



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Estimación del estado trófico de 18 lagos del  
Parque Nacional “Lagunas de Montebello”,  
Chiapas, México**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Licenciada en Ciencias de la Tierra**

**P R E S E N T A :**

**Eloísa Estefanía Maya García**



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

**Junio 2017**

**Ciudad universitaria, CDMX**



## **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 está 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.

# Índice

Agradecimientos.....	3
Dedicatorias.....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	5
Introducción.....	6
Antecedentes.....	7
Justificación.....	8
Hipótesis.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos particulares.....	8
Área de estudio.....	9
Materiales y métodos.....	11
Trabajo de campo.....	12
Trabajo de laboratorio.....	14
Trabajo de gabinete.....	14
Resultados.....	15
Discusión.....	28
Conclusiones.....	31
Referencias.....	32

## 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 Protegidas y Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tziscaco por facilitar el acceso a los lagos.*

*Al Comité de Administración de Tziscaco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tziscaco (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tziscaco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tziscaco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.*

*A mi segunda casa la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de forjarme bajo su renombre y prestigio.*

*A la Facultad de Ciencias por desplegar en mi mente un pensamiento perspicaz, crítico, sensible y reflexivo.*

*Al Dr. Javier Alcocer Durand por su valiosa dirección y guía. Por motivarme a exigir más de lo que creo que soy capaz y alentarme a la completa entrega en la realización de este trabajo.*

*A la Dra. Vilma S. Ardiles Gloria que gracias a su docencia despertó mi el interés en la Limnología, así como su paciencia y dedicación durante las continuas revisiones de esta tesis.*

*Al Dr. Luis Oseguera por su apoyo, asesoría y siempre amable disponibilidad en laboratorio y campo.*

*A mis sinodales Dr. Martín Merino, Dra. María del Rosario Sánchez, Dr. Omar Arellano y Dr. Alfonso Lugo por su apoyo e interés en este trabajo.*

## Dedicatorias

*A mi madre Verónica, Gracias por atreverte a llevar la responsabilidad de ser madre siendo aún muy joven. Por recordarme lo necesario que es romper esquemas y enseñarme que mis metas son más grandes que mis miedos.*

*A mi padre Julio. Gracias por contagiarme tu espíritu aventurero, por tu entera dedicación a la familia y el gran amor ilimitado que nos demuestras día a día a tus hijos.*

*A mi hermano Erick. Como tú hermana mayor, eres el motivo que me obliga a ser un buen ejemplo.*

*A las mujeres que han sido inspiración y soporte a lo largo de mi vida. Gaby e Hildeliza gracias por su incondicional apoyo y recordarme que tengo más de una madre. Mis abuelas Irene y Victoria, a pesar de las dificultades tener que salir adelante siendo el soporte de la familia, son ejemplo de mujeres trabajadoras e independientes, las admiro mucho por su esfuerzo y determinación. Frida y Minerva, mis primas latosas, siempre que me necesiten ahí estaré para ustedes.*

*A mis Tíos. Mis abuelos de crianza Héctor y Leonardo (Q.E.P.D), gracias por su cariño y cuidado. Toño, gracias por compartir esa chispa y carisma que tanto te caracterizan.*

*A mi novio. Alan, estuviste conmigo todas las etapas en la realización del trabajo. Me viviste emocionada, frustrada, alegre, desvelada, optimista, enajenada, enojada... y siempre me alentaste a dar lo mejor de mí. Gracias por tu apoyo y confianza, te amo.*

*A mis hermanos de la vida. Ariz, la hermana que siempre quise y que siempre tuve, Pao, Mike, Lalo, Jomby, Cris, David, Aura, Iñaki y Mariana por tantos buenos momentos que hemos compartido.*

*A mis compañeras de desvelos, terapeutas y mejores amigas: Lu y Chiquis.*

*Finalmente este trabajo va dedicado también a todos mis profesores que han demostrado amor y pasión por su trabajo, cada uno me ha dejado una especial enseñanza, entre ellos; Jorge Limón, Isabel Mejía, José M. Panting, Martín Merino, así como otros que aún faltan por mencionar. Gracias a todos ustedes.*

