



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Caracterización sedimentológica de los
lagos del Parque Nacional “Lagunas de
Montebello”, Chiapas**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Licenciada en Ciencias de la Tierra
Orientación en Ciencias Ambientales**

P R E S E N T A:

Kenia Vianey Segundo Fuerte



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Javier Alcocer Durand**

Ciudad Universitaria, CDMX 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

2. Datos del tutor

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

3. Datos del sinodal 1

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito.

Título

Número de páginas

Año

1. Datos del alumno

Segundo
Fuerte
Kenia Vianey
5531457483
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
309269946

2. Datos del tutor

Doctor
Javier
Alcocer
Durand

3. Datos del sinodal 2

Doctora
Margarita Erna
Caballero
Miranda

4. Datos del sinodal 3

Doctora
Blanca Lucía
Prado
Pano

5. Datos del sinodal 4

Doctora
Vilma Soledad
Ardiles
Gloria

6. Datos del sinodal 5

Doctor
Luis Alberto
Oseguera
Pérez

7. Datos del trabajo escrito.

Caracterización sedimentológica de los lagos del Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Chiapas

58p

2019

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
1. Resumen	9
2. Introducción	11
3. Antecedentes	16
4. Justificación	17
5. Objetivos	18
5.1. General	18
5.2. Específicos	18
6. Área de estudio	19
7. Materiales y Métodos	22
7.1. Trabajo de campo	22
7.1.1 Característica fisicoquímica del agua de fondo	22
7.1.2 Sedimentos	23
7.2. Trabajo de laboratorio	23
7.2.1 Sedimentos	23
7.3. Trabajo de gabinete	24
8. Resultados	27
8.1. Parámetros fisicoquímicos	27
8.1.1. Temperatura	27
8.1.2. Oxígeno disuelto	29
8.1.3. Porcentaje de saturación de oxígeno	30
8.1.4. pH	31
8.1.5. Conductividad	32
8.1.6. Potencial de óxido-reducción	33
8.1.7. Turbidez	34
8.2. Sedimentos	35
8.2.1. Tamaño de grano y variables texturales	35
8.2.2. Contenido de materia orgánica y carbonatos	38
8.2.3. Contenido de carbono, nitrógeno y azufre elemental	39
9. Discusión	40

10. Conclusiones	51
11. Literatura citada	53

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLN.	22
Tabla 2.	Temperatura (°C) en agua de fondo de los lagos en estudio.	27
Tabla 3.	Concentración de oxígeno disuelto (mg L ⁻¹) en agua de fondo de los lagos en estudio.	29
Tabla 4.	Porcentaje de saturación de oxígeno (%) en agua de fondo de los lagos en estudio.	30
Tabla 5.	pH en agua de fondo de los lagos en estudio.	31
Tabla 6.	Conductividad (μScm ⁻¹) en agua de fondo de los lagos en estudio.	32
Tabla 7.	Potencial de óxido-reducción (mV) en agua de fondo de los lagos en estudio.	33
Tabla 8.	Turbidez (NTU) en agua de fondo de los lagos en estudio.	34
Tabla 9.	Composición porcentual promedio de arenas (A), limos (L) y arcillas (a) registrados en los lagos en estudio del PNLN, Chiapas.	35
Tabla 10.	Parámetros estadísticos granulométricos de los lagos de este estudio.	37
Tabla 11.	Contenido porcentual (%) de materia orgánica y de carbonatos registrados en los sedimentos de los lagos en estudio.	38
Tabla 12.	Contenido de carbono, nitrógeno y azufre elemental registrados en los lagos en estudio del PNLN, Chiapas.	39
Tabla 13.	Contenido porcentual de materia orgánica y carbonatos en diferentes lagos tropicales.	47
Tabla 14.	Correspondencia de la relación C/N y el origen de la materia orgánica.	48
Tabla 15.	Origen de la materia orgánica, según la relación C/N para los nueve lagos de PNLN.	49

Tabla 16. Concentración de seston (mg L^{-1}), carbono orgánico particulado y clorofila-a en columna de agua los nueve lagos de PNLM. **50**

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Ubicación de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello.	21
Figura 2.	Draga tipo Ekman utilizada para la obtención de sedimentos superficiales.	22
Figura 3.	Temperatura (°C) promedio del agua de fondo.	28
Figura 4.	Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹) promedio en el agua de fondo.	29
Figura 5.	Porcentaje de saturación de oxígeno (%) promedio en agua de fondo.	30
Figura 6.	pH promedio del agua de fondo.	31
Figura 7.	Conductividad (μS cm ⁻¹) promedio del agua de fondo.	32
Figura 8.	Potencial de óxido-reducción (mV) promedio del agua de fondo.	33
Figura 9.	Turbidez (NTU) promedio del agua de fondo.	34
Figura 10.	Grupos texturales según la posición de los sedimentos de los 9 Lagos de PNLM en el diagrama ternario propuesto por Shepard (1954).	36
Figura 11.	Análisis de conglomerados basado en el contenido fisicoquímico de los 9 lagos de PNLM.	41
Figura 12.	Análisis de conglomerados basado en la composición textural de los 9 lagos de PNLM.	43
Figura 13.	Análisis de conglomerados basado en las características sedimentarias de los 9 lagos de PNLM de este estudio.	44

Agradecimientos

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 (PAPIIT IN219215) proyecto “*Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas*”.

Al Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Comisión Nacional de Áreas Naturales Proyectos y Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tziscoa por facilitar el acceso a los lagos. Al Comité de Administración de Tziscoa (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tziscoa (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tziscoa (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tziscoa (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi segunda casa, por acogerme y brindarme la oportunidad de estudiar en ella.

A la Facultad de Ciencias porque gracias a ella pude formarme profesionalmente, por tantas oportunidades y porque fue en este lugar donde construí gran parte de lo que soy ahora.

Dedicatoria

A mi madre, Ma Ilda Fuerte Piñon, es por ella que estoy aquí, por ser un ejemplo de jamás claudicar y dar todo por quien amas.

A mis hermanos, Karen y Luis, porque son mis compañeros de vida, y estuvieron conmigo en este duro camino.

A mi pequeña Mayte, pues me acompaño casi en todo momento mientras trabaje con este proyecto, y con su corta edad me ha enseñado grandes cosas.

A Jairo, quien me acompaño y apoyo en todos los aspectos de mi vida, por el amor, la paciencia y la comprensión.

A mis amigos, que avanzaron conmigo por este camino y me ayudaron a no rendirme y perseverar hasta llegar al final: Adalid, Abel, Daniela, Luis Angel, Karem y Phany.

1. Resumen

Los sedimentos de los ecosistemas acuáticos son de gran importancia ecológica ya que en ellos se llevan a cabo innumerables reacciones microbianas asociadas a la remineralización de la materia orgánica, un proceso fundamental para la reintegración de los nutrientes a la columna de agua, así como el secuestro de carbono, de gran impacto en el ciclo del carbono y el cambio climático. Las características de los sedimentos determinan, en gran medida, su comportamiento y reflejan las características ambientales de la región. Este trabajo aporta información de los sedimentos de nueve lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”. Para ello se analizó la textura, porcentaje de materia orgánica y carbonatos, así como carbono, nitrógeno y azufre elemental de muestras de sedimento tomadas de la zona profunda de cada lago. Esto se relacionó con las concentraciones de seston, carbono orgánico particulado y clorofila-a del agua supradacente, además de los parámetros físico-químicos del agua de fondo. Se identificaron cuatro grupos de lagos de acuerdo con su profundidad e impacto: somero prístino (Esmeralda), somero impactado (Balantetic), profundo prístino (Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Kichail y Patianú), y profundo impactado (La Encantada y San Lorenzo). Los lagos someros mostraron temperaturas más altas ($\approx 2^{\circ}\text{C}$ a 4°C). Los porcentajes de saturación de oxígeno fueron altos en Cinco Lagos ($19.2 \pm 22.1\%$), a diferencia de los demás lagos profundos que alcanzaron niveles de anoxia en el fondo. Los valores de conductividad eléctrica fueron elevados en Dos Lagos ($1297.8 \pm 76.7 \mu\text{S/cm}$) en comparación con todos los lagos de este estudio (220.8 ± 25.3 y $679.1 \pm 121.2 \mu\text{S/cm}$). Los valores de turbidez tendieron a ser más elevados en los lagos impactados en comparación con los prístinos.

De acuerdo al tamaño de grano, los lagos someros presentaron sedimentos de medianos a finos, mostrando texturas variables entre limo arenoso y limo arcilloso, mientras que los lagos profundos presentaron tendencia a tener sedimentos de medianos a gruesos siendo la textura más frecuente la limo arcillosa.

Los porcentajes de materia orgánica ($16.5 \pm 0.7\%$ en Esmeralda a 53.0% en Kichail) y carbonatos ($9.4 \pm 10.5\%$ en Esmeralda a $80.4 \pm 23.7\%$ en Cinco Lagos) de los sedimentos de los lagos fueron altas y no se encontraron valores característicos que permitieran una diferenciación clara entre los cuatro grupos mencionados. En cuanto a la composición elemental, el contenido de C fue de 3.4% a 25.2% , el de N de $0.4 \pm 0.2\%$ a 2.3% y el de S de 0% a $1.3 \pm 0.7\%$. Salvo Cinco Lagos y Kichail cuyo contenido de C

elemental > 20%, el resto de los lagos presentó contenidos < 15%. En general, bajas concentraciones de seston, carbono orgánico particulado y clorofila-a en agua se corresponden con bajas concentraciones de materia orgánica, carbono, nitrógeno y azufre elemental en sedimentos y viceversa. Sin embargo, Cinco Lagos presentó una alta concentración de materia orgánica en los sedimentos a pesar de tener una baja concentración de seston, carbono orgánico particulado y clorofila-a en el agua por la característica de ser un lago meromítico.

I. Introducción

Los lagos se caracterizan por presentar un vaso definido con zonas litoral y profunda diferenciadas, sedimento poblado por especies características y una compartimentalización vertical con gradientes de luz, densidad y temperatura sujetos a variación estacional, que repercute en los procesos biológicos y en la calidad del agua (Roldán y Ramírez, 2008).

La hidrología, la actividad biológica, las reacciones químicas del agua y la textura del suelo de la cuenca de drenaje controlan las características de los sedimentos presentes en ésta, por lo que los lagos actúan como una trampa de todo el material particulado y disuelto aportado por la escorrentía y los afluentes, sin tener en cuenta la fuente o vía de transporte (Lindstrom y Håkanson, 2001). Esto está íntimamente relacionado con el transporte de materiales desde los cauces que convergen en el lago y con las modificaciones en el manejo de la cuenca, que podrían alterar sus parámetros fisicoquímicos, repercutiendo en los ecosistemas que dependen de su estabilidad (Westermeyer, 2005).

Los lagos de México son de gran importancia para la vida silvestre, la biodiversidad y el ecoturismo nacional. Son esenciales para las diversas actividades humanas, incluidas la agricultura, el desarrollo industrial, urbano y las economías locales. Sin embargo, en los lagos y en general en las aguas epicontinentales el principal problema que se presenta es su sobreexplotación, lo que ha ocasionado la disminución del líquido disponible para uso urbano y agrícola. La desertificación, además de la contaminación, eutrofización e introducción de especies exóticas han deteriorado estos ecosistemas (Lara *et al.*, 2008).

Un ejemplo de lo anterior se observa en el Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas, donde se ha identificado una erosión hídrica potencial severa, principalmente en la subcuenca del Río Grande de Comitán y la microcuenca de Lagunas de Montebello. Asimismo, el acuífero se considera muy vulnerable a la contaminación, con un deterioro en la calidad del agua subterránea hacia las cercanías de los cuerpos acuáticos. Las fuentes potenciales de

contaminación son la lixiviación e infiltración de residuos sólidos municipales y la descarga de aguas residuales no tratadas (CFE, 2012).

En esta zona, que es de origen kárstico, se produce la disolución del sustrato. El karst es un sistema de cavidades de disolución en el que pueden formarse lagos subterráneos o superficiales. Las variaciones de nivel pueden dar carácter intermitente a estos lagos, o bien, las pequeñas cubetas distintas son permanentes y los cambios de nivel hacen que periódicamente se unan entre sí. El lago kárstico elemental consiste en una dolina, un hundimiento encima de algún sistema de circulación horizontal (Margalef, 1983). Dicha disolución se favorece por la presencia de aguas cargadas de ácido carbónico (H_2CO_3) formado por la hidratación del dióxido de carbono ($CO_2 + H_2O$). De esta manera, el terreno se va falseando por la circulación de agua subterránea y se crean depresiones con formas diferentes (Roldán y Ramírez, 2008). Los sedimentos se acumulan en depresiones de tamaño variable, denominadas cuencas sedimentarias, cuyo relleno registra la evolución temporal de las mismas (Arche, 2010).

Sobre el fondo de lagos se acumula material sólido en forma de partículas, que limita inferiormente la extensión de los ecosistemas acuáticos. El sedimento representa la acumulación de materiales arrastrados (alóctonos), o bien producidos en la misma masa de agua (autóctonos), minerales (evaporitas, arcillas, fragmentos de rocas o materiales clásticos, minerales formados en la propia agua) y orgánicos (organismos enteros que mueren en el sedimento, organismos muertos y fragmentos de los mismos, excrementos, materia orgánica floculada, material detrítico alóctono). La composición de estos materiales y la velocidad con que se acumulan expresa la actividad del lago como receptor de una cuenca y como centro de actividad biológica. La acumulación de material va reflejando los cambios que ocurren en la historia del lago y el sedimento se puede considerar como la memoria del lago (Margalef, 1983).

La cantidad y calidad de las partículas que se asientan en los lagos están determinadas por numerosos factores, entre los que destacan: el clima, la geografía, la geología, el grado de influencia humana en el área, las

características hidrológicas e hidrodinámicas, las entradas alóctonas y la producción autóctona, la tasa de sedimentación, la dinámica del fondo y la sedimentaria (Håkanson y Jansson, 1983). La interacción de dichos factores no solo determina el tipo y cantidad de los sedimentos, sino también las diferencias espacio-temporales en su distribución horizontal y vertical, en su composición fisicoquímica y en el tipo de biota que soportan (Pérez *et al.*, 1994).

