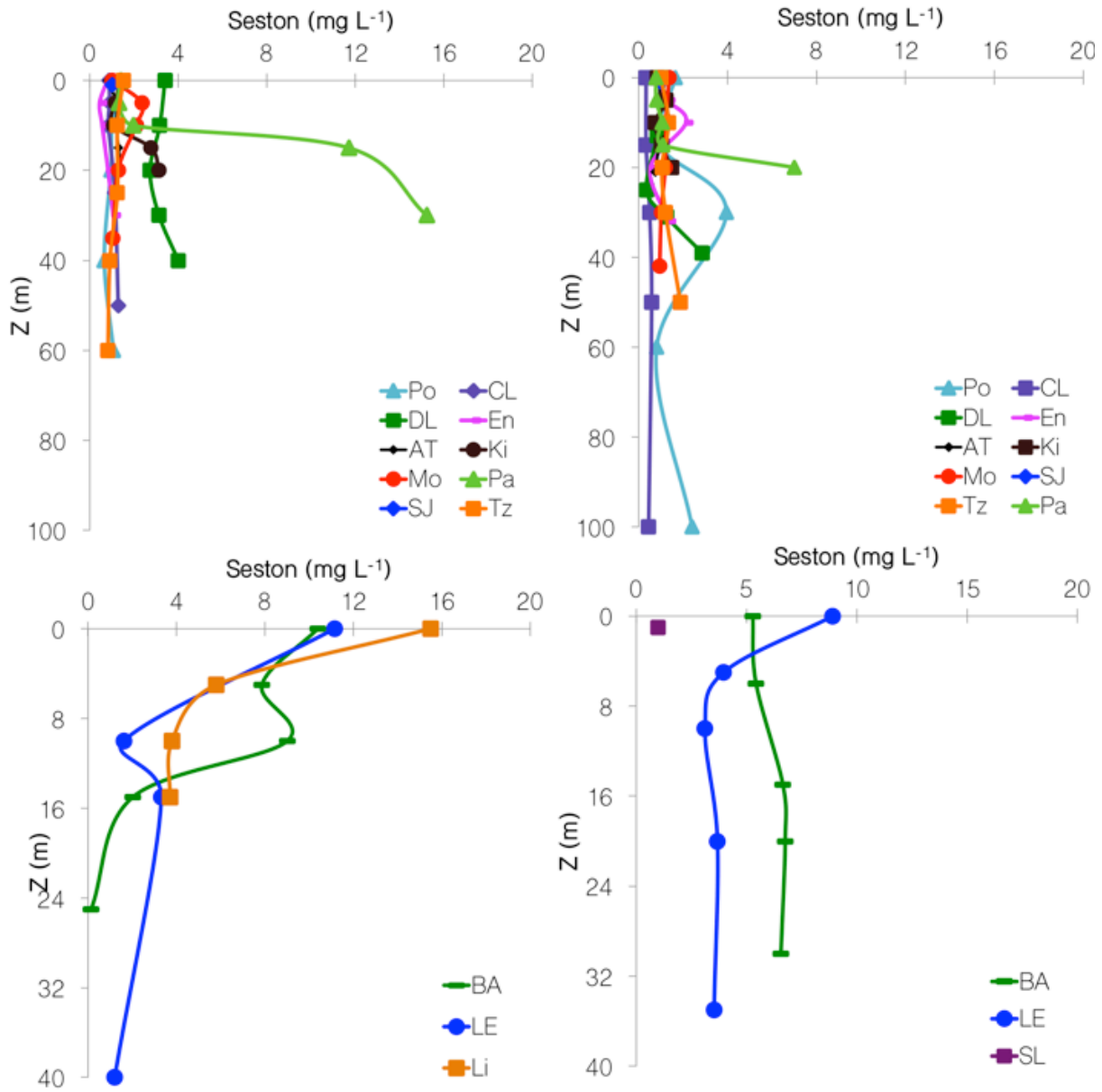


Figura 17. Distribución vertical del seston en Pojoj (Po), Cinco Lagos (CL), Dos Lagos (DL), Ensueño (En), Agua Tinta (AT), Kichail (Ki), Montebello (Mo), Patianú (Pa), San José (SJ) y Tzisco (Tz), lagos ‘prístinos profundos’ (arriba) y en Bosque Azul (BA), La Encantada (LE), Liquidambar (Li) y San Lorenzo (SL), lagos ‘impactados-profundos (abajo), durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha).

Al comparar la distribución vertical del seston durante la temporada cálida/lluvias en los lagos prístinos y en los impactados, se pudo observar que los impactados presentan la concentración máxima de seston en o cerca de la superficie, sin manifestar diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos; en cambio, los lagos prístinos mostraron la concentración máxima a media agua o cerca del fondo de los mismos (lagos funcionalmente someros y profundos).

Durante la temporada fría/secas los lagos impactados presentaron el mismo comportamiento con la concentración máxima en o cerca de la superficie y tampoco mostraron diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos. En los lagos prístinos la concentración máxima se registró a media agua o cerca del fondo de los mismos (a excepción de Montebello y Yalalush, que presentaron $S_{m\acute{a}x}$ en superficie), sin presentar diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos.

Carbono total particulado

Durante la temporada cálida/lluvias se registraron concentraciones de CTP en la columna de agua que oscilaron entre 0.5 y 3.2 mg L⁻¹, con un promedio de 1.4±1.0 mg L⁻¹. La concentración de CTP mínima (CTP_{mín}) tuvo lugar en Dos Lagos y Patianú, mientras que la concentración de CTP máxima de (CTP_{máx}) se registró en Bosque Azul.

Durante la temporada fría/secas la CTP_{mín} fue de 0.5 mg L⁻¹ y la CTP_{máx} de 7.9 mg L⁻¹, registradas en Tzisco y Balantetic, respectivamente. El promedio fue de 1.7±2.0 mg L⁻¹ (Fig. 18, Tabla 9).

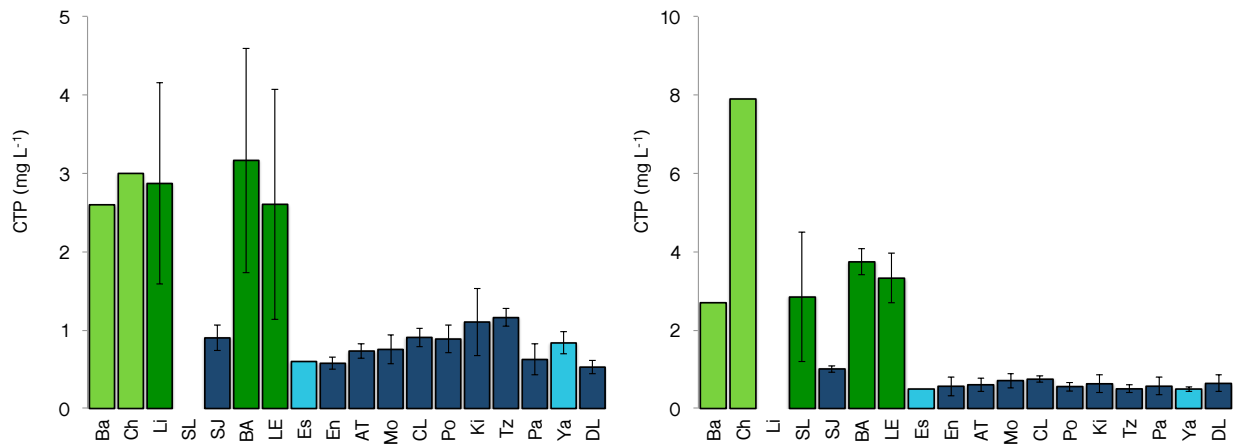


Figura 18. Concentración promedio (\pm D.E.) de CTP durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha) en los lagos estudiados del PNLM. En verde claro lagos impactados-funcionalmente someros, en verde oscuro lagos impactados-profundos, en azul claro lagos prístinos-funcionalmente someros y en azul oscuro lagos prístinos-profundos.

Descripción por grupos

Lagos prístinos-funcionalmente someros

Durante la temporada cálida/lluvias se presentó un perfil vertical homogéneo (variación $<$ a dos veces el valor de la desviación estándar, D.E.) a lo largo de la columna de agua de Yalalush. De igual manera, durante la temporada fría/secas se registró un perfil homogéneo en la columna de agua. En ambas temporadas este grupo de lagos presentó las concentraciones más bajas de CTP registradas en los lagos del PNLM (Tabla 10, Fig. 19, 20).

Lagos impactados-funcionalmente someros

En ambas temporadas este grupo de lagos presentó las concentraciones más elevadas de CTP registradas en los lagos del PNLM (Tabla 10).

Tabla 9. Concentraciones mínima y máxima (ubicación), promedio \pm desviación estándar (D.E.) del CTP (mg L^{-1}) en la columna de agua de los lagos en estudio del PNLM durante las temporadas estudiadas. * = solo una profundidad muestreada, - = sin datos.