## Resumen

El parque nacional "Lagunas de Montebello" (PNLM) es un sistema de lagos localizado al sureste de Chiapas. Desde el año 2003 algunos de estos lagos han presentado un cambio en la coloración de sus aguas. El aumento en el uso de agroquímicos en el área circundante podría estar relacionado con su contaminación, llevando estos cuerpos de agua a un estado de enriquecimiento de nutrientes conocido como eutrofización. El propósito de este trabajo fue estimar el estado trófico de dieciocho lagos del PNLM en el periodo de mayo a agosto del 2013. Para esto se describió la concentración y distribución de la clorofila "a" (Clor-a) en la columna de agua así como su relación con variables ambientales (temperatura, oxígeno disuelto, profundidad de capa de mezcla  $Z_{MIX}$  y zona eufótica  $Z_{EU}$ ). Se identificaron 4 grupos de lagos de acuerdo a su estado trófico y profundidad. Liquidámbar, San Lorenzo y Balantetic fueron clasificados como someros impactados; Bosque Azul y La encantada como profundos impactados. Chaj Chaj San José, Esmeralda, Agua Tinta, Kichail, Patianú, Yalalush y Montebello como someros prístinos y finalmente Ensueño, Cinco Lagos, Pojoj, Tziscoa y Dos Lagos como profundos prístinos. Los parámetros medidos difirieron en los lagos impactados; Clor-a ( $15.6 \pm 8$ ),  $Z_{MIX}$  ( $6.9 \pm 3.1$  m),  $Z_{EU}$  (de  $3.25 \pm 0.5$  m), con respecto a los prístinos; Clor-a ( $1.2 \pm 1.8$ ),  $Z_{MIX}$  ( $16.5 \pm 4.1$  m) y  $Z_{EU}$  ( $31.5 \pm 22.4$  m). Los lagos impactados con estratificación mostraron perfiles de Clor-a clinógrafos y los prístinos ortógrafos. Por otra parte todos los lagos estratificados presentaron perfiles clinógrafos de oxígeno y temperatura. Por lo tanto se evidenció que el cambio en la coloración de los lagos está relacionado al incremento de su estado trófico, pues éste refleja un aumento en la concentración de Clor-a.

## Abstract

"Lagunas de Montebello" National Park (PNLM) is a lake district at the southeast of Chiapas state. Since 2003 some of these lakes have presented a change in their water color. The increased use of agrochemicals in the surrounding area could be related to their water pollution, with nutrient enrichment leading to eutrophication. The aim of this study was to estimate the trophic status of eighteen PNLM lakes in the period from May to August of 2013. For this, the concentration and distribution of chlorophyll "a" (Clor-a) in the water column and its relationship with environmental variables (temperature, dissolved oxygen,  $Z_{MIX}$  mixture layer depth and euphotic zone  $Z_{EU}$ ) were described. Four lake groups were identified according to their trophic state and depth. Liquidámbar, San Lorenzo and Balantetic were classified as shallow impacted lakes, Bosque Azul and La Encantada as deep impacted, Chaj Chaj, San Jose, Esmeralda, Agua Tina, Kichail, Patianú, Yalalush and Montebello as shallow pristine and finally, Ensueño, Cinco Lagos, Pojoj, Tziscoa and Dos Lagos as deep pristine. The measured parameters differed in the impacted lakes; Clor-a ( $15.6 \pm 8$ ),  $Z_{MIX}$  ( $6.9 \pm 3.1$  m),  $Z_{EU}$  (de  $3.25 \pm 0.5$  m), with respect to the pristine; Clor-a ( $1.2 \pm 1.8$ ),  $Z_{MIX}$  ( $16.5 \pm 4.1$  m) y  $Z_{EU}$  ( $31.5 \pm 22.4$  m). The impacted lakes with stratification showed Clor-a clinographic profiles and orthologous for pristines. On the other hand, all stratified lakes presented clinographic profiles of oxygen and temperature. Therefore it was evidenced that the change in the coloration of the lakes is related to the increase of its trophic state, as this reflects an increase in the concentration of Clor-a.