En este sentido, las características texturales se determinan principalmente por los tamaños de las partículas, las que son fiel reflejo de las condiciones dinámicas de los procesos de origen, transporte y deposición (Krumbein y Sloss, 1969).

Las capas superficiales del sedimento constituyen lugares habitables del lago. Los organismos bentónicos (que viven asociados a un sustrato) mezclan constantemente las capas superiores del sedimento, proceso que se conoce como bioturbación (Wetzel, 1981).

En las aguas epicontinentales, el material que se sedimenta es abundante, tanto porque la producción primaria puede ser más elevada que en el mar y la profundidad es menor, como por la mezcla de una fracción relativamente más importante de material inorgánico. El depósito de materiales sobre el fondo implica un transporte horizontal y otro vertical. El transporte horizontal es a través del arrastre de los sedimentos por los ríos. El material que se deposita de manera vertical corresponde al material orgánico (fitoplancton) que previamente había sido puesto en suspensión con los movimientos del agua, además de materiales orgánicos e inorgánicos generados en el mismo lago (seston) (Lenz, 1977).

El depósito de sedimento sobre el fondo de un lago no se hace de manera uniforme, de hecho, la heterogeneidad es manifiesta en relación con la parte inorgánica del material depositado, según el diámetro y la densidad de las partículas (Margalef, 1983).

Casi todos los sedimentos contienen materia orgánica y en algunos casos, es un constituyente importante. La cantidad de materia orgánica conservada en los sedimentos depende, entre otros, de la textura de los sedimentos, de la tasa de

sedimentación y de la velocidad entre las relaciones de aporte y descomposición de la materia orgánica (Silva, 2006).

Una fracción considerable del sedimento, en general entre el 10 y 30%, consiste en materia orgánica (Margalef, 1983). Estos sedimentos orgánicos están constituidos por detritos vegetales o animales de origen alóctono y autóctono y se puede distinguir entre materia orgánica bruta (en donde todavía es posible reconocer la anatomía de los restos vegetales) y humus (donde la materia vegetal se observa casi completamente degradada, como una pasta coloidal de color pardo oscuro) (Pérez *et al.*, 2000).

Por otro lado, existen dos tipos de materia suspendida en el agua: partículas inorgánicas y partículas orgánicas, llamadas colectivamente seston. La parte inorgánica consiste en partículas minerales que se transportan a los cuerpos acuáticos por medio de drenaje, erosión del entorno y viento, o se agitan desde el fondo o se forman *in situ*. La parte orgánica se puede dividir en una porción viva que consiste en bacterias, levaduras, hongos, fitoplancton y detritos (Punning *et al.*, 2003).

La entrada de agua por el fondo (como es el caso de los lagos kársticos) conduce a condiciones peculiares de mezcla, suspensión de sedimentos e incluso meromixis, que influyen de manera importante en la biología de los lagos, cuya agua, además de ser siempre rica en bicarbonato cálcico, frecuentemente lo es también en sulfato. En lagos kársticos, la elevada concentración de calcio determina la pobreza de fósforo y la producción baja de estos lagos (Margalef, 1983).

Por otro lado, la remineralización del carbono orgánico, el nitrógeno, el azufre, el fósforo y otros compuestos, se realiza por medio de ciclos biogeoquímicos. Estos ciclos están determinados por la carga externa del ecosistema lacustre y por los materiales producidos en el cuerpo de agua, por los ingresos masivos desde la cuenca de drenado y por la carga externa de nutrientes, que es decisiva para la productividad del ecosistema acuático. Un incremento de producción implica una

disminución de oxígeno, ya que al haber más generación de oxígeno por fotosíntesis se generará una liberación de nutrientes a partir de los sedimentos, pues la producción en estos últimos será oxidada (Wetzel, 1981).

Los sedimentos son particularmente sensibles a los impactos antropogénicos, puesto que, dependiendo de sus características fisicoquímicas, diferentes elementos pueden ser acumulados por tiempos relativamente largos y en concentraciones muy superiores a aquellas encontradas en la columna de agua (Ingersoll, 2003). Por esto, actúan como sumideros de contaminantes y pueden también actuar como fuente de contaminantes hacia la columna de agua ante ciertos cambios en las condiciones fisicoquímicas del medio. Por lo tanto, la clasificación de los sedimentos es necesaria para evaluar la calidad ambiental de un ecosistema acuático, debido a las características y propiedades únicas de los sedimentos (Salomons, 1987).

3. Antecedentes

La cantidad de arcillas y CaCO_3 de los suelos de la cuenca del Río Grande de Comitán está relacionada con los materiales geológicos y los procesos de karstificación, por lo que mientras estos últimos aumentan, se incrementan también las geoformas con depósitos residuales, producto de la disolución de las calizas, el drenaje se torna lento y la capacidad de aireación disminuye, asimismo, mientras que esta cuenca se enriquece en arcilla y en Ca^{+2} aumenta también su alcalinidad (Martínez, 2015).

Cordero (2015) en una reconstrucción de la historia paleoclimática y paleoecológica de la cuenca de La Esmeralda, que se ubica en la región Sur-Sureste del estado de Chiapas, durante el Holoceno tardío, concluye que la vegetación en el área es una transición entre elementos de bosque mesófilo, taxa termófilos y vegetación abierta. Menciona que los cambios en la vegetación están ligados tanto a los cambios en la cuenca como a los cambios en los procesos erosivos, en el ambiente, en los niveles del lago y en los aportes detríticos continentales. Deduce, además, que los sedimentos durante este periodo indican un aumento en la energía con que se depositan. Del mismo modo, define que las condiciones climáticas de la zona de estudio se ven influenciada directamente por los cambios transicionales del fenómeno “El Niño”, el cual se mueve dentro de la zona de convergencia intertropical, generando una influencia indirecta.

Durán (2013) cartografió las unidades morfogénicas del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) estableciendo 17 unidades morfogénicas, de las cuales 8 corresponden a relieves con origen tectónico. Encontró que la alineación estructural (dolinas, uvalas y poljes) se encuentra en dirección NW-SE, coincidiendo con la orientación de los principales lineamientos tectónicos. Concluye además que los cuerpos lacustres de esta zona se desarrollan sobre unidades estratigráficas del Cretácico y que cerca del 70% del área del PNLM consiste en una topografía accidentada, con pendientes de hasta los 67° , seguida por superficies planas que cubren casi el 20% del área.

En otro estudio, Durán *et al.* (2014), elaboraron un mapa geomorfológico a escala 1:50,000 del PNLM, identificando un total de 17 unidades, que se agruparon en 4 conjuntos según su origen: 1) Endógeno, 2) Exógeno acumulativo, 3) Exógeno denudativo fluvio-kárstico y 4) Exógeno denudativo kárstico. Además, concluyen que en el parque existe una relativa heterogeneidad morfológica y de origen del relieve, a pesar de la 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. Asimismo, se concluye que existen en el área de estudio dos grupos de dolinas y uvalas que se pueden distinguir por sus características morfológicas y posición altitudinal. El primer grupo parece haber tenido un proceso de formación dilatado en el tiempo, ya que se observan formas complejas y alargadas. El que presenten agua en la actualidad, indica que el nivel freático presente se ubica a una altitud similar a la que se encuentra la base de las dolinas y uvalas, lo que pone en evidencia que los procesos de disolución siguen activos. El segundo grupo se localiza en la zona de mayor elevación dentro del parque, los procesos de disolución parecen ser relictos, lo cual se deduce de la ausencia de agua.

Por otro lado, Mora *et al.* (2016) delimitaron las principales unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello a partir de la altura, pendiente y rugosidad superficial. Identificaron trece unidades geomorfológicas agrupadas en morfologías de montaña, lomerío y planicie. Concluyen que las unidades de montañas son las que pueden favorecer de manera superficial el movimiento de flujos de sedimentos y nutrientes hacia la base de la cuenca y que la unidad de “Lomerío Bajo de Pendiente Continua y Denudatoria”, expresa características que implican alta movilidad de flujos externos como internos que favorecen la llegada de sedimentos y nutrientes a la base de los lagos aumentando la eutrofización de éstos.

4. Justificación

Los sedimentos poseen gran importancia ecológica en los ecosistemas acuáticos debido, por un lado, a las actividades microbiológicas asociadas a la remineralización de la materia orgánica, un proceso fundamental para la recomposición de los nutrientes disueltos en la columna de agua y, por otro lado, constituyen el hábitat de la comunidad bentónica. Los depósitos de sedimentos en los lagos funcionan bien sea como fuente o como reserva de muchos de los nutrientes esenciales involucrados en el proceso de eutroficación. El intercambio de nutrientes entre los sedimentos y el agua subyacente depende de las características químicas del agua y de las del sedimento (Wetzel, 1981).

Aunque el PNLM es un área natural protegida (CONANP, 2011), son pocos los estudios limnológicos que se han realizado frente a la problemática de la creciente contaminación que afecta al sistema lacustre. Algunos de los lagos ya han sido afectados, principalmente por desechos de los asentamientos humanos y por el cambio de uso de suelo alrededor de éstos (CONANP, 2007).

Debido al contexto del PNLM, es importante la descripción integral del sitio, ya que de este modo se tomarán mejores decisiones en cuanto al manejo que requiera. La presente investigación describe y compara los sedimentos de nueve lagos del PNLM, de diferente profundidad y estado trófico.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Describir las características de los sedimentos de un grupo de nueve lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, incluyendo la diversidad presente en el sitio (lagos prístinos e impactados, someros y profundos).

5.2. Objetivos específicos

- a) Determinar las principales variables texturales de los sedimentos de los nueve lagos.
- b) Determinar el contenido de materia orgánica y carbonatos de los sedimentos de los lagos en estudio.
- c) Determinar la concentración de carbono, nitrógeno y azufre elementales de los sedimentos de los lagos en estudio.
- d) Determinar la relación entre las concentraciones de seston, carbono orgánico particulado y clorofila-a en columna de agua y la cantidad de materia orgánica, carbono, nitrógeno y azufre elemental presentes en los sedimentos.
- e) Evaluar la posible correlación de los parámetros fisicoquímicos del agua supradyacente a los sedimentos con las características sedimentarias.

6. Área de estudio

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” se localiza en la zona sureste del Estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala. Abarca una superficie de 6,425 hectáreas y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria, siendo esta última la que ocupa la mayor parte del Área Natural Protegida. Sus coordenadas son 16° 04' 40" a 16° 10' 20" N y 91° 37' 40" a 91° 47' 40" W. Montebello está comprendido en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma parte de la subcuenta del Río Grande de Comitán con 545 km², que a su vez es parte de la cuenca del Río Lacantún (CONANP, 2007).

Constituye una de las reservas forestales más importantes del Estado de Chiapas, funcionando como un vaso de captación de agua y regulador climático regional. La vegetación que lo caracteriza es de transición entre las regiones de Los Altos de Chiapas y la Selva Lacandona, teniendo especies de bosque templado y de selva tropical. Está reconocida como parte de una cuenca hidrográfica prioritaria para su conservación (FIR, 2013).

En el Parque se presenta clima tipo C(fm) templado húmedo con lluvias todo el año y en el extremo noroeste A(cm) cálido húmedo, con abundantes lluvias en verano (García, 1981). La temperatura media mensual es de 23.6°C con una oscilación térmica anual de 5.6°C. El mes más frío es enero, con un promedio de 20.9°C y el más cálido abril, con un promedio mensual de 25.6°C (CONANP, 2007).

Originalmente estos lagos constituyeron dolinas o úvalas kársticas formadas por el derrumbe de los techos de los sistemas de cuevas subterráneas que se originaron por la disolución química de las calizas, es decir, la disolución de los carbonatos por la actividad química del CO₂ en el agua, sobre todo a lo largo de zonas lábiles (fracturas, poros, impurezas, entre otras). Este complejo lacustre de origen kárstico está comunicado entre sí por conductos subterráneos y pequeños canales superficiales, que funcionan como conductos activos, sobre todo en las temporadas de mayor precipitación. Se alimentan del Río Grande de Comitán, el agua subterránea y procedente de las lluvias (Vázquez y Méndez, 1994).

El proceso de karstificación está acompañado de una acumulación relativa de materiales residuales en las calizas, sobre todo arcillas. Gran parte de este material es arcilloso y junto con un porcentaje de arenas, constituye las otras unidades litológicas que existen en Montebello distribuidas a menor escala como depósitos lacustres (CONANP, 2007).

El registro estratigráfico que aflora en el parque está constituido por paquetes de calizas y dolomitas del Cretácico, mientras que los depósitos de plataforma somera, turbiditas y de cuenca profunda constituyen las unidades del Paleoceno. Finalmente, las unidades del Eoceno al Mioceno están constituidas por depósitos clásticos continentales (Witt *et al.*, 2011).

Se diferencian los siguientes suelos: litosoles, rendzinas, vertisoles, acrisoles, fluvisoles y gleysoles (Melo y Cervantes, 1986). Existe una relativa heterogeneidad morfológica y de origen del relieve, a pesar de la homogeneidad litológica, la cual

podría explicarse por la interacción de los procesos kársticos (exógenos) y tectónicos (endógenos) que tienen lugar en la zona (Durán *et al.*, 2014).

El complejo lacustre se divide en sistemas de lagos, los principales son Tepancoapan y Candelaria. El Sistema Tepancoapan tiene aproximadamente 13 km de longitud. Está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne a los lagos San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, La Encantada, Bartolo, Peñasquito y Yalgüech. Los lagos se comunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. El desagüe parcial del sistema se realiza a través de un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul, a través de un sumidero en el sitio denominado “El Arco”. El Sistema Candelaria, de aproximadamente 7 km de longitud, viaja desde Tziscoa hasta Esmeralda y se compone principalmente de los lagos Tziscoa, Pojoj, Montebello y Cinco Lagos. Las conexiones de este sistema son menos claras ya que son subterráneas (Galicia, 2012).