Lago	Temporada cálida/lluvias			Temporada fría/secas		
	Mínimo (ubicación)	Máximo (ubicación)	Promedio (D.E.)	Mínimo (ubicación)	Máximo (ubicación)	Promedio (D.E.)
Ba	*	*	3.0 *	*	*	7.9 *
Ch	*	*	2.6 *	*	*	2.7 *
Li	1.7 (media agua)	4.8 (superficie)	2.9 (\pm 1.3)	-	-	-
SL	-	-	-	1.5 (media agua)	4.7 (superficie)	2.8 (\pm 1.7)
SJ	0.7 (superficie)	1.2	0.9 (\pm 2.6)	0.9 (superficie)	1.1	1.0 (\pm 0.1)
BA	1.6 (media agua)	5.0 (superficie)	3.2 (\pm 1.4)	3.2 (media agua)	4.0 (superficie)	3.7 (\pm 0.3)
LE	1.7 (fondo)	14.8 (superficie)	2.6 (\pm 1.5)	2.6 (superficie)	3.9 (fondo)	3.3 (\pm 0.6)
Es	*	*	2.1*	*	*	1.5*
En	0.5 (fondo)	0.7 (superficie)	0.6 (\pm 0.1)	0.4 (fondo)	1.0 (superficie)	0.6 (\pm 0.2)
AT	0.6 (superficie)	0.8 (media agua)	0.7 (\pm 0.1)	0.4 (superficie)	0.8 (media agua)	0.6 (\pm 0.2)
Mo	0.6 (media agua)	1.1 (media agua)	0.8 (\pm 0.2)	0.5 (media agua)	1.0 (superficie)	0.7 (\pm 0.2)
CL	0.8 (fondo)	1.1 (media agua)	0.9 (\pm 0.1)	0.7 (superficie)	0.9 (fondo)	0.7 (\pm 0.1)
Po	0.6 (superficie)	1.0 (fondo)	0.9 (\pm 0.2)	0.4 (fondo)	0.7 (superficie)	0.6 (\pm 0.1)
Ki	0.8 (fondo)	1.8 (superficie)	1.1 (\pm 0.4)	0.4 (media agua)	1.0 (media agua)	0.6 (\pm 0.2)
Tz	1.0 (media agua)	1.3 (superficie)	1.2 (\pm 0.1)	0.4 (media agua)	0.6 (superficie)	0.5 (\pm 0.1)
Pa	0.4 (media agua)	0.8 (superficie)	0.6 (\pm 0.2)	0.4 (media agua)	1.0 (superficie)	0.6 (\pm 0.2)
Ya	0.7 (superficie)	1.0 (fondo)	0.8 (\pm 0.1)	0.4 (superficie)	0.5 (fondo)	0.5 (\pm 0.1)
DL	0.4 (media agua)	0.6 (fondo)	0.5 (\pm 0.1)	0.4 (superficie)	0.9 (fondo)	0.6 (\pm 0.2)

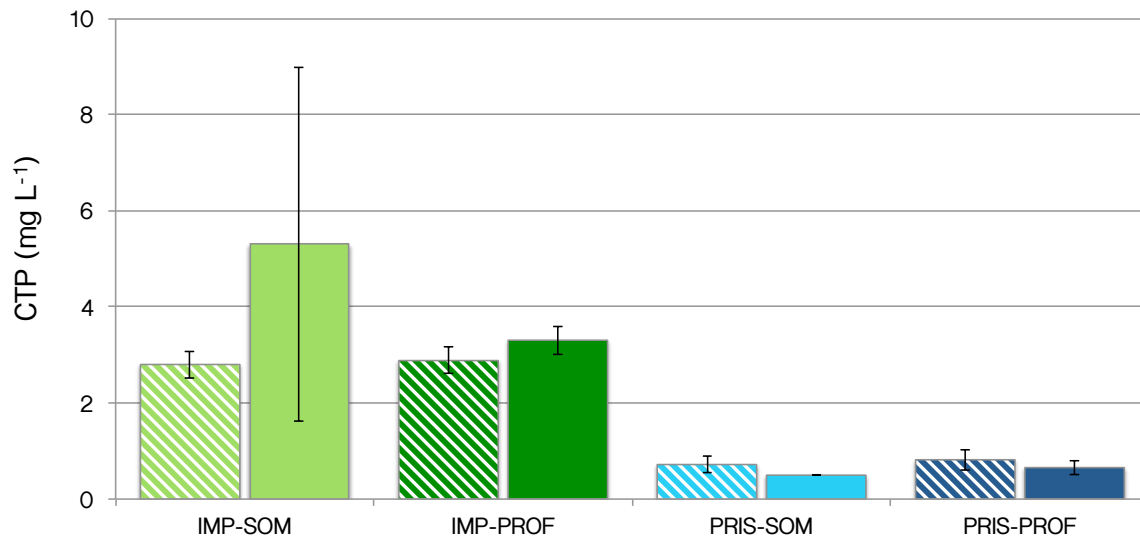


Figura 19. Concentración promedio (\pm D.E) de CTP durante la temporada cálida/lluvias (barras rayadas) y la temporada fría/secas (barras sólidas) en los diferentes grupos establecidos del PNLM. IMP = impactado, SOM = funcionalmente somero, PRIS = prístino y PROF = profundo.

Tabla 10. Concentración promedio (\pm D.E) de CTP (mg L^{-1}) durante la temporada cálida/lluvias y la temporada fría/secas en los diferentes grupos establecidos del PNLM. IMP = impactado, SOM = funcionalmente somero, PRIS = prístino y PROF = profundo.

Grupo	Temporada cálida/Lluvias		Temporada fría/Secas	
	X	D.E.	X	D.E.
Imp-Fsom	2.80	0.28	5.30	3.68
Imp-Prof	2.29	0.28	2.64	1.68
Pris-Fsom	0.72	0.17	0.50	0.00
Pris-Prof	0.85	0.20	0.66	0.15

Lagos prístinos-profundos

Agua Tinta, Montebello, Patianú, Dos Lagos y Pojoj mostraron perfiles verticales de CTP homogéneos (variación < dos veces el valor de la D.E.) durante la temporada cálida/lluvias. Cinco Lagos, Ensueño, Kichail, Patianú, San José y Tzisco, mostraron perfiles verticales de CTP heterogéneos (variación > dos veces el valor de la D.E.) durante la

temporada cálida/lluvias. Durante la temporada fría/secas todos los lagos incluidos en este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos, a excepción de San José que presentó un perfil vertical homogéneo (variación < dos veces el valor de la D.E.).

En general los lagos prístinos–profundos mostraron concentraciones de CTP más elevadas con respecto a los lagos prístinos–funcionalmente someros (Tabla 10, Fig. 21).

Lagos prístinos-profundos

Agua Tinta, Montebello, Patianú, Dos Lagos y Pojoj mostraron perfiles verticales de CTP homogéneos (variación < dos veces el valor de la D.E.) durante la temporada cálida/lluvias. Cinco Lagos, Ensueño, Kichail, Patianú, San José y Tzisco, mostraron perfiles verticales de CTP heterogéneos (variación > dos veces el valor de la D.E.) durante la temporada cálida/lluvias.

Durante la temporada fría/secas todos los lagos incluidos en este grupo presentaron perfiles verticales heterogéneos, a excepción de San José que presentó un perfil vertical homogéneo (variación < dos veces el valor de la D.E.). En general los lagos prístinos–profundos mostraron concentraciones de CTP más elevadas con respecto a los lagos prístinos–funcionalmente someros (Tabla 10, Fig. 21).