## Introducción

Los cuerpos acuáticos epicontinentales de México son de gran importancia para la vida silvestre, la biodiversidad y el ecoturismo nacional. Asimismo, son esenciales para las diversas actividades humanas, incluidas la agricultura, el desarrollo industrial, urbano y las economías locales. Sin embargo, enormes cantidades de desechos domésticos e industriales se han descargado a lo largo de los años en ríos y lagos generando un deterioro sin precedente de la calidad del agua. La contaminación acuática es una de las problemáticas que debe enfrentar cualquier programa para el manejo de los recursos acuáticos superficiales. Las estadísticas gubernamentales muestran que la mayor parte de las aguas superficiales en el país se encuentran en categoría de “contaminadas” a “excesivamente contaminadas”, y solo algunos lugares no presentan contaminación o ésta es muy leve (Alcocer, 2007).

La Limnología, el estudio científico de las aguas epicontinentales, puede ser considerada como una rama de la ecología ya que cubre aspectos biológicos, químicos, físicos, geológicos y otros atributos, así como de sus interacciones, en las aguas epicontinentales. Ésta incluye el estudio de lagos y estanques, ríos, manantiales, arroyos y humedales (Wetzel, 2001).

Los ecosistemas acuáticos epicontinentales pueden ser clasificados con base en su estado trófico, esto es, el grado de productividad del ecosistema. Al respecto, los lagos oligotróficos tienen un bajo contenido de nutrientes y son poco productivos. Por el contrario, los lagos eutróficos se caracterizan por presentar altas concentraciones de nutrientes y proliferaciones masivas de fitoplancton tales como cianobacterias. Las clasificaciones del estado trófico de los lagos se basan generalmente en la claridad del agua y la concentración de la biomasa fitoplanctónica y nutrientes, ya que existe un vínculo entre estas cualidades y la calidad del agua (Dodds, 2002).

Una de las variables utilizadas para evaluar el estado trófico de los ecosistemas acuáticos es la concentración de la clorofila “a” (Clor-a). Este pigmento es común a todos los organismos que realizan fotosíntesis. La concentración de Clor-a se usa como indicadora de la cantidad de biomasa del fitoplancton (Aubriot y Bonilla, 2013). El fitoplancton es el grupo de microorganismos fotosintéticos que viven una parte o todo su ciclo de vida suspendidos en la columna de agua y es el principal productor de carbono orgánico en la zona pelágica de los cuerpos acuáticos (Reynolds, 2006).

La actividad humana ha aportado grandes cantidades de nutrientes en los ecosistemas acuáticos, lo que ha ocasionado un incremento desmesurado de la población vegetal y una gran aceleración de los procesos naturales de eutrofización (Orozco *et al.*, 2011). Las principales manifestaciones de dicho fenómeno son, adicionalmente al incremento en la biomasa autotrófica, la coloración verde-grisácea del agua, la producción de malos olores y la disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto en el fondo debido al incremento

de la materia orgánica en descomposición. Esto repercute en un aumento en la turbiedad de las aguas, disminuyendo la calidad del agua del cuerpo acuático e impidiendo su uso recreativo, turístico y/o doméstico (Moreta, 2008).

La eutrofización antropogénica se ha expandido en todo el territorio nacional. Tal parece ser el caso de algunos lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM), Chiapas, en los cuales desde el año 2003 se detectó un cambio en la coloración de sus aguas. Esto pudiera estar relacionado con la ampliación de las zonas de cultivo en la periferia de la reserva, lo que conllevaría un aumento en el uso de agroquímicos que podrían estar relacionados con la contaminación del agua en los distintos cuerpos del sistema lacustre (Durán *et al.*, 2014). Por otro lado, se ha identificado una erosión hídrica potencial severa en la subcuenca del Río Grande y 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 serían la lixiviación e infiltración de residuos sólidos municipales y la descarga de aguas residuales no tratadas (CFE, 2012a). Además, el aumento en la demanda turística ha provocado el establecimiento de un número elevado de comercios ambulantes y fijos que ofrecen alimentos y diversos productos que aumentan el potencial de contaminación del PNLM (González del Castillo, 2003).