Los lagos objeto de este estudio son: Balantetic, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Esmeralda, Kichail, La Encantada, Patianú y San Lorenzo (Fig. 1).

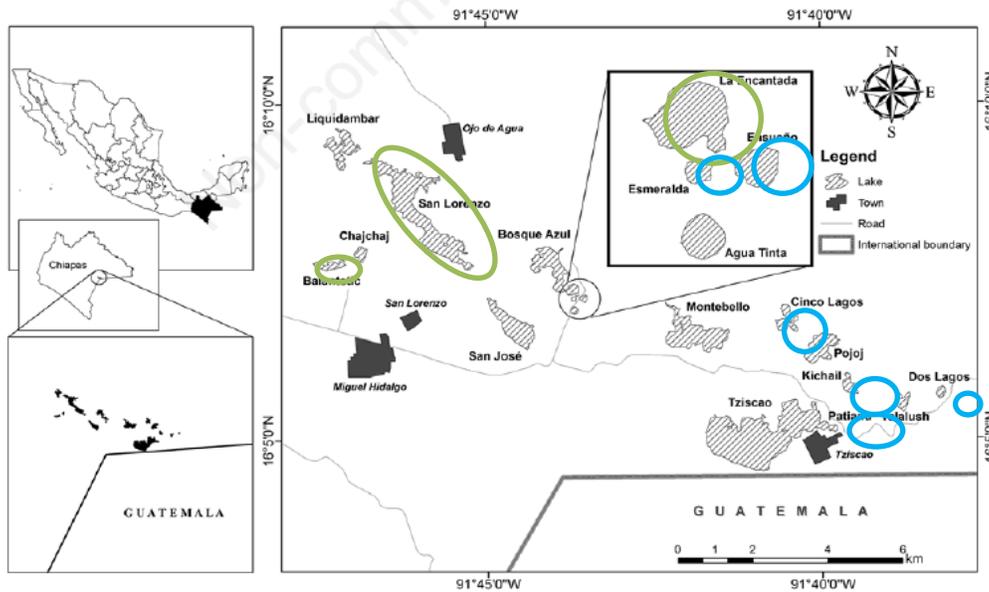


Fig. 1. Ubicación de los lagos en estudio del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016). Las elipses azules encierran los lagos prístinos, las elipses verdes los lagos impactados.

7. Materiales y Métodos

7.1. Trabajo de campo

Las muestras se obtuvieron en dos campañas de muestreo correspondientes a mayo-junio 2013 y mayo 2014. Se muestrearon nueve (9) lagos (Tabla 1) que representan la diversidad lacustre presente en el PNLM: dos someros (uno impactado y otro prístino) y 7 profundos (dos impactados y cinco prístinos).

Tabla 1. Ubicación geográfica de los lagos en estudio del PNLM. Los lagos se enlistan en la tabla de acuerdo con su orientación geográfica (en el eje occidente - oriente). (Alt= altitud en m s.n.m., $Z_{m\acute{a}x}$ = profundidad máxima en m, Z_{med} = profundidad media en m, Som= somero, Prof= profundo, Imp= impactado, Pri= prístino). (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016).

Nombre	Lat (N)	Long (W)	Alt	$Z_{m\acute{a}x}$	Z_{med}	Som/Prof	Edo.
Balantetic	16°07'31.8"	91°47'35.5"	1466	3	1.7	Som	Imp
San Lorenzo	16°07'32.2"	91°45'11.2"	1455	67	11.8	Prof	Imp
Esmeralda	16°07'3.4"	91°43'39.7"	1461	7	3.6	Som	Pri
La Encantada	16°07'8.0"	91°43'37.2"	1454	89	29.4	Prof	Imp
Ensueño	16°07'2.3"	91°43'29.6"	1430	35	21.6	Prof	Pri
Cinco Lagos	16°06'39.7"	91°40'35.0"	1486	162	42.5	Prof	Pri
Patianú	16°05'6.4"	91°39'45.7"	1484	26	10.8	Prof	Pri
Kichail	16°05'45.6"	91°39'35.6"	1475	22	9.5	Prof	Pri
Dos Lagos	16°05'37.6"	91°38'22.0"	1427	42	25.2	Prof	Pri

7.1.1. Caracterización fisicoquímica del agua de fondo

Se emplearon los parámetros fisicoquímicos registrados (temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, conductividad, potencial de óxido reducción y turbidez) en el agua de fondo supradistante al sedimento para analizar la posible correlación con las características sedimentarias. Esta

información fue obtenida de la base datos generada en los proyectos Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua CONAGUA/CONACYT 167603 y DGAPA-PAPIIT-IN219215 cuyo responsable es el Dr. Javier Alcocer Durand.

7.1.1. Sedimentos

Las muestras de sedimentos se obtuvieron de la zona central y más profunda de cada uno de los lagos, por triplicado, utilizando para ello una draga tipo Ekman (15 x 15 x 15 cm) (Fig. 2b). De cada draga se obtuvieron dos submuestras con un nucleador manual de 3 cm de diámetro, considerando solo la capa más superficial. Una de las submuestras se utilizó para el análisis de materia orgánica y carbonatos y la otra para el análisis textural. Cada muestra se puso en bolsas de polietileno previamente rotuladas y fueron guardadas en frío y oscuridad para su posterior análisis en el laboratorio.



Fig. 2. Draga tipo Ekman utilizada para la obtención de sedimentos superficiales.

7.2. Trabajo de Laboratorio

El análisis textural se realizó con un equipo Láser Beckman Coulter LS230 y se aplicó la escala de Wentworth para clasificar los sedimentos. Los parámetros texturales del sedimento siguieron los criterios de Folk (1974).

El contenido porcentual de materia orgánica (MO) y carbonatos del sedimento fue calculado con base en la técnica de pérdida en combustión (LOI, por sus siglas en inglés) a 550 °C y 950 °C, respectivamente (Dean, 1974).

El LOI es una metodología empleada para determinar el contenido en materia orgánica y el contenido en carbonatos de los sedimentos (Dean, 1974). En una primera reacción, la materia orgánica es oxidada a 500-550°C, emitiendo CO₂ y ceniza. En una segunda reacción, se produce la destrucción de los carbonatos a 900-1000°C, con la emisión de CO₂ y la formación de óxidos. La pérdida de peso experimentada por la muestra durante estas reacciones es fácilmente determinada, pesando el sedimento antes y después de ser quemado. Esta pérdida de peso está estrechamente relacionada con el contenido en materia orgánica y carbonatos del sedimento (Dean, 1974; Bengtsson y Enell, 1986).

Finalmente, para C, N y S elemental, se midieron en un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100, las muestras fueron previamente acidificadas.

7.3. Trabajo de gabinete

Los sedimentos se diferenciaron texturalmente según su tamaño en arenas, limos o arcillas para, posteriormente, generar triángulos texturales.

Se realizó un análisis estadístico según los parámetros sugeridos por Folk (1966):

i. Promedio gráfico (media)

$$M_z = \frac{(\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})}{3}$$

ii. **Desviación gráfica estándar grafica inclusiva**

$$\sigma_1 = \frac{(\varphi_{84} - \varphi_{16})}{4} + \frac{(\varphi_{95} - \varphi_5)}{6.6}$$

< 0.35 φ	Muy bien clasificado
0.35 φ a 0.50 φ	Bien clasificado
0.50 φ a 0.71 φ	Moderadamente bien clasificado
0.71 φ a 1.0 φ	Moderadamente clasificado
1.0 φ a 2.0 φ	Mal clasificado
2.0 φ a 4.0 φ	Muy mal clasificado
> 4.0 φ	Extremadamente mal clasificado

iii. **Grado de asimetría gráfica**

$$Skl = \frac{(\varphi_{16} + \varphi_{84} + 2\varphi_{50})}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{(\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50})}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)}$$

1.0 a 0.3	Muy asimétrico hacia los finos
0.3 a 0.1	Asimétrico hacia los finos
0.1 a -0.1	Simétrico
-0.1 a -0.3	Asimétrico hacia los gruesos
-0.3 a -1.0	Muy asimétrico hacia los gruesos

iv. **Curtosis gráfica**

$$KG = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})}$$

< 0.67	Muy platicúrtico
0.67 - 0.90	Platicúrtico

0.90 - 1.11	Mesocúrtico
1.11 - 1.50	Leptocúrtico
1.50 - 3.0	Muy leptocúrtico
>3.0	Extremadamente leptocúrtico

Se ordenaron los datos correspondientes a los parámetros físicoquímicos del agua de fondo: temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, conductividad, potencial de óxido-reducción y turbidez.

Se graficaron y se ordenaron en tablas los diversos datos obtenidos. Se realizaron análisis de conglomerados utilizando el programa Statistica versión 8.0, para el agua de fondo y las características texturales de los sedimentos. Este análisis permite formar grupos según la similitud entre las variables medidas.

8. Resultados

Los resultados de los análisis de los sedimentos y del agua de fondo de las dos campañas de muestreo fueron similares por lo cual se consideraron como réplicas.

8.1. Parámetros fisicoquímicos

8.1.1. Temperatura (T)

Los lagos profundos se encontraron estratificados mientras que los someros circulando. El promedio general de temperatura fue de $19.7 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ (Tabla 2). La temperatura mínima promedio ($T_{\text{mín}}$) se registró en La Encantada con $18.2 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ mientras que la temperatura máxima promedio ($T_{\text{máx}}$) se presentó en Esmeralda con $23.3 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3).

Tabla 2. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Prof= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín - Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som-Imp	21.6 - 22.8	22.3 ± 0.4
San Lorenzo	Pro-Imp	19.5 - 22.3	20.7 ± 1.0
Esmeralda	Som-Pri	22.7 - 23.4	23.1 ± 0.3
La Encantada	Pro-Imp	18.1 - 18.3	18.2 ± 0.1
Ensueño	Pro-Pri	19.7 - 20.0	19.8 ± 0.1
Cinco Lagos	Pro-Pri	18.3 - 18.4	18.3 ± 0.0
Patianú	Pro-Pri	18.0 - 19.9	18.3 ± 0.6
Kichail	Pro-Pri	18.2 - 19.5	18.6 ± 0.4
Dos Lagos	Pro-Pri	18.4 - 18.6	18.5 ± 0.1

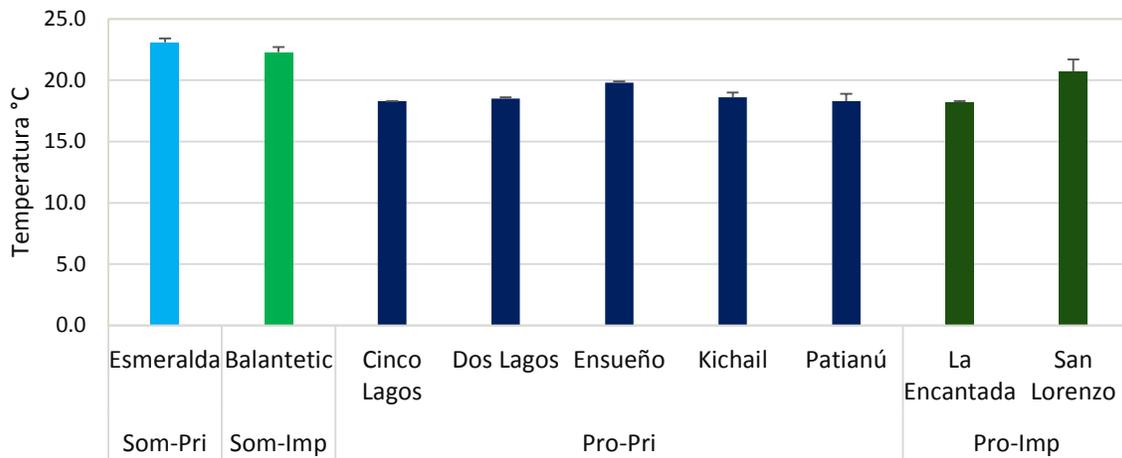


Fig. 3. Temperatura (°C) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.1.2. Oxígeno Disuelto (OD)

Con respecto a las concentraciones de OD (Tabla 3), el fondo de los lagos presentó tendencia a la anoxia en siete de los nueve lagos, excepto en Esmeralda y Balantetic, que presentaron concentraciones ligeramente más altas de OD en el fondo ($\geq 3.94 \text{ mg L}^{-1}$) en comparación con los demás lagos.

Tabla 3. Concentración de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín-Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som - Imp	0.00- 6.31	3.94 ± 2.34
San Lorenzo	Pro - Imp	0.00 - 3.28	0.55 ± 1.12
Esmeralda	Som - Pri	4.51 - 5.43	4.98 ± 0.42
La Encantada	Pro - Imp	0.00	0.00
Ensueño	Pro - Pri	0.00 - 3.12	0.86 ± 1.22
Cinco Lagos	Pro - Pri	0.00 - 3.55	1.36 ± 1.56
Patianú	Pro - Pri	0.00	0.00
Kichail	Pro - Pri	0.00 - 0.37	0.06 ± 0.12
Dos Lagos	Pro - Pri	0.00	0.00

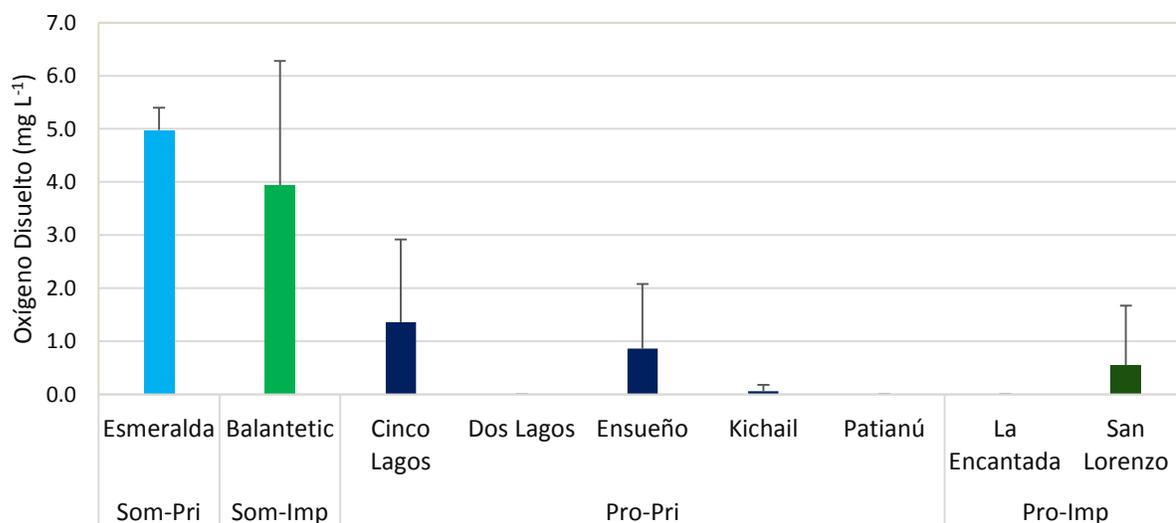


Fig. 4. Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.1.3. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SO)

El máximo porcentaje de saturación se encontró en Esmeralda, con un promedio global de 75.3 ± 7.1 % (Tabla 4). Se registraron valores de 0% La Encantada, Patianú y Dos Lagos. (Fig. 5).