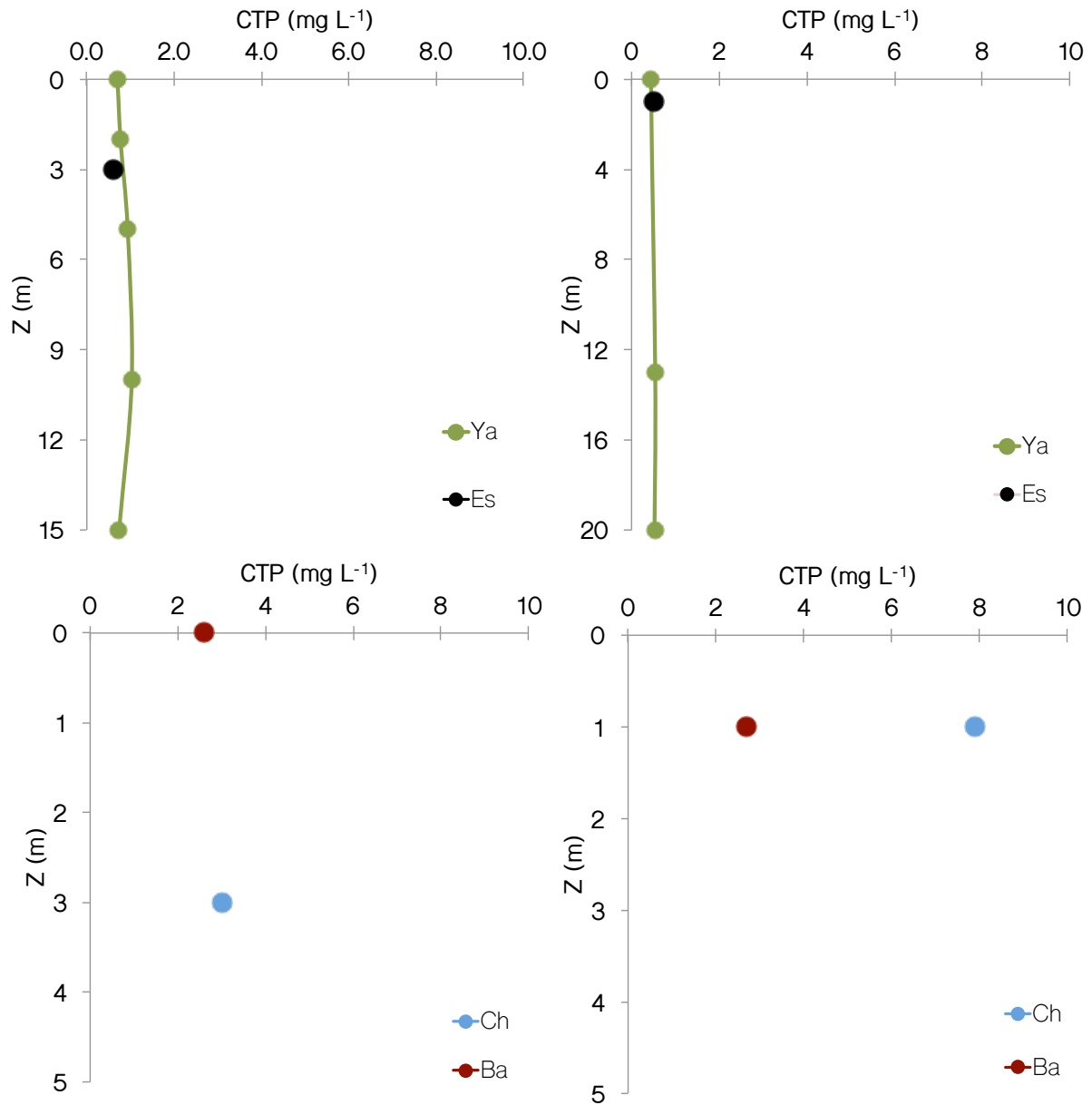


Figura 20. Distribución vertical del CTP en Esmeralda (Es) y Yalalush (Ya), lagos ‘prístinos-funcionalmente someros’ (arriba), y en Chaj Chaj (Ch) y Balantetic (Ba), lagos ‘impactados-funcionalmente someros’ (abajo), durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha).

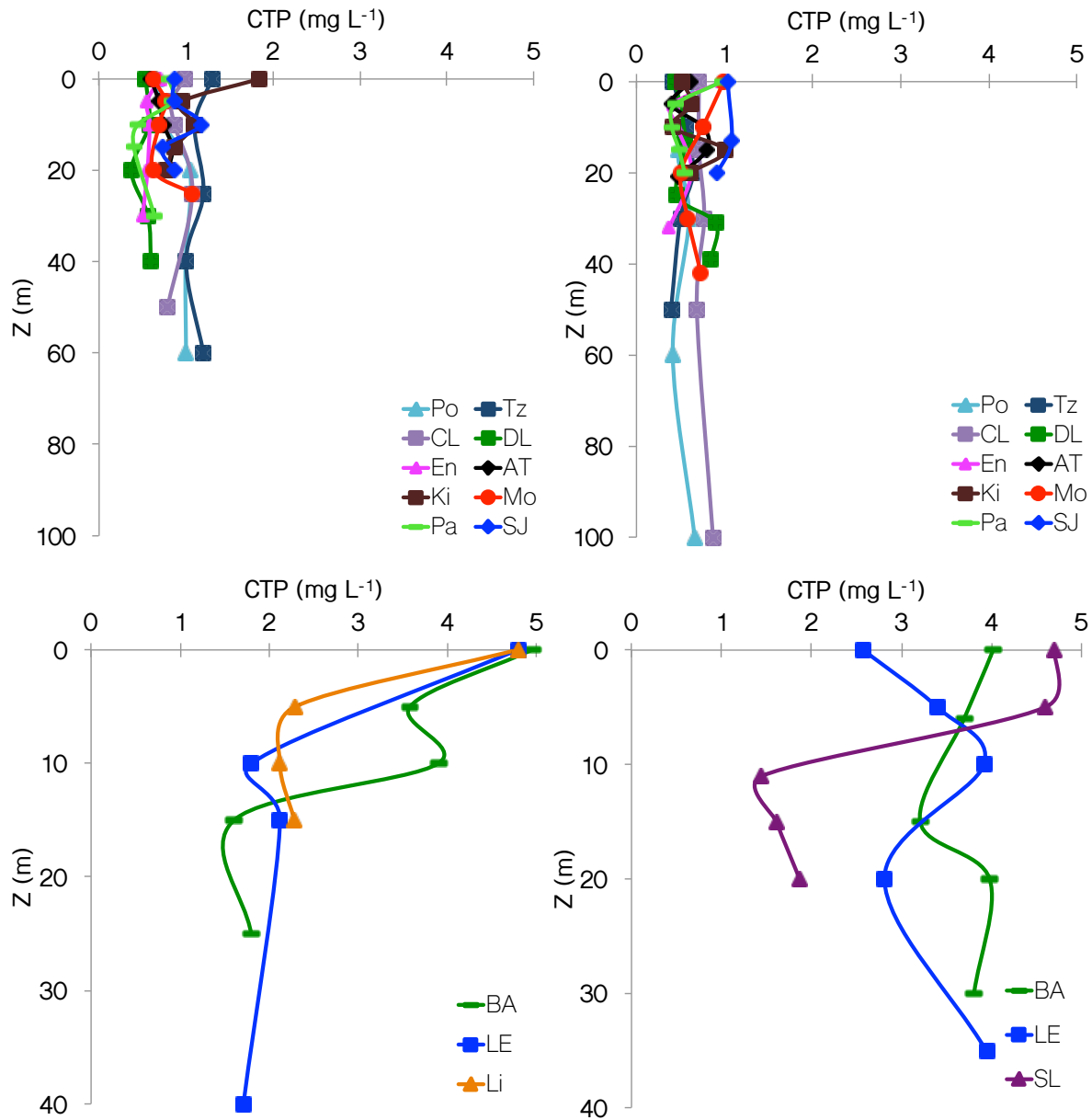


Figura 21. Distribución vertical del CTP en Pojoj (Po), Cinco Lagos (CL), Dos Lagos (DL), Ensueño (En), Agua Tinta (AT), Kichail (Ki), Montebello (Mo), Patianú (Pa), San José (SJ) y Tzisco (Tz), lagos ‘prístinos profundos’ (arriba) y en Bosque Azul (BA), La Encantada (LE), Liquidambar (Li) y San Lorenzo (SL), lagos ‘impactados-profundos (abajo), durante la temporada cálida/lluvias (izquierda) y la temporada fría/secas (derecha).

Durante la temporada cálida/lluvias se pudo observar que todos los lagos impactados, así como los prístinos Ensueño, Kichail, Patianú y Tzisco, presentaron la concentración máxima de CTP en la superficie, sin revelar diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos. En cambio, en el resto de los lagos prístinos se observó la concentración máxima a media profundidad o cerca del fondo, sin presentar diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos. Durante la temporada fría/secas nuevamente los lagos impactados, así como los prístinos Ensueño, Montebello, Patianú y Pojoj, presentaron la concentración máxima en superficie, sin diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos. En el resto de los lagos prístinos la concentración máxima se localizó a media profundidad o cerca del fondo, sin diferencias entre lagos funcionalmente someros y profundos.

Análisis de varianza trifactorial (ANOVA)

Seston. El ANOVA de tres vías aplicado a los lagos del PNLM mostró que no existen diferencias significativas con respecto a la temporada de muestreo ($F_{(1,27)}=1.10$, $p = 0.30$), pero sí con respecto al grado de impacto (prístinos o impactados, $F_{(1,27)}=86.60$, $p < 0.05$) y la profundidad (funcionalmente someros y profundos, $F_{(1,27)}=10.16$, $p < 0.05$), siendo la interacción entre estos dos factores (estado:profundidad) el valor de mayor importancia ($F_{(1,27)}=22.03$, $p < 0.05$), ya que los lagos impactados–funcionalmente someros presentaron valores mayores de seston en comparación con los lagos impactados–profundos. De igual manera, la concentración de seston en los lagos prístinos fue diferente en los profundos y en los funcionalmente someros, siendo más elevada en los profundos (Fig. 22).

CTP. El ANOVA de tres vías aplicado a los lagos del PNLM mostró que no existen diferencias significativas con respecto a la temporada de muestreo ($F_{(1,27)}=0.90$, $p = 0.35$), ni a la profundidad ($F_{(1,27)}=1.14$, $p = 0.30$), pero sí con respecto al grado de impacto de los mismos ($F_{(1,27)}=80.60$, $p < 0.05$), siendo las concentraciones de CTP más elevadas las

registradas en los lagos impactados con respecto a los prístinos en ambas temporadas de muestreo. La interacción entre temporada:estado resultó significativa ($F_{(1,27)}=6.16$, $p < 0.05$), dado que uno de los lagos impactados–funcionalmente someros (Chaj Chaj) presentó concentraciones muy superiores (7.8 mg L^{-1}) a las del resto de los lagos durante la temporada fría/secas (Fig. 22).