## **Antecedentes**

Diferentes dependencias gubernamentales (CONANP, 2009, 2011; CFE 2012a, 2012b) han llevado a cabo investigaciones tendientes a descifrar el origen del cambio en la coloración del agua de los lagos, con resultados inconclusos. Sin embargo, la CONANP (2009) señala que el sistema hidrológico del PNLM se ve afectado por las descargas de sustancias químicas orgánicas, sedimentos, materias suspendidas y plásticos provenientes del río Grande de Comitán. La CFE (2012b) reporta la presencia de sulfuros asociados a la descomposición de materia orgánica que se consideran nocivos para la fauna acuática. Galicia (2012) encontró, a través del cálculo del Índice del Estado Trófico (TSI por sus siglas en inglés; Carlson, 1977), valores indicativos de eutrofización a lo largo del “Sistema Tepancoapan” al NW del PNLM, mientras que en el “Sistema Candelaria” al SE del PNLM observó una condición “saludable”. Recientemente, Villalpando (2015) evaluó mediante el uso de percepción remota el estado trófico de los lagos de la zona NW, a la entrada del PNLM, concluyendo que estaban eutrofizados (meso a eutróficos).

## **Justificación**

Pese a la relevancia de esta área natural protegida, son pocos los estudios limnológicos -ninguno que abarque todo el sistema- que se han realizado frente a la problemática de lo

que parece ser una creciente contaminación que afecta al sistema lacustre. Es necesario establecer la línea base o de referencia de las diferentes características limnológicas de los lagos con el fin de poder reconocer los cambios que se han o vayan suscitando, así como la velocidad a la que éstos están aconteciendo. Es por lo anterior que el presente estudio tuvo como objetivo describir la concentración y distribución en la columna de agua de la Clor-a, usada como indicadora de la biomasa fitoplanctónica presente y del estado trófico, en un grupo selecto de 18 lagos a lo largo del PNLM. La comparación de la concentración y distribución de Clor-a en la columna de agua de los 18 lagos se usó para conocer no solo el estado trófico de éstos, sino las características de los lagos tanto impactados como prístinos, lo cual permitirá reconocer signos tempranos de impacto.

## **Hipótesis**

El cambio de la coloración y otras características del agua en algunos de los cuerpos acuáticos que conforman al sistema lacustre del PNLM se debe al incremento de su estado trófico, el cual podrá ser evidenciado a través del aumento en la concentración de Clor-a, así como diferencias en su distribución vertical.

## **Objetivo general**

Describir la concentración y distribución en la columna de agua de la Clor-a empleada como *proxi* de la biomasa fitoplanctónica presente en dieciocho lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, así como la estimación de su estado trófico con base en ésta.

## **Objetivos particulares**

- Determinar los perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y radiación fotosintéticamente activa (PAR) en 18 lagos del PNLM.
- Determinar la concentración de la Clor-a fitoplanctónica en 18 lagos del PNLM.
- Identificar patrones en la distribución en la columna de agua de la Clor-a fitoplanctónica en 18 lagos del PNLM.
- Determinar el estado trófico de 18 lagos del PNLM en función de la concentración de la Clor-a fitoplanctónica.
- Relacionar la concentración de la Clor-a fitoplanctónica con las variables ambientales medidas en cada lago.
- Comparar la concentración y distribución de la Clor-a fitoplanctónica en los lagos impactados y prístinos, tanto profundos como someros.

## Área de estudio

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) fue constituido por Decreto Presidencial en 1959. Representa uno de los escenarios naturales más bellos a nivel nacional, localizándose en una Región Hidrológica Prioritaria de alta riqueza biológica. La belleza escénica del parque se enmarca en un paisaje de lomeríos con una multitud de cuerpos acuáticos de diversos tamaños y tonalidades (CONANP-SEMARNAT, 2007). El sistema hidrológico del PNLM consta de un complejo lacustre de origen kárstico de morfologías variadas; las aguas que alimentan este sistema son principalmente subterráneas (Durán *et al.*, 2014).