Tabla 4. Porcentaje de saturación de oxígeno en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín – Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som – Imp	0.0 – 92.2	59.5 ± 34.8
San Lorenzo	Pro – Imp	0.0 - 50.3	8.3 ± 17.2
Esmeralda	Som - Pri	65.6 - 81.7	75.3 ± 7.1
La Encantada	Pro - Imp	0.0	0.0
Ensueño	Pro - Pri	0.0 - 42.9	12.2 ± 17.1
Cinco Lagos	Pro - Pri	0.0 - 50.3	19.2 ± 22.1
Patianú	Pro - Pri	0.0	0.0
Kichail	Pro - Pri	0.0 - 5.4	0.8 ± 1.7
Dos Lagos	Pro - Pri	0.0	0.0

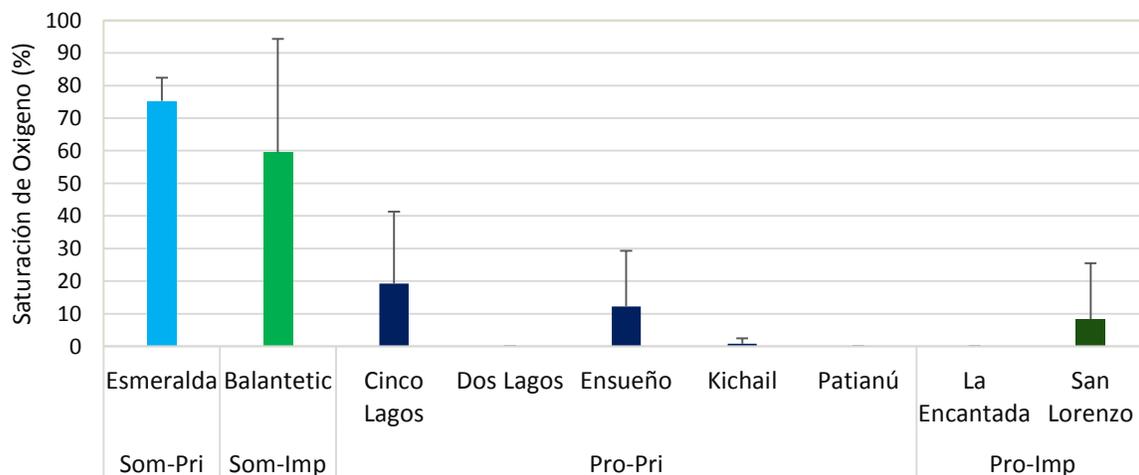


Fig. 5. Porcentaje de saturación de oxígeno (%) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado)..

8.1.4. pH

El intervalo de pH registrados fue de 6.9 a 8.0. El valor promedio máximo de pH se registró en Esmeralda con 7.6 ± 0.3 (Tabla 5) y el promedio mínimo en Dos Lagos con 7.0 ± 0.0 .

Tabla 5. pH en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín - Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som - Imp	7.2 - 7.6	7.5 ± 0.2
San Lorenzo	Pro - Imp	7.0 - 8.0	7.3 ± 0.3
Esmeralda	Som - Pri	7.3 - 7.9	7.6 ± 0.3
La Encantada	Pro - Imp	7.1 - 7.1	7.1 ± 0.0
Ensueño	Pro - Pri	7.2 - 7.5	7.3 ± 0.1
Cinco Lagos	Pro - Pri	7.0 - 7.5	7.2 ± 0.2
Patianú	Pro - Pri	7.1 - 7.2	7.1 ± 0.1
Kichail	Pro - Pri	7.1 - 7.4	7.3 ± 0.1
Dos Lagos	Pro - Pri	6.9 - 7.0	7.0 ± 0.0

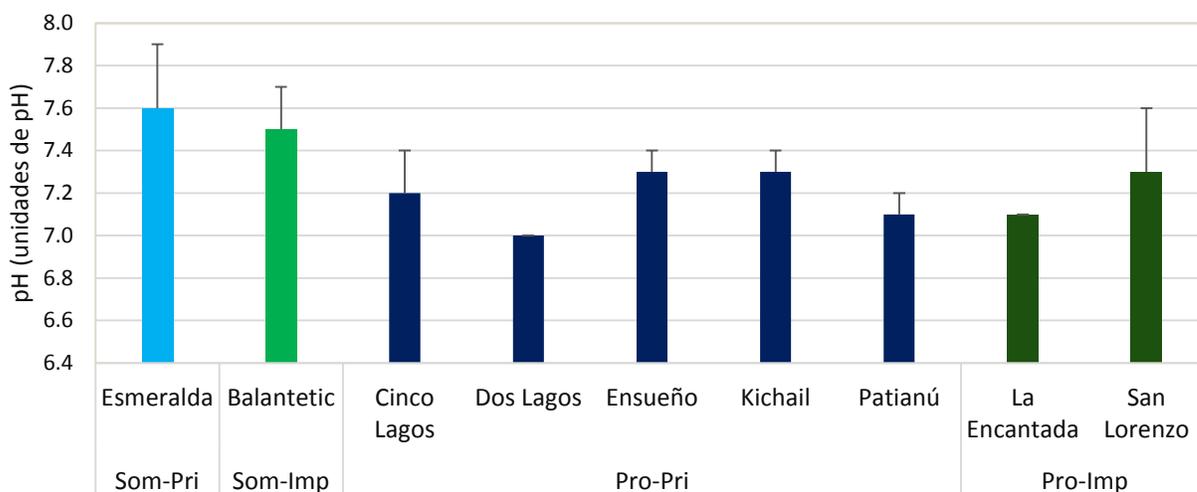


Fig. 6. pH (unidades de pH) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.1.5. Conductividad eléctrica (K_{25})

El valor más alto de K_{25} se registró en Dos Lagos con un promedio $1,298 \pm 77 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 6). El valor mínimo se presentó en Cinco Lagos con $221 \pm 25 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Fig. 7).

Tabla 6. Conductividad eléctrica (μScm^{-1}) en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín - Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som - Imp	473 - 770	560 ± 132
San Lorenzo	Pro - Imp	478 - 788	679 ± 121
Esmeralda	Som - Pri	337 - 351	343 ± 6
La Encantada	Pro - Imp	430 - 443	435 ± 5
Ensueño	Pro - Pri	245 - 263	255 ± 8
Cinco Lagos	Pro - Pri	195 - 246	221 ± 25
Patianú	Pro - Pri	260 - 294	281 ± 9
Kichail	Pro - Pri	242 - 303	278 ± 19
Dos Lagos	Pro - Pri	1,191 - 1,429	$1,298 \pm 77$

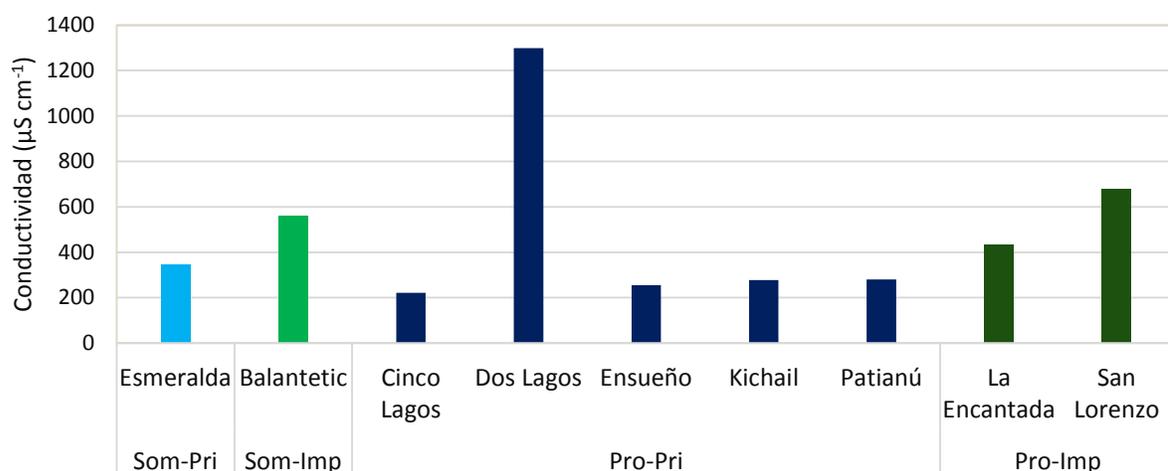


Fig. 7. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.1.6. Potencial de óxido-reducción (Redox)

Los valores de potencial de óxido reducción variaron ampliamente (Tabla 7), siendo el valor promedio mayor de 456.8 ± 2.8 mV en Cinco Lagos y el promedio mínimo en La Encantada con -15 ± 23 mV (Fig. 8).

Tabla 7. Potencial de óxido-reducción (mV) en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín - Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som - Imp	265 - 378	346 ± 48
San Lorenzo	Pro - Imp	-49 - 360	88 ± 152
Esmeralda	Som - Pri	215 - 398	280 ± 82
La Encantada	Pro - Imp	-45 - 11	-15 ± 23
Ensueño	Pro - Pri	269 - 438	344 ± 69
Cinco Lagos	Pro - Pri	454 - 461	456 ± 2
Patianú	Pro - Pri	93 - 257	138 ± 47
Kichail	Pro - Pri	109 - 421	240 ± 99
Dos Lagos	Pro - Pri	-31 - 55	14 ± 29

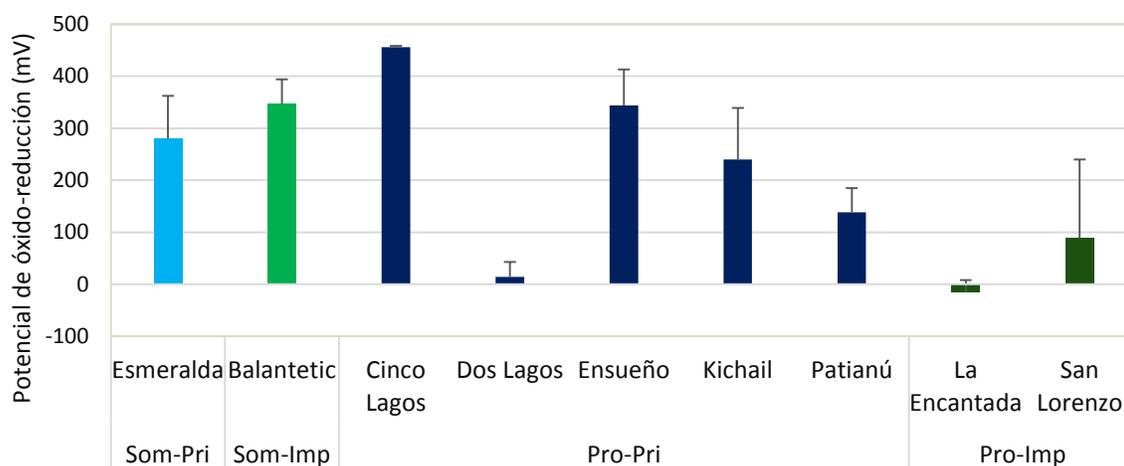


Fig. 8. Potencial de óxido-reducción (mV) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.1.7. Turbidez

Con respecto a la turbidez, el valor promedio general mayor fue de 80 ± 70 NTU, registrado en Balantetic (Tabla 8). Esmeralda registró el valor mínimo promedio (1 ± 0 NTU) (Fig. 9).

Tabla 8. Turbidez (NTU) en agua de fondo de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Mín - Máx	Prom \pm d.e.
Balantetic	Som - Imp	30 - 203	80 ± 70
San Lorenzo	Pro - Imp	5 - 32	12 ± 9
Esmeralda	Som - Pri	1 - 2	1 ± 0
La Encantada	Pro - Imp	2 - 53	15 ± 21
Ensueño	Pro - Pri	2 - 4	3 ± 1
Cinco Lagos	Pro - Pri	1 - 3	2 ± 1
Patianú	Pro - Pri	4 - 29	14 ± 10
Kichail	Pro - Pri	2 - 11	5 ± 4
Dos Lagos	Pro - Pri	2 - 3	3 ± 1

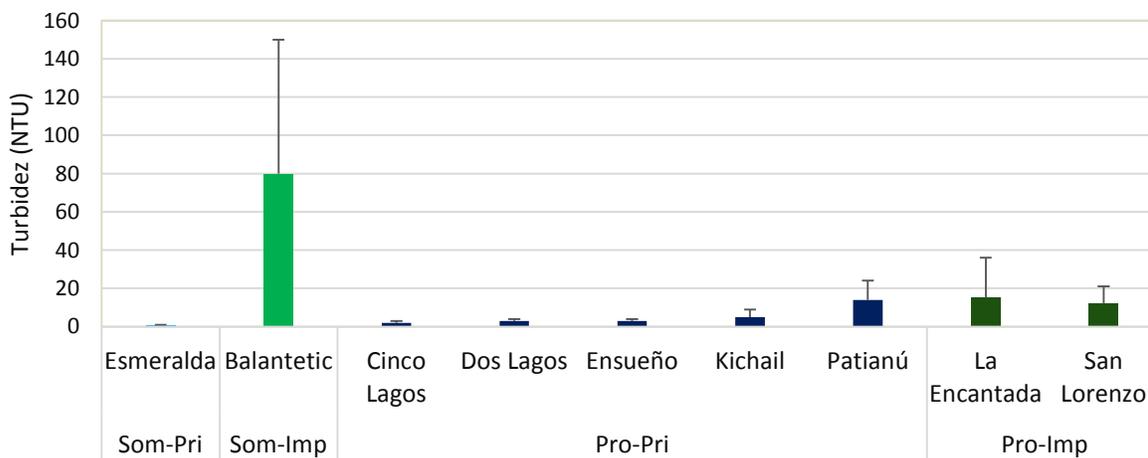


Fig. 9. Turbidez (NTU) promedio del agua de fondo de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas (Som-Pri: somero y prístino; Som-Imp: somero e impactado; Pro-Pri: profundo y prístino, Pro-Imp: profundo e impactado).