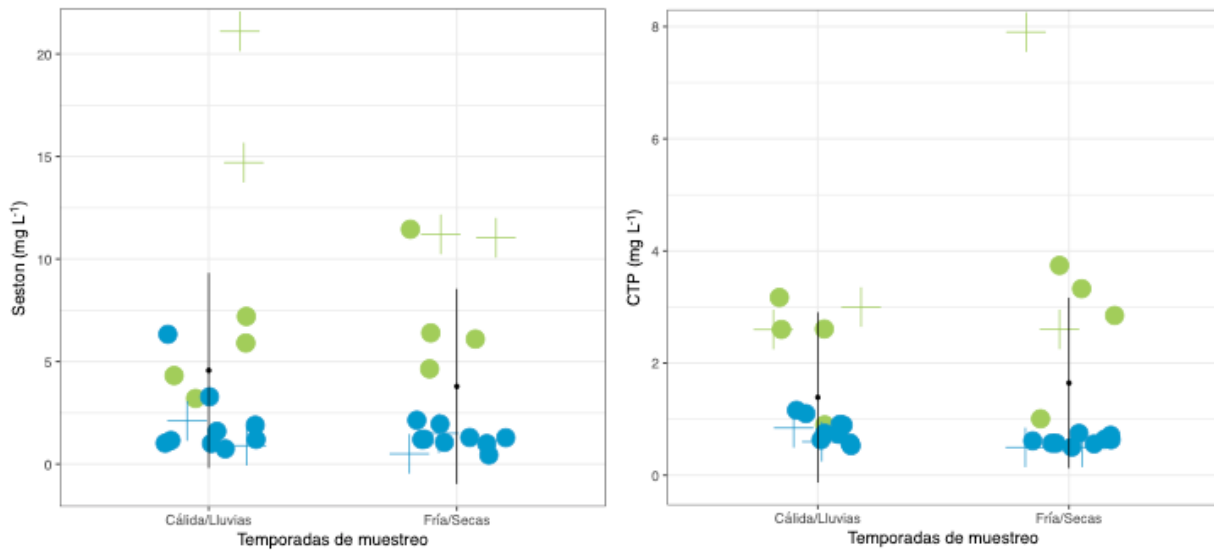


Figura 22. Dispersión de los promedios de la concentración de seston (izquierda) y CTP (derecha) para ambas temporadas de muestreo. En verde lagos impactados y en azul lagos prístinos, • lagos profundos y + lagos funcionalmente someros.

En general, el factor estado (prístino *versus* impactado) fue el único que presentó diferencias significativas en ambas variables, seston y CTP, en las dos temporadas de muestreo, mostrando nuevamente que si existen diferencias cuantitativas entre estos dos grupos de lagos establecidos con anterioridad.

Proporción S:COP

Durante la temporada cálida/lluvias, en general, el seston de origen terrígeno estuvo presente con un $66 \pm 19\%$ de la concentración total en los dieciocho lagos en estudio. Asimismo, en la comparación realizada entre grupos también se pudo observar que el seston de origen terrígeno fue mayor (Tabla 11). Únicamente en Ensueño y Pojoj (ambos lagos prístinos-profundos) el material biogénico (COP) fue mayor (Fig. 23). Durante la

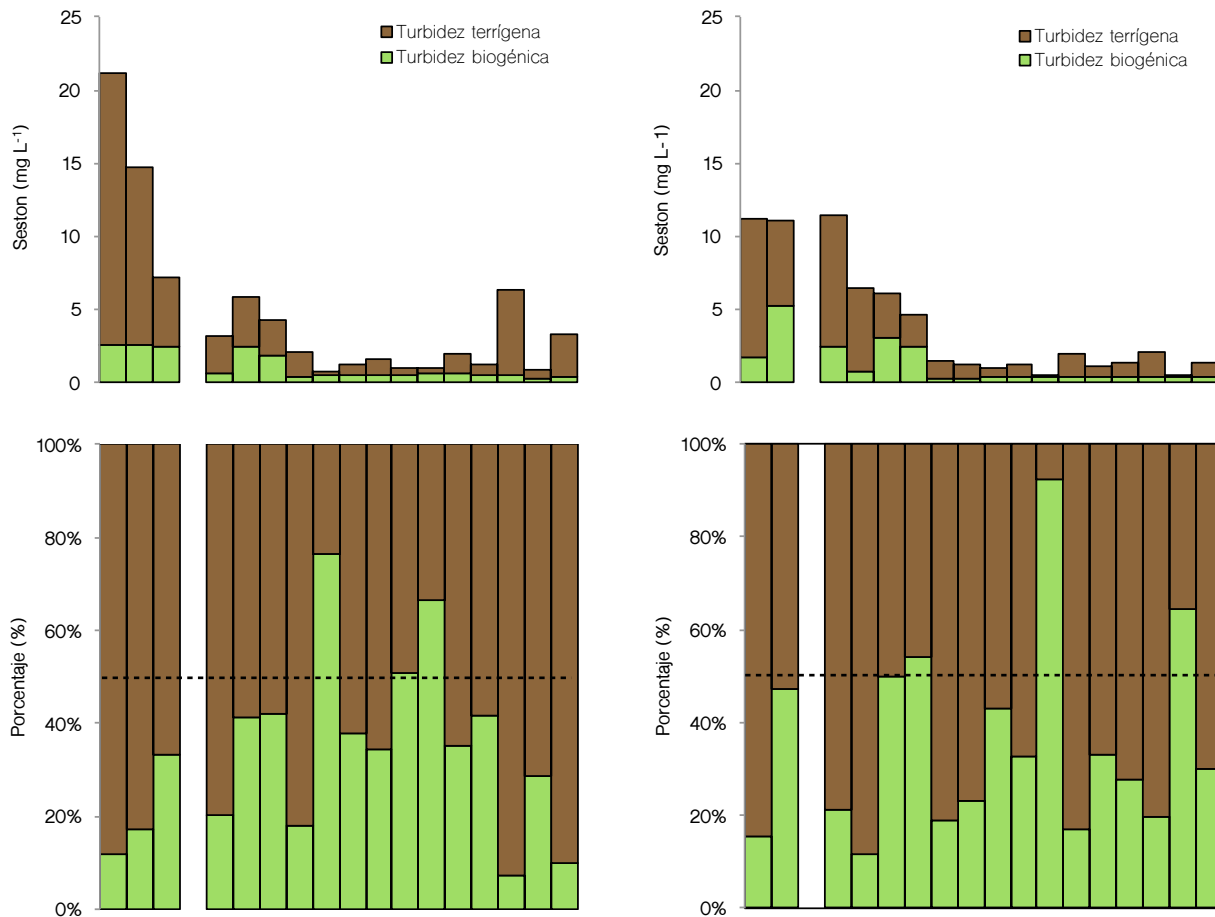


Figura 23. Contribución porcentual (abajo) y concentración (arriba) del material terrígeno (café) y biogénico (verde) en la composición total del seston en los lagos estudiados del PNLM, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante, durante la estratificación (izquierda) y la circulación (derecha). Línea punteada = 50%

temporada fría/secas, el porcentaje general se mantuvo prácticamente igual ($65\pm 21\%$). En los lagos impactados–funcionalmente someros el $52\pm 33\%$ de la concentración total fue material terrígeno. Nuevamente en los cuatro grupos establecidos el material de origen terrígeno fue más abundante (Tabla 11). Cinco Lagos, La Encantada y Yalalush fueron los únicos lagos donde el material biogénico (COP) fue mayor (Fig. 23).

Tabla 11. Contribución porcentual del material terrígeno y biogénico en la composición total del seston en los lagos estudiados del PNLM durante las dos temporadas muestreadas.

Grupo	Cálida/lluvias		Fría/secas	
	%Biogénico	%Terrígeno	%Biogénico	%Terrígeno
Imp-Fsom	14.6	85.4	31.5	68.5
Imp-Prof	38.9	61.1	41.7	58.3
Pris-Fsom	23.2	76.8	41.7	58.3
Pris-Prof	38.0	62.0	33.0	67.0

Correlaciones lineales

Se evaluó la posible correlación lineal existente entre algunas de las variables en estudio. Durante la temporada cálida/lluvias, la concentración de seston se correlacionó negativamente con la profundidad de la Z_{EU} . Dicha correlación negativa (p Pearson= -0.71) y significativa ($p < 0.05$) indica que existe una asociación lineal fuerte entre las dos variables (Fig. 24).

Por otro lado, en la temporada de fría/secas, la concentración de seston también se correlacionó negativamente con la profundidad de la Z_{EU} . Dicha correlación nuevamente fue significativa ($p < 0.05$) e indica una asociación más fuerte entre las variables estudiadas (Tabla 12, Fig. 24). La Z_{EU} fue cerca de cinco veces menor en los lagos impactados

(6.2±7.6 m) en contraste con los prístinos (28.9±22.2 m), en ambas temporadas, lo cual es propiciada por una mayor concentración de seston en lagos impactados.