El PNLM está en la región sur-sureste del estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala. Comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria, localizándose entre los 16° 05' y 16° 10' N y 91° 38' y 91° 47' O (Fig. 1). Cubre un área total aproximada de 60 km<sup>2</sup>. Su altitud varía entre 1,200 y 1,800 m s.n.m. Durante la temporada de secas del 2005, la superficie lacustre se estimó en 1,219ha, es decir un 16% de la superficie total del parque (CONANP-SEMARNAT, 2007).

El clima predominante en la zona de estudio es templado húmedo a subhúmedo con lluvias todo el año (García, 1988), con temperatura media anual de 22°C, lluvias en verano y precipitación media anual de 1,030 mm. 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 la región de los altos de Chiapas y la Selva Lacandona, teniendo especies de bosque templado y de selva tropical (González del Castillo, 2003).

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 CO<sub>2</sub> 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 de agua subterránea y procedente de las lluvias (Vásquez 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-SEMARNAT, 2007).

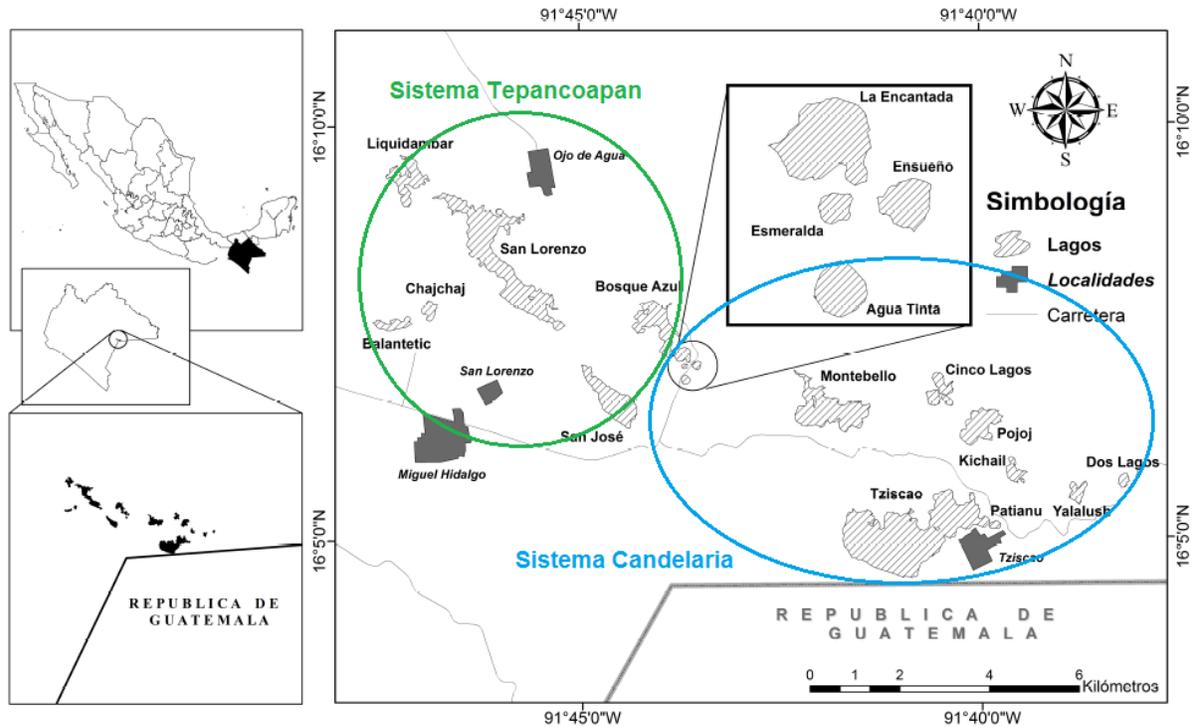
El registro estratigráfico que aflora en el parque está constituido por paquetes de calizas y dolomitas del Cretácico, mientras que los depósitos de plataforma somera, turbiditas y de