8.2 Sedimentos

8.2.1. Tamaño de grano y variables texturales

Con respecto a las características granulométricas, estas se presentan en la Tabla 9. Se reconoció la presencia de tres tipos de tamaño de grano: arenas, limos y arcillas.

Tabla 9. Composición porcentual promedio \pm desviación estándar de arenas (A), limos (L) y arcillas (a). * = Solo se obtuvo un dato. Som = lago somero, Pro = lago profundo, Pri = prístino, Imp = impactado.

Lagos	Profundidad y caracterización trófica	A	L	a
Balantetic	Som - Imp	0.0 \pm 0.0	49.7 \pm 4.9	50.3 \pm 5.0
San Lorenzo	Pro - Imp	4.2 \pm 5.3	64.8 \pm 18.9	31.1 \pm 24.3
Esmeralda	Som - Pri	37.4 \pm 36.9	49.5 \pm 21.6	13.2 \pm 15.2
La Encantada	Pro - Imp	12.8 \pm 2.0	73.0 \pm 6.7	14.3 \pm 4.7
Ensueño	Pro - Pri	5.9*	59.7*	34.3*
Cinco lagos	Pro - Pri	90.5 \pm 2.4	9.0 \pm 2.0	0.3 \pm 0.4
Patianú	Pro - Pri	1.5 \pm 1.8	70.1 \pm 8.7	28.4 \pm 10.5
Kichail	Pro - Pri	58.6*	40.8*	0.6*
Dos Lagos	Pro - Pri	44.4 \pm 2.8	51.1 \pm 19.5	4.6 \pm 3.3

Los grupos texturales (Fig. 10) se identificaron con el apoyo del diagrama ternario de Shepard (1954). La textura limo arcillosa se presentó en un mayor número de lagos.

De los lagos someros, el prístino Esmeralda presentó textura limo arenosa, la cual refleja tamaños de sedimento en su mayoría medianos y gruesos. En cuanto al impactado Balantetic, fue el único lago que mostró textura arcillo limosa, colocándose como el lago con la textura más fina de este estudio.

Los lagos profundos prístinos presentaron tamaño de grano mediano-grande ya que tienen un mayor contenido de arenas y limos. Por otro lado, Ensueño y Patianú (profundos y prístinos), La Encantada (profundo e impactado) y Balantetic

y San Lorenzo (somero y profundo, respectivamente; ambos impactados) presentaron textura limo arcillosa.

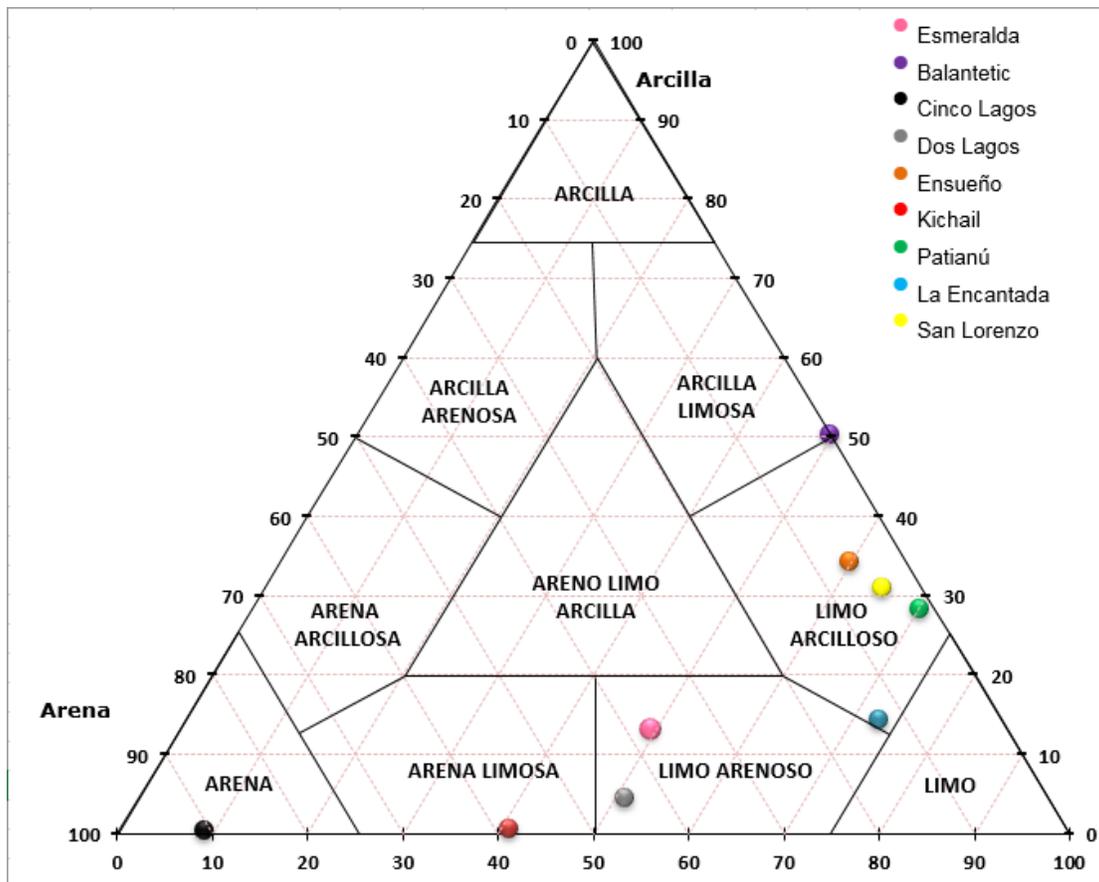


Fig. 10. Grupos texturales según la posición de los sedimentos de los 9 Lagos de PNLM en el diagrama ternario propuesto por Shepard (1954).

En los lagos prístinos, la textura limo arenosa y limo arcilloso fueron las que se presentaron con mayor frecuencia. En cuanto a los lagos impactados se observa una tendencia al grano mediano-fino.

Los lagos someros presentaron casi el mismo contenido en limos, sin embargo, la concentración de arenas en el prístino y arcillas en el impactado fue lo que definió que tuvieran texturas diferentes. En lagos profundos hay una clara dominancia de la textura limo arcillosa.

En la Tabla 10 se presentan los resultados del análisis estadístico según el criterio de Folk (1974), donde se reconoce que todos los lagos mostraron ser de mal a

muy mal clasificados, así como de asimétricos a muy asimétricos hacia los finos, a excepción de Balantetic, que mostró simetría.

Tabla 10. Parámetros estadísticos granulométricos de los lagos de este estudio. Mzf = promedio gráfico, slf = desviación estándar gráfica inclusiva, Skl = grado de asimetría gráfica, KG = curtosis gráfica.

Lagos	Mzf	slf		Skl		KG	
Balantetic	7.93	1.72	mal clasificado	0.02	simétrico	0.92	mesocúrtico
San Lorenzo	6.01	1.76	mal clasificado	0.2	asimétrico a los finos	1.08	mesocúrtico
Esmeralda	6.32	2.28	muy mal clasificado	0.42	muy asimétrico a los finos	0.81	platicúrtico
La Encantada	5.96	2.05	muy mal clasificado	0.35	muy asimétrico a los finos	0.97	mesocúrtico
Ensueño	6.99	2.42	muy mal clasificado	0.24	asimétrico a los finos	0.66	muy platicúrtico
Cinco lagos	2.33	1.27	mal clasificado	0.15	asimétrico a los finos	1.03	mesocúrtico
Patianú	7.50	1.93	mal clasificado	0.18	asimétrico a los finos	0.84	platicúrtico
Kichail	3.81	1.11	mal clasificado	0.17	asimétrico a los finos	0.92	mesocúrtico
Dos Lagos	5.03	1.65	mal clasificado	0.26	asimétrico a los finos	1.01	mesocúrtico

8.2.2. Contenido de materia orgánica (MO) y carbonatos (CO₃)

Los porcentajes de MO en los sedimentos fueron elevados en todos los casos y variaron de 16.5 ± 0.7% a 53.0% (Esmeralda y Kichail, respectivamente). El contenido general de MO presentó un promedio de 26.1 ± 13.7%. Por otro lado, la concentración de CO₃ varió de 9.4 ± 10.5% en Esmeralda a 80.4 ± 23.7% en Cinco Lagos (Tabla 11), con un promedio general de 33.8 ± 28.0%.

Tabla 11. Contenido porcentual (%) de materia orgánica (MO) y de carbonatos (CO₃) registrados en los sedimentos de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado.* = Solo se obtuvo un dato.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	MO (%)	CO ₃ (%)
Balantetic	Som - Imp	19.0 ± 8.5	47.4 ± 48.3
San Lorenzo	Pro - Imp	19.5 ± 7.8	75.1 ± 13.9
Esmeralda	Som - Pri	16.5 ± 0.7	9.4 ± 10.5

La Encantada	Pro - Imp	23.0± 2.8	19.1± 26.8
Ensueño	Pro - Pri	19.0*	10.4*
Cinco Lagos	Pro - Pri	47.0 ± 14.1	80.4 ± 23.7
Patianú	Pro - Pri	19.0 ± 0.0	11.2 ± 12.1
Kichail	Pro - Pri	53.0*	35.0*
Dos Lagos	Pro - Pri	19.0 ± 1.4	15.9 ± 19.0

En cuanto a la MO, los lagos prístinos mostraron diferencias considerables, presentando el somero Esmeralda ($16.5 \pm 0.7\%$) los valores mínimos, en tanto que el profundo Kichail presentó el valor máximo (53.0%). Los lagos impactados presentaron concentraciones muy similares de MO, con una diferencia no mayor al 4% (19.5-23.0%).

En cuanto a los lagos someros, no mostraron diferencias importantes en el contenido de MO, ya que éste no fue mayor al 2.5%, encontrándose ambos por debajo del valor promedio. Sin embargo, los lagos profundos si presentaron diferencias, en especial Cinco Lagos y Kichail (27% sobre la media).

El contenido de CO_3 en los lagos prístinos fue mínimo en Esmeralda ($9.4 \pm 10.5\%$) y máximo en Cinco Lagos ($80.4 \pm 23.7\%$). En los lagos impactados también se presentaron diferencias importantes en el contenido de CO_3 , los valores más altos (San Lorenzo) se encuentran 42% por encima de la media y los valores más bajos (La Encantada) con un 14% por debajo de la media.

8.2.3 Contenido de C, N y S elementales

Los porcentajes de C variaron entre 3.4% (Ensueño) y 25.2% (Kichail). Los porcentajes de N variaron entre $0.4 \pm 0.2\%$ (Ensueño y Esmeralda) y 2.3% (Kichail). Los porcentajes de S variaron entre 0% (Ensueño) y $1.3 \pm 0.7\%$ (San Lorenzo) (Tabla 12).

Tabla 12. Contenido de carbono (C), nitrógeno (N) y azufre (S) elementales registrados en los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM, Chiapas. *= Solo se obtuvo un dato. Som = lago somero, Pro = lago profundo, Pri = prístino, Imp = impactado.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	C (%)	N (%)	S (%)
Balantetic	Som - Imp	5.7 ± 5.1	0.7 ± 0.4	1.0 ± 1.3
San Lorenzo	Pro - Imp	6.6 ± 4.0	1.0 ± 0.7	1.3 ± 0.7
Esmeralda	Som - Pri	6.9 ± 7.2	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.2
La Encantada	Pro - Imp	10.9 ± 4.4	0.6 ± 0.3	0.5 ± 0.0
Ensueño	Pro - Pri	3.4*	0.4*	0.0*
Cinco Lagos	Pro - Pri	22.4 ± 3.6	1.7 ± 0.7	0.6 ± 0.1
Patianú	Pro - Pri	5.5 ± 0.3	0.5 ± 0.1	0.2 ± 0.3
Kichail	Pro - Pri	25.2*	2.3*	1.1*
Dos Lagos	Pro - Pri	13.4 ± 3.0	0.6 ± 0.0	1.0 ± 0.8

En cuanto a la composición elemental de C, N y S, no se encontró patrón alguno para los lagos someros y profundos, ni para prístinos e impactados.

9. DISCUSIÓN

Un aspecto fundamental de los sistemas acuáticos son las características fisicoquímicas del agua, que generalmente están influenciadas por la naturaleza del sustrato y el clima; sin embargo, algunos sistemas pueden tener variaciones relacionadas con el incremento de la materia orgánica. Estos parámetros inciden en las condiciones bióticas, ya que se presentan organismos tanto autótrofos como heterótrofos que son susceptibles a las variaciones del pH, conductividad eléctrica, temperatura del agua y oxígeno disuelto, entre otras, presentándose una relación entre los organismos y las variaciones ambientales, ya que tales parámetros ayudan a la interpretación de la capacidad productiva de los recursos acuáticos y su comportamiento en el tiempo y el espacio (Margalef, 1983).