La correlación lineal que presentaron la concentración de seston y la concentración de CTP durante la temporada cálida/lluvias fue positiva y significativa ($p < 0.05$) (Fig. 24, Tabla 12), indicando que existe una relación lineal moderada entre las variables. Durante la temporada fría/secas, la correlación nuevamente fue significativa ($p < 0.05$). El coeficiente de correlación incrementó (p Pearson= -0.77) lo cual indica una mayor asociación entre las variables durante esta temporada (Fig. 24).

Durante la temporada cálida/lluvias, la concentración de seston se correlacionó negativamente con la profundidad de la Z_{MIX} . A pesar de que la correlación resultó significativa ($p = 0.03$), el coeficiente de correlación fue muy bajo, evidenciando una asociación débil entre las dos variables (Fig. 24). Durante la temporada de fría/secas los lagos se encontraban circulando (a excepción de Dos Lagos) por lo que la Z_{MIX} abarcó toda la columna de agua y la asociación entre las variables fue muy baja (p Pearson= -0.23) y no significativa ($p = 0.39$) (Tabla 12, Fig. 24).

Tabla 12. Coeficientes de correlación lineal obtenidos para las distintas variables en estudio.

Variables	Coef. de correlación (p Pearson)	p
Seston, Z_{EU}	- 0.71	1.5×10^{-3}
Seston, CTP	0.68	2.6×10^{-3}
Seston, Z_{MIX}	-0.51	0.037
Variables	Coef. de correlación (p Pearson)	p
Seston, Z_{EU}	- 0.91	1.3×10^{-5}
Seston, CTP	0.77	2.8×10^{-4}
Seston, Z_{MIX}	- 0.23	0.39

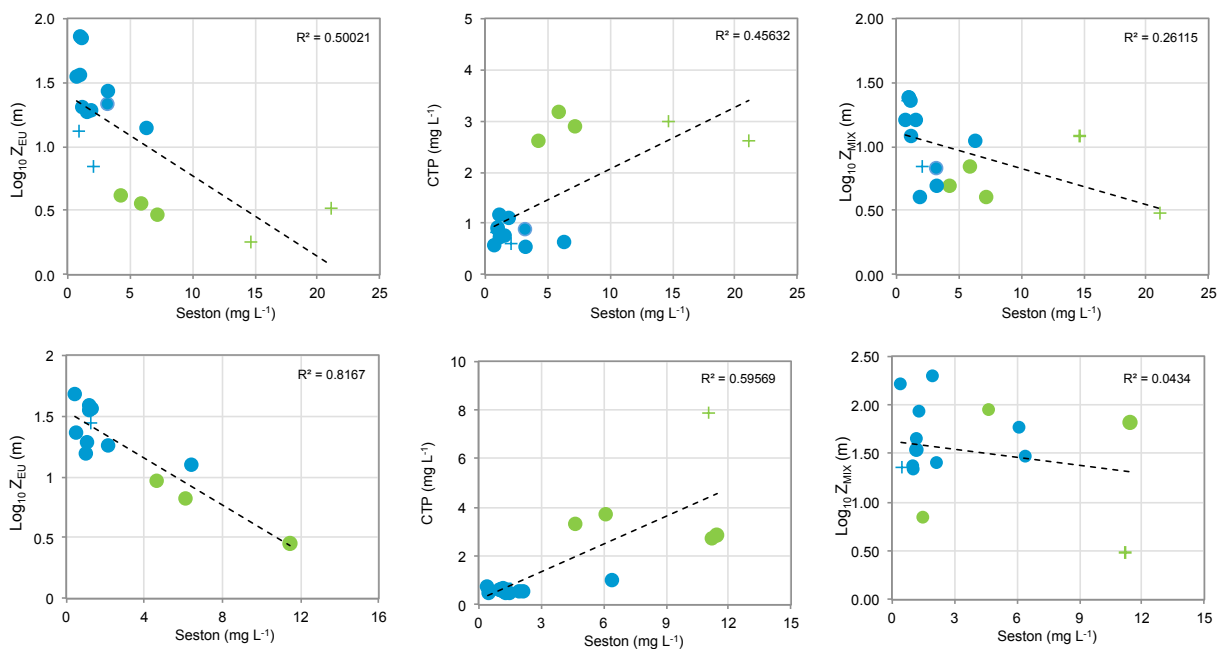


Figura 24. Correlaciones lineales de la concentración promedio de seston con la profundidad de la Z_{EU}, la concentración promedio de CTP y la profundidad de la Z_{MIX}, para la temporada cálida/lluvias (arriba) y la

Discusión

Capítulo 4

A simple vista, el color y la turbidez del agua brindaron una idea cualitativa correcta del grado de impacto que presentan actualmente los cuerpos de agua en estudio. Sin embargo, los resultados obtenidos proporcionaron una visión cuantitativa de la problemática real. A continuación se discutirán los resultados de acuerdo a los objetivos particulares planteados y las hipótesis enunciadas.

Objetivo I. Análisis de la variación espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos (temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (K_{25}), pH y PAR) en la columna de agua en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

En ambas temporadas de muestreo las observaciones se concentraron por separado en dos grupos que posteriormente fueron denominados prístino e impactado, confirmando que la caracterización realizada en campo *a priori* con base en el color aparente de sus aguas fue un criterio acertado.

Hidrodinámicamente se distinguieron dos grupos diferentes de lagos. Un primer grupo constituido por los lagos profundos los cuales se estratificaron en la temporada cálida/lluvias y circularon en la temporada de fría/secas y mostraron un comportamiento de monomixis cálida; y un segundo grupo con los lagos someros que circularon en ambas épocas mostrando un comportamiento de polimixis cálida. Una vez más, la excepción fue Dos

Lagos, aunque su mixolimnion siguió el comportamiento de monomixis cálida correspondiente a un lago profundo.

Los lagos impactados-profundos presentaron, durante la estratificación, termoclinas superficiales y amplias en contraste con los lagos prístinos-profundos con termoclinas a mayor profundidad y con menor amplitud. Lo anterior, posiblemente, está relacionado con que los lagos impactados-profundos, al presentar una mayor cantidad de material particulado en superficie, resultan más turbios. Esto ocasiona una rápida absorción de la luz, teniendo como resultado una acelerada atenuación de la energía lumínica y su transformación en energía calorífica (Wetzel 2001); por ende, se generan termoclinas más superficiales y con un gradiente térmico mayor ($0.8\pm 0.2^{\circ}\text{C}$). Por el contrario, la profundidad a la cual penetró la radiación solar en los lagos prístinos-profundos fue mayor, ocasionando que la atenuación de la luz se llevara a cabo de manera más paulatina y alcanzando mayor profundidad y con esto termoclinas más profundas y con un gradiente térmico menor ($0.5\pm 0.1^{\circ}\text{C}$).

En los lagos funcionalmente someros la columna de agua no presentó estratificación térmica en ninguna de las temporadas de muestreo. El OD presentó las concentraciones más elevadas en la superficie de los lagos impactados. Esto probablemente incentivado por una mayor actividad fotosintética es los mismos debido a que la distribución del OD en lagos térmicamente estratificados se controla mediante una combinación de las condiciones de solubilidad (la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye a medida que aumenta la temperatura), la hidrodinámica, la tasa fotosintética y consumo por óxido-reducción (Wetzel 2001).

Durante la estratificación, en los lagos impactados se alcanzaron condiciones de anoxia cerca de la superficie. Esto fue debido a la oxidación de la alta carga de materia

orgánica que dichos cuerpos de agua reciben y producen, a diferencia de los lagos prístinos donde el grosor de la columna de agua oxigenada fue mayor.

Lewis (1996) afirma que el desarrollo de un hipolimnion anóxico es más común en lagos tropicales debido a que presentan temperaturas hipolimnéticas más elevadas. Esto produce una menor reserva de OD, así como una tasa de descomposición de materia orgánica y metabolismo microbiano acelerados. Lo anterior explica bien los perfiles de OD con anoxia hipolimnética registrados en 14 lagos profundos estudiados durante la época cálida de lluvias, esto es, en los lagos monomícticos cálidos.

Sin embargo, los lagos someros Balantetic y Chaj Chaj presentaron anoxia en el fondo a pesar de ser polimícticos y presentar columnas de agua homotermas y, por ende, no estar estratificados térmicamente. La respuesta seguramente está en la alta carga de materia orgánica que presentan los lagos (2.6 y 3.0 mg CTP L⁻¹ respectivamente), la cual consume el OD por actividad microbiana al ser descompuesta a una tasa mayor a la que es suplementada por la fotosíntesis y transferencia de la atmósfera, conduciendo a la anoxia (Wetzel 2001).

En general e independientemente de la temporada y la profundidad, los valores de K_{25} fueron más elevados en los lagos impactados en comparación con los lagos prístinos. Esto relacionado muy probablemente con un mayor aporte de nutrientes y arrastre de sedimentos provenientes del Río Grande de Comitán (Juárez 2014), así como los lixiviados de las zonas agrícolas aledañas.