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 sistema hidrológico de Montebello está catalogado dentro de la Región Hidrológica Nacional No. 30 (CONAGUA, 2014). El complejo lacustre se divide en sistemas de lagos, los principales son Tepancoapan y Candelaria (Fig. 1). 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. Este sistema se alimenta, además del aporte de aguas subterráneas, de las descargas del Río Grande de Comitán en el lago Chinkultick hasta llegar a la Encantada. 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 Tzisco hasta Esmeralda y se compone principalmente de los lagos Tzisco, Pojoj, Montebello y Cinco Lagos. Las conexiones de este sistema son menos claras ya que son subterráneas (Galicia, 2012).

El Río Grande constituye el río principal de la subcuenca que abarca el PNLN; las aguas residuales de la ciudad de Comitán de Domínguez desembocan a éste y conforma una seria amenaza de contaminación al sistema hidrológico de Montebello. No obstante, existe inconsistencia en la información sobre el sitio en que el Río Grande vierte el contenido de sus aguas; se ha descrito que este río no tiene desagüe directo (CONANP-SEMARNAT, 2007) o bien que sí lo tiene y es con el sistema de lagos Tepancoapan (Vásquez y Méndez, 1994).



**Fig. 1.** Mapa de localización de los lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (Editado de Alcocer *et al.*, 2016).

## Materiales y métodos

Se seleccionaron para el muestreo los 18 lagos principales (Fig. 1) y cuya ubicación se muestra en la Tabla 1. Se hizo la separación entre lagos someros y profundos según los resultados de Alcocer *et al.* (2016). También se hizo una distinción *a priori* entre lagos impactados y prístinos de acuerdo a su ubicación. Siendo los lagos impactados aquellos pertenecientes al Sistema Tepancoapan y prístinos aquellos ubicados en el Sistema Candelaria.

### a) Trabajo de campo

Los muestreos se realizaron en el periodo comprendido de mayo a agosto (época de lluvias) del 2013. Cada lago se muestreó en la zona más profunda del mismo.

Se midieron perfiles de temperatura ( $T^{\circ}$ ) y oxígeno disuelto (OD) con una resolución vertical de un metro, utilizando una sonda multiparamétrica marca Hydrolab, modelo Datasonde 4 (DS4) unida a una caja controladora modelo Surveyor 4 (SVR4) (Fig. 2).

**Tabla 1.** Ubicación geográfica y características de los lagos incluidos en el presente estudio. (Z = profundidad máxima; Zmed = profundidad media; Som/Pro = somero/profundo; Pri/Imp = prístino/impactado). (Tomado de Alcocer *et al.*, 2016., Vera *et al.* 2015).

Lago	Latitud		Longitud		Área (ha)	Zmax (m)	Zmed (m)	Som/Pro	Pri/Imp
	°N		°O						
Agua tinta	16°6'	16°6'	91°43'	91°43'	3	24	14.7	Som	Pri
Balantetic	16°7'	16°7'	91°47'	91°47'	13.6	3	1.7	Som	Imp
Bosque Azul	16°7'	16°7'	91°43'	91°44'	52.2	58	20	Pro	Imp
Chaj Chaj	16°7'	16°7'	91°46'	91°46'	9.2	12	5.3	Som	Imp
Cinco Lagos	16°6'	16°6'	91°40'	91°40'6"	23.7	162	42.5	Pro	Pri
Dos Lagos	16°5'	16°5'	91°38'	91°38'	5.2	42	25.5	Pro	Pri
Ensueño	16°7'	16°7'	91°43'	91°43'	2.7	35	21.6	Pro	Pri
Esmeralda	16°7'	16°7'	91°43'	91°43'	1.1	7	3.6	Som	Pri
Kichail	16°5'	16°5'	91°39'	91°39'	12.5	22	9.5	Som	Pri
La Encantada	16°7'	16°7'	91°43'	91°43'	8.2	89	29.4	Pro	Imp
Liquidambar	16°9'	16°9'	91°46'	91°47'	40.5	24	11.2	Som	Imp
Montebello	16°6'	16°7'	91°41'	91°42'	96.2	45	12.3	Som	Pri
Patianú	16°5'	16°5'	91°39'	91°39'	3.4	26	10.8	Som	Pri
Pojoj	16°6'	16°6'	91°39'	91°40'	43.7	198	35.2	Pro	Pri
San José	16°6'	16°7'	91°44'	91°44'	60.6	30	10.3	Som	Imp
San Lorenzo	16°7'	16°9'	91°45'	91°46'	181.3	67	11.8	Som	Imp
Tziscoa	16°4'	16°5'	91°39'	91°41'	306.6	86	28.9	Pro	Pri
Yalalush	16°5'	16°5'	91°38'	91°38'	11.5	23	9.9	Som	Pri