Todos los lagos de este estudio presentaron temperaturas altas en las épocas de muestreo ($> 18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), concordando con Salas y Martino (2001) quien define a un lago cálido tropical basándose en una temperatura mínima de 10°C durante condiciones normales y un promedio anual mínimo de 15°C . Con base en ello, los someros deben presentar un patrón térmico de polimixis cálida, mientras que los profundos de monomixis cálida, avalado tanto por la temperatura como por la concentración de oxígeno disuelto (Alcocer *et al.*, 2000).

Un análisis de conglomerados con base en las características fisicoquímicas del agua del fondo de los lagos permitió identificar tres agrupaciones (Fig. 11).

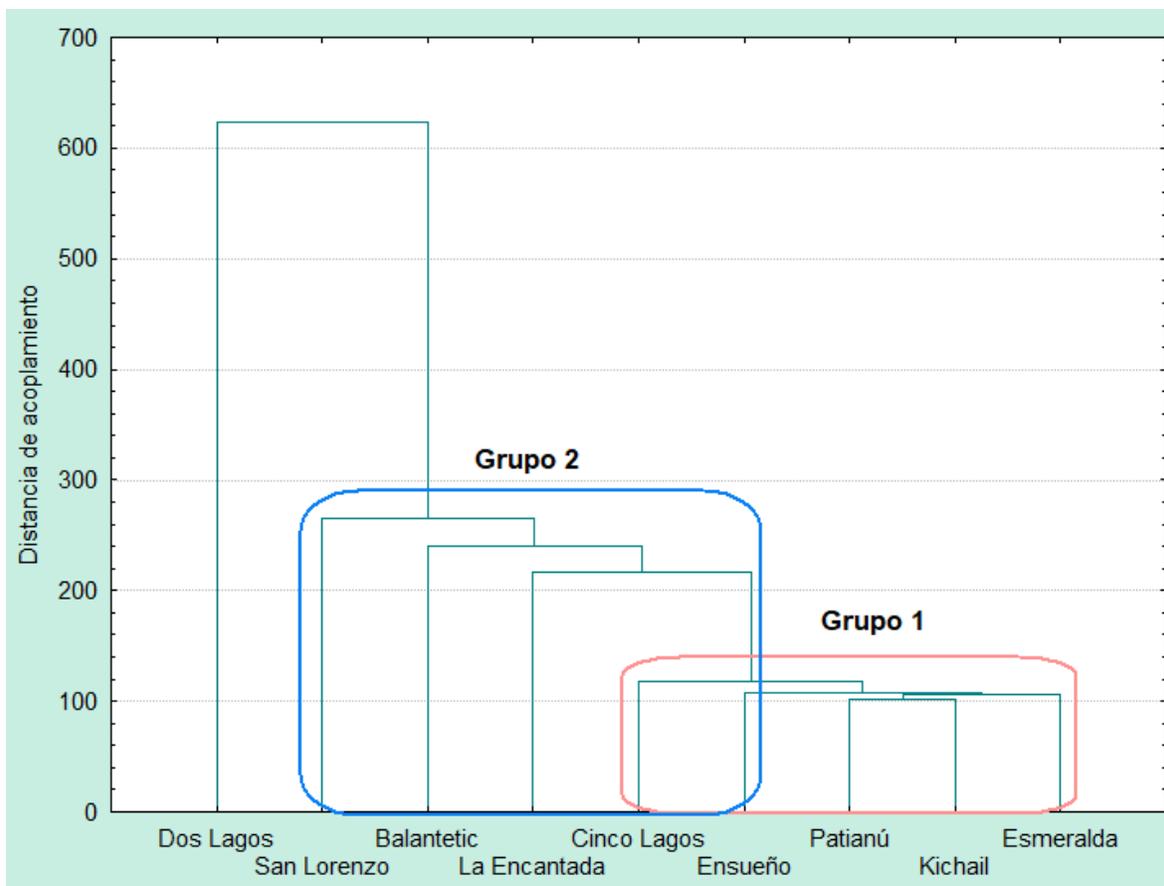


Fig. 11. Análisis de cúmulos (distancias Euclidianas, enlace único) basado en las características fisicoquímicas del agua de fondo de los 9 lagos de PNLM.

Se puede identificar un primer grupo, formado por Cinco Lagos, Ensueño, Patianú, Kichail y Esmeralda, los cuales corresponden a los lagos prístinos. Los demás lagos se van asociando de manera independiente, uno a uno, y entre ellos se puede identificar otro grupo de 3 lagos que coincide con los lagos considerados como impactados: San Lorenzo, Balantetic y La Encantada. El primer lago en separarse del resto de los lagos estudiados es Dos Lagos, resultó ser diferente a los demás (p.ej., conductividad más elevada) lo que probablemente sea el reflejo de ser un lago meromíctico (ya que recibe aportes de agua salada), el único identificado en el PNLM (Alcocer, 2017).

Estudios anteriores (Alcocer *et al.*, 2018; Mora *et al.*, 2017) han evidenciado los efectos que han tenido los aportes del Río Grande de Comitán, la erosión y aguas

residuales urbanas y agrícolas en los lagos de la porción NW del PNLM, justo donde están ubicados los lagos impactados considerados en este estudio. Las alteraciones que presentan los lagos impactados se reflejan claramente en análisis de conglomerados al separarse los lagos impactados de los prístinos.

El Plan Rector de Producción y Conservación (SAGARPA-FIRCO, 2007a, b, c y d) y los Diagnósticos Socioeconómicos (Pérez *et al.*, 2007) reportan que, en la porción de la cuenca de La Independencia y La Trinitaria, el Río Grande de Comitán se encuentra fuertemente contaminado por agroquímicos y aguas negras del municipio de Comitán, las cuales desembocan en el sistema de humedales que se localiza en las cercanías del PNLM, en el extremo NW. En la cuenca Lagunas de Montebello los suelos son delgados, como resultado de una fuerte erosión, principalmente en las zonas de ladera. La degradación de los suelos se ha dado por el alto grado de deforestación, el cambio de usos de suelo forestal a agropecuario, así como la extracción de materiales pétreos y maderables que se encuentran en la cuenca (Pérez *et al.*, 2007. Lo anterior concuerda con la clasificación de los lagos de este estudio, ya que el análisis del agua de fondo coincide con que los lagos que se encuentran próximos a las regiones pobladas del valle son diferentes fisicoquímicamente a los que se encuentran más alejados en la parte de montaña (Ver Fig. 1).

Con respecto al análisis de conglomerados realizado para identificar grupos con base en la textura sedimentaria mostró la asociación en 2 grupos, dejando a Cinco Lagos aparte. Un primer grupo fue conformado por Kichail (profundo), Dos Lagos (profundo) y Esmeralda (somero); el segundo grupo estuvo conformado por un lago somero, Balantetic, y los profundos Patianú, San Lorenzo, La Encantada y Ensueño (Fig. 12).

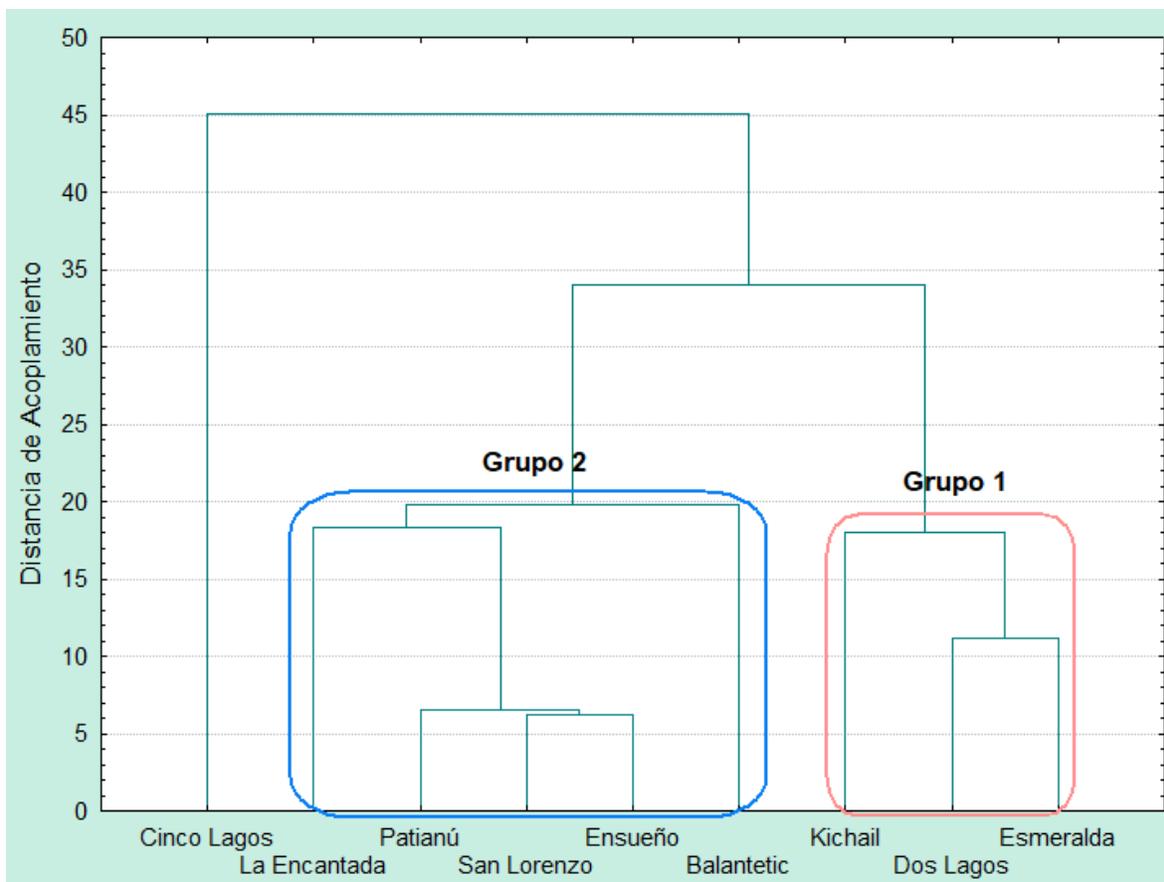


Fig. 12. Análisis de conglomerados (distancias Euclidianas, enlace único) basado en la composición textural de los 9 lagos de PNLM.

El primer grupo está conformado por lagos prístinos. Estos lagos presentan texturas intermedias limo arenosas, siendo notable los limos, como el tamaño de grano dominante. Una característica importante es que todos los lagos de este grupo mostraron sedimentos de mal a muy mal clasificados, lo que puede indicar poco transporte de los mismos. Los sedimentos de este grupo muestran asimetría hacia las partículas finas.

El segundo grupo está formado por una combinación de lagos impactados y prístinos. Todos presentan texturas intermedias limo arcillosas y sedimentos de mal a muy mal clasificados y asimetría hacia las partículas finas.

El análisis de conglomerados realizado para identificar grupos con características sedimentarias similares mostró 2 grupos principales y dos lagos independientes que se fueron enlazando uno a uno (Fig. 13).

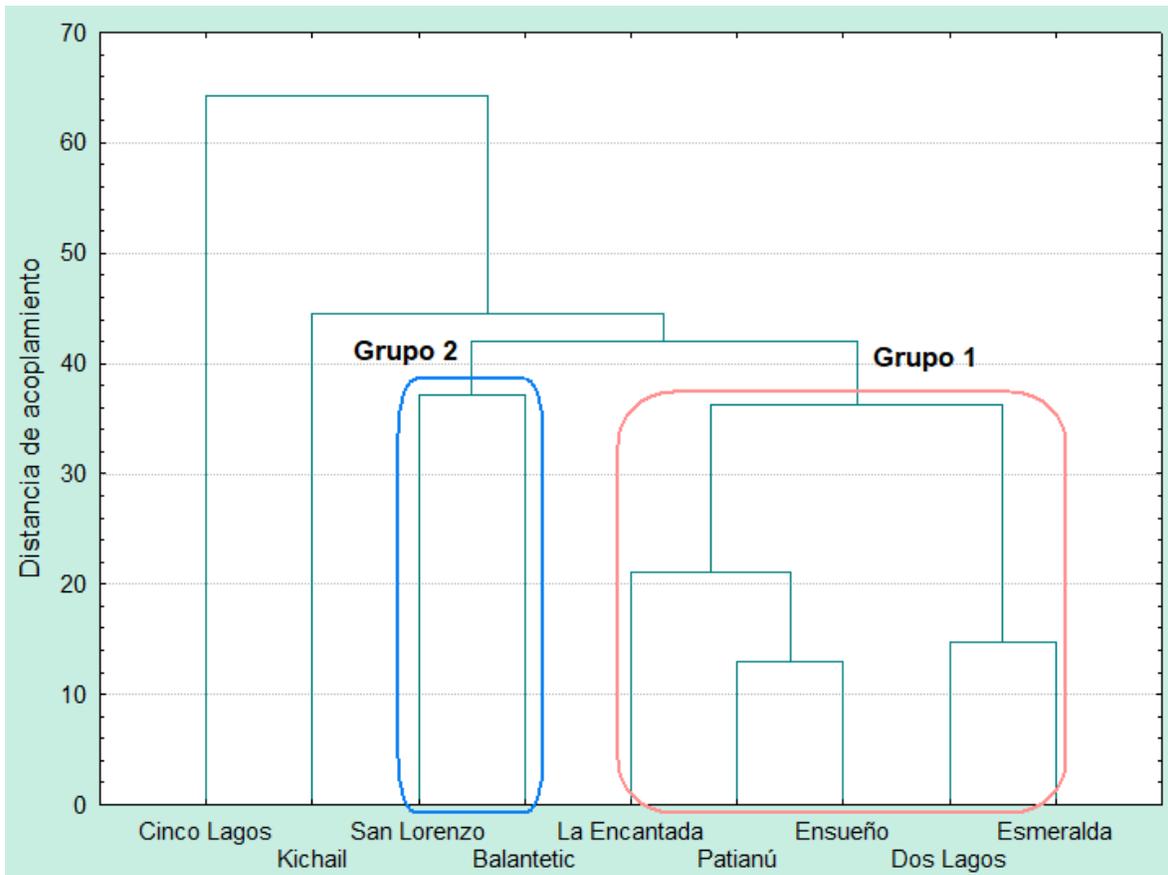


Fig. 13. Análisis de cúmulos (distancias Euclidianas, enlace único) basado en las características sedimentarias de los 9 lagos de PNLM de este estudio.