Durante la circulación, el único lago que presentó haloclina fue Dos Lagos. La consecuencia de presentar una haloclina/picnoclina conduce, como se ha mencionado con anterioridad, a que el lago sea meromíctico y que, por ello, la columna de agua no haya circulado por completo en ninguna de las dos temporadas. Además, cabe mencionar que

Dos Lagos presentó los valores más altos de K_{25} de todos los lagos estudiados, probablemente debido a la existencia de dos masas de agua diferentes, una proveniente del flujo subterráneo con mayor concentración iónica y otra meteórica superficial (pluvial).

En los lagos del PNLM se registró un intervalo de pH de 5 a 9, siendo estos los valores característicos encontrados en lagos kársticos con dominancia de CaCO_3 (Roldan y Ramírez 2008). Los lagos profundos (impactados y prístinos) mostraron los valores máximos de pH cerca de la superficie. Esto probablemente debido al consumo de CO_2 utilizado en la actividad fotosintética o al intercambio con la atmósfera (difusión molecular a través de la capa límite entre la atmosfera y la superficie del agua en cantidad proporcional a la presión parcial del CO_2), trayendo como consecuencia el aumento del pH en la superficie durante las horas de luz (Wetzel 2001).

Los valores mínimos, que fueron registrados cerca del fondo, lo que podrían deberse a la alta tasa de descomposición de materia orgánica y respiración llevada a cabo y con ello la producción de CO_2 que posteriormente, al combinarse con el agua, produce H_2CO_3 derivando en la disminución del pH (Roldán y Ramírez 2008). En los lagos funcionalmente-someros no se observaron diferencias en el perfil vertical, ya que los lagos no se estratificaron.

Objetivo II. Análisis de la variación espacial y temporal de la materia total particulada mediante el análisis de la concentración y distribución vertical de la misma en los lagos en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

En cuanto a la concentración del seston (S), los perfiles verticales y las pruebas estadísticas mostraron diferencias significativas con respecto al estado (prístinos e impactados) y la profundidad (profundos y funcionalmente someros) de los lagos, siendo la interacción entre estos dos factores (estado:profundidad) el valor de mayor importancia, ya

que los lagos impactados–funcionalmente someros presentaron valores de S cerca de tres veces mayores en comparación con los lagos impactados–profundos. Asimismo, la concentración de S fue mayor en lagos prístinos–profundos en comparación con sus homólogos funcionalmente someros, propiciando una menor transparencia en sus aguas.

En el ANOVA realizado para el S y CTP los lagos del PNLM no mostraron diferencias significativas con respecto a la temporada de muestreo ni de la profundidad ($p > 0.05$), pero sí con respecto al grado de impacto de los mismos, siendo las concentraciones de material particulado cerca de diez veces mayores en los lagos impactados con respecto a los prístinos, en ambas temporadas de muestreo. La interacción entre temporada:estado resultó significativa, mostrando concentraciones diferentes –y mayores– para lagos impactados en relación a los prístinos en las dos temporadas. El hecho de que los lagos impactados presenten concentraciones tan elevadas de material particulado puede estar relacionado con: a) la elevada productividad primaria evidenciada por su concentración elevada de clorofila-a (Maya 2017) y/o b) el tipo de suelo que circunda a los mismos.

CONANP (2007) reporta que en la zona NW del PNLM predomina suelos pertenecientes al grupo de los Feozem y los Luvisol, ambos caracterizados por un alto contenido de materia orgánica y nutrientes, favoreciendo las actividades agrícolas. Por el contrario, las bajas concentraciones de S en los lagos prístinos deriva de una baja concentración de clorofila-a, así como el tipo de suelos circundantes, rendzinas, o suelos muy someros sobre roca calcárea continua y que se caracterizan por ser suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos, además de que por su alto contenido de calcio pueden llegar a inmovilizar los nutrientes (IUSS 2007).

La distribución del S en los lagos de PNLM es el resultado de la interacción de procesos biológicos, como la producción y descomposición de materia orgánica, y de

procesos físicos como la sedimentación, la resuspensión y el transporte horizontal, tal y como lo mencionan Callieri *et al.* (1991).

La distribución vertical del S en los lagos del PNLM fue diferente en los prístinos e impactados. En los lagos prístinos la $S_{m\acute{a}x}$ se registró a media agua o cerca del fondo, en contraste con los lagos impactados que presentaron la $S_{m\acute{a}x}$ en superficie.

La presencia de concentraciones mayores de material particulado en superficie en comparación con el resto de la columna de agua, como se encontró en los lagos impactados, también han sido reportadas en otros estudios (Punning *et al.* 2003, Jellison y Melack 2001, Callieri 1997 y Lewis 1973) en donde las concentraciones más altas de S se encuentran en la superficie, dada una mayor actividad fotosintética, y/o a la entrada de material terrígeno alóctono proveniente de la cuenca circundante (Lewis 1996).

Así, los lagos impactados (funcionalmente someros y profundos) y prístinos Patianú, Kichail y Ensueño, que presentaron la concentración máxima de CTP en superficie en ambas temporadas, fue probablemente debido al incremento de una actividad fotosintética incentivada por la alta disponibilidad de nutrientes (lagos impactados) (Orozco 2016) y/o el material terrígeno acarreado de la cuenca circundante (lagos prístinos). Mientras que en los lagos que presentan la concentración máxima de CTP a media agua o cerca del fondo -los prístinos Agua Tinta, Dos Lagos, Cinco Lagos, Esmeralda, Montebello, Pojoj, San José, Tzicao y Yalalush-, ésta puede estar relacionada con procesos de sedimentación o, como en el caso de San José, la resuspensión de materiales del fondo, ya que se observa un aumento de la proporción de material terrígeno en dichas profundidades.

Salvo para los funcionalmente someros, la dinámica del CTP en los lagos del PNLM está muy relacionada con su patrón térmico de monomixis cálida. Durante el periodo de estratificación, el CTP se concentró fundamentalmente dentro del epilimnion-metalimnion. Lo

Tabla 13. Masa total del seston (mg L^{-1}) y el CTP (mg L^{-1}) en distintos lagos con diferente ubicación latitudinal y estado trófico (identificado a través de la concentración de Cl-a, Maya, 2017) en comparación con los lagos estudiados del PNLM, ordenados con base en su estado trófico. - = sin datos. (- = sin datos, * Concentración de COP).

Lago	Estado trófico	Región	Seston	CTP	Referencia
La Luna (México)	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.3 - 1.5	-	Hernández 2008
Maggiorie (Italia)	Ultra-oligotrófico	Templado	0.3 - 2.2	0.1-0.8*	Callieri 1997
Alchichica (México)	Oligotrófico	Tropical	5.7	0.2-0.3*	Alcocer <i>et al.</i> 2007
El Sol (México)	Oligotrófico	Tropical	0.7 - 3.4	-	Hernández 2008
Grande (Chile)	Eutrófico	Templado	5.1	-	Parra <i>et al.</i> 2003
Lanahue (Chile)	Eutrófico	Templado	4.9	-	Parra <i>et al.</i> 2003
Kiel Fjord	-	Templado	2.9	0.3	Lenz 1977
Kiel Bight	-	Templado	1.9	0.3	Lenz 1977
Esmeralda	Ultra-oligotrófico	Tropical	1.5 - 2.1	0.5 - 0.6	Este estudio
Ensueño	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.7 - 1.2	0.6	Este estudio
Agua Tinta	Ultra-oligotrófico	Tropical	1.0 - 1.2	0.6 - 0.7	Este estudio
Montebello	Ultra-oligotrófico	Tropical	1.2 - 1.7	0.7 - 0.8	Este estudio
Cinco Lagos	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.3 - 0.6	0.7 - 0.9	Este estudio
Pojoj	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.9 - 2.0	0.6 - 0.9	Este estudio
Tzisco	Ultra-oligotrófico	Tropical	1.2 - 1.3	0.5 - 1.2	Este estudio
Patianú	Ultra-oligotrófico	Tropical	2.1 - 6.3	0.6	Este estudio
Yalalush	Ultra-oligotrófico	Tropical	0.5 - 0.9	0.5 - 0.8	Este estudio
Dos Lagos	Ultra-oligotrófico	Tropical	1.3 - 3.3	0.5 - 0.6	Este estudio
San José	Oligotrófico	Tropical	3.7 - 8.4	0.9 - 1.0	Este estudio
Kichail	Oligotrófico	Tropical	1.1 - 1.9	0.6 - 1.1	Este estudio
Bosque Azul	Mesotrófico	Tropical	5.9 - 6.1	3.2 - 3.7	Este estudio
La Encantada	Mesotrófico	Tropical	4.3 - 4.6	2.6 - 3.3	Este estudio
Balantetic	Mesotrófico	Tropical	11.2 - 21.1	2.6 - 2.7	Este estudio
Chaj Chaj	Eutrófico	Tropical	11.0 - 14.7	3.0 - 7.9	Este estudio
San Lorenzo	Eutrófico	Tropical	11.5	4.7	Este estudio
Liquidambar	Eutrófico	Tropical	7.2	2.6	Este estudio

anterior confirma que en lagos tropicales diferencias pequeñas de temperatura inducen la formación de una termoclina funcional que constituye una barrera efectiva contra la exportación de carbono particulado –y de seston en general– al hipolimnion (Alcocer *et al.*,

2007). Durante el periodo de circulación la distribución vertical heterogénea del CTP posiblemente obedece a la resuspensión de los sedimentos, así como a la entrada de material alóctono.