En cuanto al contenido de MO , CO_3 y de C , N y S elementales, el grupo 1 integrado por La Encantada, Patianú, Ensueño, Dos Lagos y Esmeralda presentó valores menores que el grupo 2. El grupo 2 lo conformaron San Lorenzo y Balantetic, ambos impactados, los cuales presentan las concentraciones mayores de MO , CO_3 y de C , N y S elementales, en especial de S . Estos lagos se encuentran cerca uno del otro y, además, rodeados de zonas pobladas. Las altas

concentraciones de S y N en este grupo puede ser el resultado de los aportes de agua provenientes de las zonas de cultivo como sugieren Mora *et al.* (2017).

Kichail y Cinco Lagos, ambos profundos y prístinos, resultaron diferentes entre sí y diferente a los otros lagos de los dos grupos mencionados. El contenido de MO y CO₃ en ambos lagos está por encima del promedio, situación que se repitió con el contenido elemental de C y N. Finalmente, Kichail mostró concentraciones muy altas de S elemental, en comparación a otros lagos de este estudio.

En un sistema léntico la materia particulada se deposita horizontalmente de manera diferencial, en forma tal, que las partículas de mayor tamaño, con tasas de sedimentación rápidas, se depositan suavemente en los sedimentos a lo largo y ancho de la cubeta del sistema. Las partículas de tamaño menor, con velocidades de sedimentación más bajas, son llevadas en suspensión en las aguas turbulentas del epilimnion y transportadas por el lago según la dirección de las corrientes inducidas por el viento, y depositadas preferentemente en las orillas (Wetzel, 1981).

Lo anterior ha sido estudiado en diferentes lagos, como en el Lago Escondido, un lago tropical profundo y mesotrófico de la región de los Tuxtlas, Veracruz. Allí se encontró que en las áreas más profundas prevalece la textura arcillo limosa (Pérez *et al.*, 2000), al igual que en los impactados Balantetic y San Lorenzo, donde se presenta la misma textura sedimentaria.

Romero y Mejía (2007) reportan que en el Lago Yojoa, en las cercanías de la Montaña de Santa Bárbara y Poza Azul en Honduras, se encuentran depósitos de roca caliza y la topografía es kárstica e irregular con varias depresiones de drenaje subterráneo, encontrándose en las zonas profundas textura limosa, al igual que en Dos Lagos, Patianú y La Encantada, todos ellos prístinos profundos.

Por otro lado, la cantidad de materia orgánica en los sedimentos depende, entre otros factores, de la textura de los sedimentos, de la tasa de sedimentación y de la relación entre las velocidades de aporte y de descomposición de la materia orgánica (Pineda, 2009). Por lo general, existe la tendencia a que en sedimentos de textura gruesa exista una baja retención de materia orgánica, como es el caso de Esmeralda y Dos Lagos. Al ser pequeña la fracción de ésta, las sustancias como carbohidratos, proteínas, péptidos y aminoácidos, de los cuales derivan los principales nutrientes, también serán escasos (Ramírez, 1988).

En términos de MO se registraron altas concentraciones en Cinco Lagos (57%), Kichail (53%), San Lorenzo y Balantetic (ambos con 25%), similares a lo reportado para otros lagos tropicales como Lago Escondido y Catemaco, Veracruz (Tabla 15). Se ha reportado que los sedimentos en aguas anóxicas contienen mayor concentración de MO que los presentes en aguas oxigenadas. Esto probablemente no sea consecuencia de las condiciones anóxicas sino más bien sea respuesta a la alta productividad que dio origen a las condiciones anóxicas (Deuser, 1975), lo que podría explicar lo que ocurre en San Lorenzo.

Sin embargo, lo anterior no explica el contenido en Cinco Lagos y Kichail, ya que ambos se han reportado como ultraoligotrófico y oligotrófico, respectivamente, y con cantidades de MO más elevada que en los demás lagos. A diferencia de los lagos templados, los lagos tropicales presentan temperaturas más elevadas y por ende contienen una menor concentración de OD y un metabolismo microbiano más acelerado, por lo cual, aunque se presenten concentraciones reducidas de materia orgánica, los lagos se tornan fácilmente anóxicos (Lewis 1996). Las temperaturas del hipolimnion en regiones tropicales generalmente son mayores a 15°C. Esta temperatura mayor ocasiona tasas de descomposición de MO más aceleradas en el orden de cuatro a nueve veces más rápida que en el hipolimnion de lagos templados. Por lo anterior, se espera que los lagos tropicales acumulen menor MO en el fondo en comparación con los lagos de zonas templadas (Roldan,

2008). Según el razonamiento anterior y la concentración de MO medida en otros lagos se considera que el porcentaje de MO en los lagos de este estudio es alto.

Pérez *et al.* (2000) describen que, en Laguna Escondida, Los Tuxtlas, Veracruz, un lago pequeño y profundo ($z_{\max}= 32.5$ m) ubicado en una zona en donde ya es notable el impacto de las actividades humanas, sus zonas más profundas presentan concentraciones de MO que fluctúan entre 20 y 30%, lo cual concuerda bien con los lagos impactados de este estudio.

Ungemach (1960) propuso una clasificación considerando las características de los sedimentos de 39 lagos europeos y uno africano; divide los sedimentos lacustres en dos categorías: a) aquellos sedimentos con porcentaje de materia orgánica mayor del 10% que los clasifica como sedimentos orgánicos del tipo gyttja y b) los que presentan porcentajes menores del 10% y designados como sedimentos minerales. Con base en lo anterior, todos los lagos de este estudio se ajustan a la clasificación sedimentos de tipo gyttja.

En cuanto a la cantidad de carbonatos hallada en los lagos de este estudio, ésta es muy alta en comparación con lo reportado en otros lagos kársticos. Tal es el caso de Cinco Lagos (63.6% y 97.1%) y San Lorenzo (84.9% y 65.2%), en comparación, por ejemplo, con los lagos Macanché (6%) en Yucatán y Petén Itzá (2.6%) en Guatemala (Tabla 13).

Tabla 13. Contenido porcentual (%) de materia orgánica y carbonatos en diferentes lagos tropicales. ND= No hay datos.

Lago	Origen	MO	Carbonatos	Localidad	Referencia
Lago Escondido	Volcánico	20 - 30	ND	Veracruz, México	Pérez <i>et al.</i> , 2000
Catemaco	Volcánico	20 - 30	1.24 - 2.23	Veracruz, México	Pérez <i>et al.</i> , 1994
Laguna del Parque Norte	Fluvial	8.3 - 16.5	ND	Medellín, Colombia	Ramírez y Noreña, 2004
Zempoala	Volcánico	0 - 28.2	0.01 - 0.02	Cuernavaca, México	Díaz <i>et al.</i> , 2005
Izabal	Tectónico y kárstico	3.5	0.54	Izabal, Guatemala	Pérez <i>et al.</i> , 2008
Petén Itza	Tectónico y kárstico	10.2	2.59	El Petén, Guatemala	Pérez <i>et al.</i> , 2008
Laguna Perdida	Tectónico y kárstico	17.7	0.11	El Petén, Guatemala	Pérez <i>et al.</i> , 2008
Macanché	Tectónico y kárstico	15.8	6.04	Yucatán, México	Pérez <i>et al.</i> , 2008
Yaxha	Tectónico y kárstico	6.8	0.35	El Petén, Guatemala	Pérez <i>et al.</i> , 2008
Esmeralda	Kárstico	16 - 17	2 - 16.9	Chiapas, México	Este estudio
Balantetic	Kárstico	13 - 25	13 - 81.6	Chiapas, México	Este estudio
Cinco Lagos	Kárstico	37 - 57	63.6 - 97.1	Chiapas, México	Este estudio
Dos Lagos	Kárstico	18 - 20	2.5 - 29.3	Chiapas, México	Este estudio
Ensueño	Kárstico	19	10.4 - 10.4	Chiapas, México	Este estudio
Kichail	Kárstico	53	35	Chiapas, México	Este estudio
Patianú	Kárstico	19	2.6 - 19.7	Chiapas, México	Este estudio
La Encantada	Kárstico	21 - 25	0.1 - 38	Chiapas, México	Este estudio
San Lorenzo	Kárstico	14 - 25	65.2 - 84.9	Chiapas, México	Este estudio

La cantidad de C y N de origen orgánico es una propiedad importante para determinar el contenido en materia orgánica del sedimento lacustre y aporta información sobre la productividad del lago. La materia orgánica autóctona es más rica en compuestos proteínicos de bajo peso molecular, ricos en N y de baja proporción C/N (típicamente < 10). En tanto que la MO alóctona terrestre se encuentra enriquecida en material húmico, que tiene un peso molecular más elevado, es rica en compuestos de C y la proporción C/N tiende a ser mucho más elevada, con valores que oscilan entre 20 y 30 (Meyers y Ishiwatari, 1993). La proporción C/N > 10-12 es típica de sedimentos superficiales de lagos meso-eutróficos y, en general, los valores por debajo de ese intervalo indican un incremento en la productividad primaria, usualmente provocada por contaminación antropogénica (Pisanty y Caso, 2006) (Tabla 14).

Tabla 14. Correspondencia de la relación C/N y el origen de la materia orgánica (Tomado de Pisanty y Caso, 2006).

Fuente de materia orgánica	C/N
Autóctona	<10
Alóctono-Autóctono (Mixta)	10 - 20
Alóctona	20-30

De acuerdo con lo anterior, en los lagos impactados (Balantetic y San Lorenzo) y en los prístinos profundos (Ensueño, Kichail y Patianú) la relación C/N sugiere que la MO que llega al fondo tiene origen autóctono (Tabla 15). En los demás lagos la relación C/N sugiere que el aporte de MO procede de ambas fuentes, tanto autóctona como alóctona (mixta).

Tabla 15. Origen de la materia orgánica, según la relación C/N para los nueve lagos de PNLM.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Z _{máx} (m)	C/N	
Balantetic	Som - Imp	3	5.6 - 9.5	Autóctona
San Lorenzo	Pro - Imp	67	6.23 - 8.04	Autóctona
Esmeralda	Som - Pri	7	6.44 - 22.20	Autóctona - Alóctona
La Encantada	Pro - Imp	89	16.95 - 17.03	Autóctona - Alóctona
Ensueño	Pro - Pri	35	9.36	Autóctona
Cinco lagos	Pro - Pri	162	11.09 - 16.24	Autóctona - Alóctona
Patianú	Pro - Pri	26	9.45 - 11.54	Autóctona
Kichail	Pro - Pri	22	11.11	Autóctona
Dos Lagos	Pro - Pri	42	17.07 - 24.95	Mixta - Alóctona

De acuerdo a la Tabla 15, en cinco de los nueve lagos (Balantetic, Ensueño, Kichail, Patianú y San Lorenzo) existe un mayor aporte de sedimentos autóctonos en comparación con los alóctonos (material transportado a un lago a través de las corrientes de agua, erosión y/o escorrentía superficial).

En cuanto a las concentraciones de N elemental solo Cinco Lagos y Kichail presentaron valores superiores al promedio (0.91 ± 0.66); los demás lagos se encontraron por debajo de este valor. La importancia de la concentración de este macronutriente en un lago está directamente relacionada con la existencia de la vida en el mismo, ya que es parte fundamental de las proteínas que forman la base estructural de los seres vivos (Roldán, 2008).

Las altas concentraciones de MO en el sedimento pueden ser reflejo de las altas concentraciones de seston y Clor-a en el agua, como es el caso de Balantetic y La Encantada (Tabla 16). Sin embargo, Cinco Lagos presenta una de las mayores concentraciones de MO en sedimentos, lo cual no parece estar relacionado con su contenido ni de seston ni de Clor-a en columna de agua, clasificándose como ultraoligotrófico, siendo profundo y prístino. Esto puede ser resultado de aportes

alóctonos y, por ello, a pesar de ser poco productivo recibe MO de la cuenca de drenaje.

En cuanto al COP, este 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 MO en el ecosistema (Longhurst y Pauly, 1997), además presenta una relación cercana a la dinámica del fitoplancton (Punning *et al.*, 2003).

Tabla 16. Concentración de seston (en mg L⁻¹, Vargas, 2017), carbono orgánico particulado (COP en µg L⁻¹, Oseguera y Alcocer, 2015) y clorofila-a (Clor-a en µg L⁻¹, Hernández, 2016; Maya, 2017) en columna de agua de los lagos en estudio. Som= lago somero, Pro= lago profundo, Pri= prístino, Imp= impactado, Mín= valor mínimo, Máx= valor máximo, Prom= promedio, d.e.= desviación estándar, ND= No se obtuvieron datos. * Solo se realizó una medición, debido a su baja profundidad.

Lago	Profundidad y caracterización trófica	Seston	COP	Clor-a
		Prom ± d.e.	Mín-Máx	Prom ± d.e.
Balantetic	Som - Imp	61.2*	2,184*	42.1 ± 5.9
San Lorenzo	Pro - Imp	11.6 ± 3.2	1,817-6,628	50.0 ± 23.4
Esmeralda	Som - Pri	2.6*	651*	0.8 ± 0.2
La Encantada	Pro - Imp	7.7 ± 5.1	835-5,791	8.0 ± 6.3
Ensueño	Pro - Pri	0.7 ± 0.2	365-435	0.3 ± 0.1
Cinco Lagos	Pro - Pri	0.9 ± 0.4	253-454	0.6 ± 0.7
Patianú	Pro - Pri	6.3 ± 6.7	768-1,139	1.3 ± 1.8
Kichail	Pro - Pri	1.9 ± 1.0	674-1,754	1.3 ± 0.5
Dos Lagos	Pro - Pri	1.5 ± 0.4	278-525	1.5 ± 1.3

Los mecanismos y las tasas de transferencia de sustancias entre el agua intersticial, los sedimentos y el agua de la interfase agua-sedimento están controlados, entre otros factores, por la textura fina (de mayor reactividad) (Last, 2001). Los sedimentos analizados en este trabajo estuvieron dominados por las texturas limo-arcillosa, lo cual presupone una mayor capacidad de retención de nutrientes. Las diferencias en la textura del sedimento afectan la cantidad de materia orgánica presente. A un menor tamaño del grano, mayor acumulación de

materia orgánica, por lo tanto, las fracciones representadas por el limo y las arcillas tienen de 27 a 30 veces más contenido de CO que la fracción arenosa, condición que puede ser atribuida al incremento del área superficial de dichas partículas (Calva y Torres, 2000).