Existen pocas investigaciones sobre la materia total particulada en lagos kársticos tropicales; por lo anterior, se realizaron comparaciones con lagos de origen, nivel trófico y ubicación latitudinal diferente. Maya (2017) estudió la concentración de clorofila-a en los mismos dieciocho lagos y determinó que los lagos prístinos poseen un estado trófico cercano a la ultraoligotrofia-oligotrofia y los lagos impactados a la eutrofia-hipereutrofia, como se muestra en la tabla 13, donde se presentan los valores de S registrados en este estudio.

Se puede observar que los lagos clasificados como prístinos (profundos y funcionalmente someros) poseen valores de S similares a sus homólogos ultraoligotróficos y oligotróficos, a excepción de San José que mostró concentraciones de S similares a las registradas en lagos eutróficos pero con predominancia de material terrígeno (72 y 84% en las temporadas cálida/lluvias y fría/secas, respectivamente) y una baja concentración de clorofila-a ($0.8 \pm 0.4 \mu\text{g L}^{-1}$, Maya 2017) por lo que no se clasificó como impactado. En contraparte, los lagos impactados del PNLM (profundos y funcionalmente someros) tienen concentraciones superiores a otros lagos considerados eutróficos (Tabla 13).

Objetivo III. Evaluación de la relación existente entre las variaciones de la Z_{EU} y Z_{MIX} y la distribución vertical de la materia total particulada - seston- en la columna de agua en dos periodos hidrodinámicos contrastantes (cálida/lluvias, 2014, y frías/secas 2015).

La penetración de la luz es un factor fundamental para el desarrollo de la biota en los sistemas acuáticos y en la actividad metabólica que se desarrolla en todo el cuerpo de agua, ya que la calidad y la intensidad lumínica regulan la productividad primaria (Sánchez

et al. 2007). Los lagos prístinos cuentan con la posibilidad de desarrollar comunidades diversas y abundantes. Por el contrario, los lagos impactados tienen pocas posibilidades de sobrevivencia para muchos organismos, haciéndolos menos diversos (Roldán y Ramírez 2008).

Existen estudios que muestran que la Z_{EU} disminuye durante la circulación en algunos lagos debido posiblemente al ingreso de material terrígeno o resuspensión del sedimento y la zona litoral de los lagos (Lewis 1986), así como el aumento de la actividad fotosintética derivado de la recirculación de los nutrientes remineralizados en el hipolimnion durante la estratificación. Este primer patrón fue observado en San José y Tzisco tal como se describe para el Lago Valencia en Venezuela (Lewis 1983), donde se observó una disminución notable de la Z_{EU} y, con ello, una disminución en la actividad fitoplanctónica. Por lo anterior, es pertinente pensar que la turbidez presentada por los lagos mencionados sea de origen terrígeno. En el resto de los lagos en estudio la Z_{EU} aumentó durante la circulación. Esto probablemente debido a la redistribución del material particulado ocasionado por la mezcla en la columna de agua, aunado a la disminución de florecimientos superficiales que permitió mayor penetración de la luz.

Lo anterior coincide con los valores reportados para la profundidad de la Z_{EU} , tal y como se muestra en el modelo de correlación lineal realizado, donde se observa que a mayor concentración de S, menor profundidad de la Z_{EU} . Esta correlación negativa entre la cantidad de S y la profundidad de la Z_{EU} también fue reportada por Manheim *et al.* (1970) y establecieron una relación aproximada donde 10 mg L^{-1} corresponden a una Z_{EU} de 1 m de profundidad. En el caso de los lagos impactados, el promedio de 15 mg L^{-1} de S se correspondería con una Z_{EU} de 2 m, y en los lagos prístinos, 1 mg L^{-1} se correspondería con una Z_{EU} de 15 m. Por lo tanto y en general, la concentración de seston tiene una correlación negativa con la profundidad de la Z_{EU} .

Objetivo IV. *Análisis de la variación de la proporción del material orgánico (biogénico) y mineral (terrágeno) en la concentración de total del seston presente en los lagos.*

En la temporada cálida/lluvia, únicamente en tres de los dieciocho lagos en estudio (los prístinos: Ensueño, Cinco Lagos y Pojoj) la turbidez biogénica fue mayor que la turbidez terrígena (porcentaje de proporción > 50%). La predominancia de material terrígeno posiblemente fue debida a una mayor escorrentía y aporte terrestre ocasionado por las lluvias. De igual manera, durante la temporada fría/secas, solamente en tres de los dieciocho lagos estudiados (el impactado, La encantada, y los prístinos: Cinco Lagos y Yalalush) predominó la turbidez biogénica. Lo anterior asociado seguramente a una mayor producción primaria favorecida por la recirculación de nutrientes y el aporte terrestre fue menor ya que se encontraban en época fría/secas.

Todos los lagos ubicados en el extremo NW de la zona (a excepción de La Encantada), presentaron una mayor proporción de material terrígeno durante ambas temporadas. Esto puede ser explicado por lo reportado por Mora *et al.* (2016), ya que mencionan que estos lagos se encuentran inmersos en una planicie kárstica (lagos de planicie) en la que se deposita material terrígeno que eventualmente llega a los cuerpos de agua. Además, Orozco (2016) reportó que las concentraciones más altas de nutrientes (P total, PO₄ y N total) se encuentran en los lagos de planicie. Dichas fuentes alóctonas posiblemente son las responsables del grado de impacto observado en los cuerpos de agua.

La predominancia de material terrígeno en los lagos prístinos (o de montaña) en ambas temporadas podría estar relacionada con el arrastre de materiales provenientes de la

orilla de los lagos y/o la cercanía con asentamientos humanos, como es el caso de Tziscaco y Patianú.

Objetivo V. Análisis de las posibles relaciones entre las variables ambientales y la variación de la concentración (vertical y temporal) del seston, con el fin de elucidar algunos de los cambios acaecidos en los lagos impactados en contraste con los prístinos.

Los cambios acaecidos en los lagos ubicados en la zona NW del PNLM y que fueron clasificados como impactados, están asociados a un incremento en la concentración del material particulado –seston– presente en los mismos. Lo anterior posiblemente relacionado con el incremento en el aporte de materia orgánica y nutrientes proveniente de la descarga del Río Grande de Comitán, la escorrentía de las zonas agrícolas y el tipo de uso de suelo circundante.

El presente trabajo muestra una visión cuantitativa de la problemática registrada en los lagos del PNLM y la calidad del agua en los mismos. En un extremo, los lagos prístinos representan ecosistemas frágiles que deben ser protegidos y, por otro lado, en los lagos impactados, la recuperación del ecosistema debe ser prioritaria. Los lagos del PNLM están ligados íntimamente a actividades humanas (domésticas, agrícolas y turísticas) y, por lo tanto, es muy difícil considerar que pueden conservarse sin ser utilizados en alguna forma.

La conservación y recuperación de los lagos pertenecientes al PNLM es particularmente crítica debido a la naturaleza kárstica de la cuenca. Por lo tanto, la infiltración de agua (y cualquier otra sustancia) al sistema resulta ser un punto clave a considerar en los futuros planes de manejo.

Conclusiones

Capítulo 5

1. La caracterización fisicoquímica de los lagos permitió reconocer dos grupos predominantes; los lagos *prístinos* y los *impactados*. Los lagos prístinos se caracterizaron por presentar clinas profundas y amplias con capas de mezcla extensas donde el gradiente de temperatura fue de $0.5 \pm 0.1^\circ\text{C m}^{-1}$. Contrariamente, en los lagos impactados las clinas fueron superficiales y estrechas y la capa de mezcla fue reducida con un gradiente de $0.8 \pm 0.2^\circ\text{C m}^{-1}$.
2. Las concentraciones promedio de seston en los lagos prístinos del PNLM variaron de 0.3–8.4 mg L⁻¹; concentraciones similares a las encontradas en otros lagos oligotróficos y ultraoligotróficos de México y el mundo. Asimismo, las concentraciones promedio de seston en los lagos impactados del PNLM se encontraron en un rango de 4.3–21.1 mg L⁻¹; similares o superiores a las encontradas en otros lagos mesotróficos y eutróficos del mundo.
3. Las concentraciones promedio de CTP en los lagos prístinos del PNLM variaron de 0.5–1.2 mg L⁻¹; siendo similares a las encontradas en otros lagos oligotróficos y ultraoligotróficos de México y el mundo. Por su lado, las concentraciones promedio de CTP en los lagos impactados del PNLM se encontraron en un rango de 2.6–7.9 mg L⁻¹; similares o superiores a las encontradas en otros lagos mesotróficos y eutróficos del mundo.