10. CONCLUSIONES

1. Las características fisicoquímicas del agua de fondo de los lagos diferenciaron a los lagos prístinos (someros y profundos) de los impactados (someros y profundos). Dos Lagos presentó mayores diferencias ya que, a diferencia de todos los demás lagos que son holomícticos (polimícticos cálidos los someros y monomícticos cálidos los profundos), es meromíctico.
2. El análisis de conglomerados con base en las características fisicoquímicas del agua de fondo mostró la conformación de tres grupos. El grupo uno fue conformado por Cinco Lagos, Ensueño, Patianú, Kichail y Esmeralda, todos ellos prístinos. El grupo dos formado por San Lorenzo, Balantetic y La encantada, impactados. Y, al final, Dos Lagos, profundo prístino. Los lagos impactados presentaron mayor turbidez y conductividad eléctrica y menor concentración de oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en comparación con los prístinos.
3. De acuerdo con el tamaño de grano los lagos someros presentaron sedimentos de limo arcilloso a limo arenoso, mientras que los lagos profundos fueron limo arcilloso en su mayoría.
4. La concentración de materia orgánica y carbonatos de los sedimentos de los lagos fue variable y no presentó patrón alguno ni por profundidad ni por grado de impacto. El contenido de C (<13.4%), N (<2.27%) y S (<1.92%) elementales de los sedimentos de los lagos fue, en general, bajo.
5. La proporción C/N mostró que la MO sedimentaria de los lagos tiene predominancia autóctona y mixta (autóctona y alóctona), sin patrón alguno

por lagos someros, profundos, prístinos e impactados. En general, bajas concentraciones de seston, carbono orgánico particulado y clorofila-a en agua se corresponden con bajas concentraciones de materia orgánica, carbono, nitrógeno y azufre elementales en los sedimentos, asociado al origen autóctono o mixto.

11. LITERATURA CITADA

- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. Sánchez, G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae*. 27: 3166-3169 pp.
- Alcocer, J., Oseguera L., Sánchez G., González C., Martínez J. y R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology*. 75: 56-65.
- Alcocer, J. 2017. Mexican meromictic lakes: What we know so far?. pp. 353-375. In: R. Gulati, A. Degermendzhy y E. Zadereev (eds.). *Ecology of Meromictic Lakes*. Springer International Publishing.
- Alcocer, J., Merino-Ibarra M., Oseguera L. y O. Escolero. 2018. Anthropogenic impactson tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. *Ecologyhydrology*. DOI: 10.1002/eco.2029.
- Arche, A. 2010. Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Madrid: Editorial CSIC - CSIC Press. 17 p.
- Arias, J. y J. Ramírez. 2009. Caracterización preliminar de los sedimentos de un embalse tropical: represa La Fe (El Retiro, Antioquia, Colombia). *Limnetica* 28: 65-78.
- Bengtsson, L. y M. Enell. 1986. Chemical analysis. In Berglund, B. E. (ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 423–451.
- Callieri, C. 1997. Sedimentation and aggregatedynamics in Lake Maggiore, a largedeeplake in NorthernItaly. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia*56: 37-50.
- Calva, L. y R. Torres. 2000. Distribución de carbohidratos, carbono y nitrógeno orgánico en sedimentos de tres lagunas costeras del Golfo de México. *Hidrobiologica* 10(2): 101-114.
- Compañía Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo I: Hidrometeorología, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Portal en internet de la Comisión Nacional del Agua, disponible en <http://www.conagua.gob.mx/>.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 194 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2011. Programa de Monitoreo de Calidad del Agua. Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. Comitán de Domínguez, Chiapas. 42 p.
- Cordero, M. 2015. Paleopalinología y geoquímica del lago Esmeralda, Chiapas, México: Una reconstrucción Paleoecológica. Tesis para obtener el grado académico de Licenciatura. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias, Escuela Centroamericana de Geología. 71 p.

- Dean, W. E. Jr. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *J. Sed. Petrol.* 44: 242–248.
- Deuser, W. 1975. Reducing environments. En: Riley, J. y G. Skirrow. *Chemical Oceanography*. Vol 3. Segunda edición. Academic Press Londres.
- Díaz, M., Elizalde, E., Quiróz, H., García, J. Y I. Molina. 2005. Caracterización de Algunos Parámetros Físico Químicos del Agua y Sedimento del Lago Zempoala, Morelos, México. *Acta Universitaria* 15: 57-65.
- Durán, J. 2013. Análisis Geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de Ingeniera Geóloga. UNAM. 88 p.
- Durán, I., Escolero O., Muñoz E., Castillo M. y G. Silva. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México. *Boletín de la sociedad geológica mexicana* 66(2): 236-277.
- FIR. 2013. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar, Parque Nacional Lagunas de Montebello. México. 1-2 pp.
- Folk, R. 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6: 73–93.
- Folk, R. 1974. The natural history of crystalline calcium carbonate; effect of magnesium content and salinity. *Journal of Sedimentary Petrology* 44: 40-53.
- Galicia V. 2012. Cambio de color en las lagunas de Montebello: Las atonalidades de una problemática tonal. Tesis para obtener el grado académico de Licenciatura. Centro de investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán. 153 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Publicaciones UNAM. México, D. F. 91 p.
- Hakanson, L. y Hansson, M. 1983. *Principles of flake sedimentology*. Springer-Verlag. En: Pérez, A., Torres, R. y A. Márquez. 1994. Los sedimentos recientes del Lago de Catemaco, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. UNAM. México, D.F. 1 pp.
- Hernández, P. 2016. Concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica de los lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. 54 p.
- Ingersoll, C.G.; Dillon T. y G. Biddinger. 1997. Ecological risk assessment of contaminated sediments. *Proceedings of the Pellston workshop on Sediment Ecological Risk Assessment*, SETAC Special publications series.
- Krumbein, W. y L. Sloss. 1969. *Estratigrafía y Sedimentación*. Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana, México. 778 p.
- Lara, J., Arreola, J., Calderón, L., Camacho, V., De la Lanza, G., Escofet, A., Espejel, M., Guzmán, M., Ladah, L., López, M., Alf, M., Moreno, P., Reyes, H., Ríos, E. y J. Zertuche. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en *Capital natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, 1: 109-134.
- Lenz, J. 1977. Seston and its main components. In: Rheinhermer G Ed., *Microbial ecology of brackish water environmental*. Ecological studies 25, Springer, Verlag.

- Lewis, W. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40: 1779–1787.
- Lewis W. M. Jr. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. En: *Perspectives in Tropical Limnology* (Eds. F. Shiemer y K.T. Boland), pp. 43–64. Academic Publishing, Amsterdam.
- Lindström, M. y L. Håkanson. 2001. A Model to calculate heavy metal load to lakes dominated by urban runoff and diffuse in flow. *Ecological Modelling*. En: Westermeyer, A. 2005. Composición, distribución y origen de las facies sedimentarias del lago Pullinque X Región. Tesis para obtener el grado académico de Licenciatura. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias. Valdivia, Chile. 38 p.
- Longhurst, A. y J. Pauly. 1987. *Ecology of tropical oceans*. Academic Press. San Diego, California. 407 pp.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona, España. 1010 p.
- Martínez, M. 2015. Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al sistema lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis para obtener el grado académico de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. México, D.F. 93 p.
- Maya, E. 2017. Estimación del estado trófico de 18 lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México. Tesis para obtener el grado académico de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias. Ciudad Universitaria, CDMX. 36 p.
- Melo, C. y J. Cervantes. 1986. Propuestas para el programa integral de manejo y desarrollo del Parque Nacional Lagunas de Montebello. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México* 16: 9-32.
- Meyers, P. y R. Ishiwatari. 1993. Lacustrine organic geochemistry an overview of indicators of organic matters ourcesan diagenesis in lake sediments. En: Pisanty, I. y M. Caso. 2006. *Especies, espacios y riesgos: monitoreo para la conservación de la biodiversidad*. Instituto Nacional de Ecología. 239 p.
- Mora, L., Bonifaz, R. y R. López. 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 377-394 pp.
- Mora, L., García, L. A., Ramos, Y. R., Bonifaz, R. y O. Escolero. 2017. Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, Mexico. *Procedia Earth and Planetary Science* 17: 829–832.
- Oseguera, L. y J. Alcocer. 2015. Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México. 678 p.*

- Pacheco, A. J., Marin, L. E., Cabrera, S. A., Steinich, B. y O. Escolero. 2001. Nitrate temporal and spatial pattern in twelve water supply wells, Yucatan, Mexico. *Environmental Geology* 40: 708–715.
- Pérez, A., Torres, R., y A. Márquez. 1994. Los sedimentos recientes del Lago de Catemaco, Veracruz, México. Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México, D.F. 11 p.
- Pérez, A., Torres, R., Morales, E., y E. Pérez. 2000. Textura, composición y contenido de materia orgánica de los sedimentos recientes de un lago tropical de México. *Hidrobiológica* 10 (1): 41-50.
- Pérez, H., Pérez, G. y M. Pérez. 2007. Caracterización y diagnóstico del río Grande de Comitán, estado de Chiapas en la región Frontera Sur, Comité de Cuenca Río Grande Lagunas de Montebello, México.
- Pérez, L., Alfaro, G., Palmieri, G., Dix, M., Maldonado, M., Islebe G., Scharf B. y A. Schwalb. 2008. Paleoclima y paleoecología de las tierras bajas del norte de los neotrópicos: investigación limnológica y extracción de sedimentos del lago Petén Itzá, (Guatemala). *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 18: 65-83.
- Pineda, V. 2009. Granulometría y geoquímica de los sedimentos marinos en el área comprendida entre el Seno Reloncaví y Golfo Corcovado, Chile. *Crucero Cimar 10 Fjordos. Ciencia y Tecnología del mar* 32: 27-47.
- Pisanty, I. y M. Caso. 2006. Especies, espacios y riesgos: monitoreo para la conservación de la biodiversidad. Instituto Nacional de Ecología. 239 p.
- Punning, J.A., Jaanus, T., Koff T. y T. Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution* 149:77-92.
- Ramírez, J. y J. Noreña. 2004. Caracterización del sedimento de una Laguna Tropical Rasa. *Caldasa* 26: 173-184.
- Ramírez, P. 1988. Contribuciones al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del estado de Puebla. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. Consultado 11 de octubre de 2017 desde: <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1989-1/articulo323.html>
- Roldan, G. y J. Ramírez. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia 49-56 pp.
- Romero, F. y N. Mejía. 2007. Batimetría del Lago Yojoa. *Revista Técnico-Científica Tatascan*. 19:2. Consultado 11 de octubre de 2017 desde: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/Batimetr%C3%ADa%20del%20Lago%20de%20Yojoa.pdf
- SAGARPA-FIRCO. 2007a. Plan Rector de Producción y Conservación, Microcuenca Unión Juárez, La Trinitaria Chiapas.
- SAGARPA-FIRCO. 2007b. Plan Rector de Producción y Conservación, Microcuenca El Progreso La Trinitaria, Chiapas.
- SAGARPA-FIRCO. 2007c. Plan Rector de Producción y Conservación. Microcuenca El Triunfo, La Independencia Chiapas.
- SAGARPA-FIRCO. 2007d. Plan Rector de Producción y Conservación. Microcuenca El Triunfo, La Independencia Chiapas.

- Salas, H. y P. Martino. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Organización Panamericana de la Salud (OPS) - División de Salud y Ambiente Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Shepard, F. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Research* 24 (3): 151–158
- Silva, N. 2006. Características físicas y químicas de los sedimentos superficiales y fiordos australes. En: Avances en el contenido oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso. 69-194 pp.
- Salomons, W.; de Rooij N. M.; Kerdijk H. y J. Bril. 1987. Sediments as a source of contaminants. *Hydrobiology* 149: 13-30.
- Ungemach, H. 1960. Sediment chemismus und seine Beziehungen zum Stoffhaushalt in 40 Europäischen Seen. Universität Kiel, Kiel. Pags. 129-138 en: Esteves, F. 1983. Levels of phosphate, calcium, magnesium and organic matter in the sediments of some brazilian reservoirs and implications for the metabolism of the ecosystems. *Archiv für Hydrobiologie* 96.
- Vargas, M. 2017. Caracterización del seston en lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México. Tesis para obtener el grado académico de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias. Ciudad Universitaria, CDMX. 67 p.
- Vásquez, M. y E. Méndez. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. En: CONANP. 2007. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 194 p.
- Westermeyer, A. 2005. Composición, distribución y origen de las facies sedimentarias del lago Pullinque X Región. Tesis para obtener el grado académico de Licenciatura. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias. Valdivia, Chile. 4 p.
- Wetzel, G. R. 1981. Limnología. En: Vacio, K. 2006. Análisis de la producción primaria en la laguna de Tres Palos, para fines de restauración. Tesis para obtener el grado académico de maestría. División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. UNAM. Campus Morelos. 85p.
- Wetzel, R. 1981. Limnología. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Witt, C., Rangin C., Andreani L., Olalez N. y J. Martínez. 2011. The transpressive left lateral Sierra Madre de Chiapas and its buried front in the Tabasco plain (southern Mexico): *Journal of the Geological Society* 169: 143-155.