4. El análisis de varianza trifactorial mostró que, en general, el factor “estado” (prístino e impactado) fue el único que presentó diferencias significativas –no así el factor “temporada” y “profundidad”– en las variables analizadas (seston y CTP) durante las dos temporadas de muestreo, ratificando que si existen diferencias cuantitativas entre estos dos grupos de lagos establecidos con anterioridad.
5. Los lagos impactados mostraron la mayor concentración de seston en la superficie, consecuentemente la Z_{EU} y la transparencia de la columna de agua fueran menores. Por el contrario, la concentración máxima de seston en los lagos prístinos se localizó a media agua, lo que permitió que la Z_{EU} fuera mayor y esto se expresara en mayor transparencia de la columna de agua.
6. Durante la época cálida/lluvias, los lagos impactados presentaron la concentración máxima de CTP en superficie, probablemente debido al incremento de la biomasa algal. En contraparte, los lagos prístinos presentaron la concentración máxima de CTP a media agua o cercanas al fondo, asociado a la formación de máximos profundos de clorofila (media agua) o la resuspensión de materiales (cerca del fondo). Durante la temporada fría/seca, la distribución vertical heterogénea del CTP posiblemente obedece a la resuspensión de sedimentos, así como a la entrada de material alóctono.
7. Durante la época cálida/lluvias, la turbidez terrígena fue mayor que la biogénica en ocho de los dieciocho lagos en estudio, asociada a una mayor escorrentía y aporte terrestre ocasionado por las lluvias torrenciales. Durante la época fría/secas, la turbidez biogénica fue mayor en doce de los dieciocho lagos en estudio, probablemente asociada a un aumento de la producción primaria y a que el aporte terrestre disminuyó.

Referencias

- Alcocer, J., D. P. López-Anaya & L. A. Oseguera. 2007. Dinámica del carbono orgánico particulado en un lago tropical profundo. En: Hernández de la Torre B., G. Gaxiola (Eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Instituto Nacional de Ecología y CICESE. México. 239–247.
- Alcocer, J., L. Oseguera, G. Sánchez, C. González, J. Martínez & R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology* 75: 56–65.
- Alcocer, J., M. Merino-Ibarra, L. A. Oseguera & O. Escolero. 2018. Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. *Ecohydrology* e2029.
- Almeida, T. 2014. Heterogeneidad en el sistema lacustre de Montebello: estructura funcional y taxonómica del fitoplancton. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Estado de México. 52–56 pp.
- Callieri, C., C. Bertoni, C. De Marco & M. Contesini. 1991. Settling flux and sinking velocity of seston in Lago Di Mergozzo (Northern Italy) and influence of microbial activity on the decomposition of entrapped organic material. *Hydrobiologia* 213: 155–165.
- Callieri, C. 1997. Sedimentation and aggregate dynamics in lake Maggiore, a large deep lake in Northern Italy. *Memorie dell’ Istituto Italiano di Idrobiologia* 56: 37–50.
- Cervantes, D. R., D. G. Verdugo & H. J.E. Valdez. 2005. Modelo estacional de producción primaria estimada mediante fluorescencia natural en una región costera del Golfo de California, México. *Hidrobiológica* 15: 79–87.
- 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.
- Cole, J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. R. Tranvik, R.G. Striegl, C. Duarte, P. Kortelaine, J. Downing, J. Middelburg & J. Melack. 2007. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10: 171–184.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Plan de gestión de la cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello, Chiapas, México. 37–45 pp.

- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. 9-10 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua, Estudio para monitorear los parámetros de calidad del agua de las lagunas de Montebello. 17-29 pp.
- Durán, C.J.I., 2013, Análisis geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 88 pp.
- Eckert, W., J. Didenko, E. Uri. & D. Eldar. 2003. Spatial and temporal variability of particulate phosphorus fractions in seston and sediments of Lake Kinneret under changing loading scenario. *Hydrobiologia* 494:223-229.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90 pp.
- García-Pámanes, J., A. Trasvania, J.R. Lara & C. Bazan. 2011. Variaciones estacionales del flujo vertical de materia orgánica particulada en la región central del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 37: 33-49.
- González, M., N. Ramírez. & L. Ruiz. 2005. Diversidad Biológica en Chiapas. Plaza y Valdés, México, D.F. Plaza y Valdés S.A. 25-29 pp.
- Hernández, B. & G. Gaxiola. 2007. Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México. 1-28 pp.
- Hernández, P. 2016. Concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 49-50 pp.
- Horne, A. 1994. Limnology. Ed. McGraw Hill. U.S.A. 578 pp.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jellison R. & J. M. Melack. 2001. Nitrogen limitation and particulate elemental ratios of seston in hypersaline Mono Lake, California, U.S.A. *Hydrobiologia* 466: 1-12.
- Juárez, E. 2014. Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande de Comitán. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 12-93 pp.
- Karl D. M., D. V. Hebel & C. Winn. 1991. Procedures for particulate carbon, nitrogen, phosphorus and total mass analysis used in the US-JGOFS Hawaii ocean time series program. En Marine particles: Analysis and characterization Geophysical Monograph 63. American Geophysical Union, Washington. 71-77 pp.

- Lenz J. 1977. Seston and its main components. En Rheinhermer G. (Ed.). Microbial ecology of brackish water environmental. *Ecological studies*. Springer Verlag.
- Lewis, W. M. 1973. The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnology and Oceanography* 18: 200-217.
- Lewis, W. M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 40: 1779-1787.
- Lewis, W. M. 1986. Phytoplankton sucession in lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia* 138:189-203.
- Lewis, W. M. 1987. Tropical Limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18:159-184.
- Lewis, W. M. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. En Schiemer F. y K. Boland (Eds.). *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing 43-64.
- Longhurst, A. & D. Pauly. 1987. *Ecology of tropical oceans*. Academic Press. San Diego, California. 407 pp.
- Manheim, F. T., R. H. Meade & G. C. Bond. 1970. Suspended mater in surface waters of the Atlantic Continental Margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science* 167: 371.
- Maya, E. 2017. Estimación del estado trófico de 18 lagos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas, México. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 28-31 pp.
- Mora L., R. Bonifaz & R. López-Martínez. 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 683: 377-394.
- Orozco, C. L. 2016. Efecto de las variables fisicoquímicas en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados acuaticos en los lagos de Montebello. Tesis de posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, Ciudad de México. 15-40 pp.
- Palmer A, G. L. van Dijken, B. G. Mitchell, B. J. Seegers, K. E. Lowry, M. M. Mills & K. R. Arrigo. 2013. Light and nutrient control of photosynthesis in natural phytopankton populations from the Chukchi and Beaufort seas, Artic Ocean. *Limnology and Oceanography* 58: 2185-2205.
- Peng D., D. L. Johnson & S. Effler. 2004. Characterization of inorganic particles in selected reservoirs and tributaries of the New York City water supply. *Journal of the American Water Resources Association* S/V: 663-676.
- Punning, J. A., T. Jaanus, T. Koff & T. Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution* 149: 77-92.
- Roldan G. & J. Ramírez. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Segunda edición. Universidad de Antioquía, Colombia.

- Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez & L. Zambrano. 2007. Ecosistemas Acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Sánchez, O. (Ed.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 11-35 pp.
- Secretaría de Turismo del Estado de Chiapas. 2018. Reporte estadístico enero-diciembre 2017. Consultado en: <http://www.turismochiapas.gob.mx/institucional/2017-estadisticas>, el día 03 de mayo de 2018.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. Catálogo tipológico de humedales lacustres y costeros del estado de Chiapas. 7-41 pp.
- Straskraba, M. 1980. The effects of physical variables on freshwater production: Analyses based on models. En Le Cren E.D., R. H. Lowe Mc Connell (Eds.). *The Functioning of Freshwater Ecosystems*. Londres: Cambridge University Press. 13-84 pp.
- Vargas-Sánchez, M. 2016. Caracterización del seston en lagos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas, México. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Ciudad de México. 52-56 pp.
- Vargas-Sánchez, M., Rivera-Herrera E. M., Alcocer-Durand J. y Oseguera-Pérez L. A. 2017. 4.3. Distribución del carbono orgánico particulado en lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México. pp. 166-171. En, F. Paz Pellat y R. Torres Alamilla (Eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México. 656 pp.
- Vázquez, M. A. & E. 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.
- Villalpando, A. 2015. Uso de percepción remota para la estimación del índice trófico de las lagunas del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Estado de México. 67 pp.
- Veronesi M., A. Barbieri & W. Hanselmann. 2002. Phosphorus, carbon and nitrogen enrichment during sedimentation in a seasonally anoxic lake (Lake Lugano, Switzerland). *Journal of Limnology* 61: 215-223.
- Westlake, D. E 1965. Some problems in the measurement of radiation under water: A review. *Photochem. Photobiol.* 4:849-868.
- Wetzel, R. & G. Likens. 1979. *Limnological Analyses*. Saunders. Filadelfia. 15-29 pp.
- Wetzel R. & G. Likens. 2000. *Limnological Analyses*. Springer. Nueva York: 429 pp.

Wetzel, R. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Academic Press, San Diego. 1006 pp.

Weyhenmeyer G. A., L. Hakanson & M. Meili. 1997. A validated model for daily variations in the flux, origin, and distribution of settling particles within lakes. *Limnology and Oceanography* 42: 1517–1529.