Para la medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR = 40-700 nm) se utilizó un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical Instruments, modelo PNF-300 (Fig. 2). Se obtuvieron 4 perfiles, 2 de bajada y dos de subida.

Para evaluar la concentración de la Clor-a en la columna de agua se tomaron muestras por triplicado a diferentes profundidades en un número dependiendo de la profundidad máxima del lago (de 1 a 5 por lago) mediante una botella hidrográfica tipo Niskin marca UWITEC de 5 L de capacidad (Fig. 2). Se filtraron en el laboratorio de campo entre 50 y 70 mL de cada una de las muestras con una bomba de vacío marca Millipore a una presión aproximada de 0.3 atm, a través de filtros GF/F marca Whatman (Fig. 3) con apertura de poro nominal de 0.7  $\mu\text{m}$ . Los filtros se etiquetaron y transportaron al laboratorio de la FESI (Facultad de Estudios Superiores Iztacala) en frascos oscuros y en refrigeración para su análisis posterior.



**Fig. 2.** A la izquierda, sonda multiparámetro Hydrolab DS4 sumergida en agua (Fotografía de Rigel González). En medio, perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300. A la derecha, botella hidrográfica marca UWITEC de 5 L sumergida en agua (Fotografía de Rigel González).



**Fig. 3.** A la izquierda, bomba de vacío marca Millipore. A la derecha, filtros GF/F marca Whatman.

## **b) Trabajo de laboratorio**

Para la extracción de Clor-a se trituró cada filtro GF/F con ayuda de un macerador de tejidos y adicionando 10 mL de acetona al 90%. El período de extracción correspondió a 20 horas aproximadamente, permaneciendo las muestras en oscuridad y refrigeración. El extracto se centrifugó a 3,000 rpm durante 15 minutos y se realizaron las lecturas de fluorescencia en un fluorómetro marca Turner Designs modelo 10-AU previamente calibrado. El fluorómetro fue calibrado para proporcionar una resolución alta en sacrificio de un menor intervalo de detección (se calibró en el intervalo más bajo de concentración,

útil para aguas oligotróficas). La calibración se realizó con un estándar primario de Clor-a líquido de Turner Designs, con concentración de  $15.5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Clor-a libre de Clor-b, en una solución al 90 % de acetona. En las ocasiones en que las muestras fueron diluidas con acetona para poder ser leídas dentro del rango de detección, se tomó en consideración el factor de dilución respectivo (Arar y Collins, 1997).

### c) Trabajo de gabinete

Se calculó la zona eufótica ( $Z_{EU}$ ), zona limitada por la profundidad desde la superficie y hasta donde llega el 0.1% de la radiación fotosintéticamente activa en superficie (SPAR). Cabe mencionar que comúnmente es usado como límite de  $Z_{EU}$  hasta el 1% del SPAR, sin embargo existen diversos estudios en sistemas oligotróficos dónde se ha visto que existe actividad fotosintética debajo de éste, por lo tanto para sistemas ultra-oligotróficos prefieren establecer la  $Z_{EU}$  hasta el 0.1% del SPAR (Pinel *et al.* 2008, Palmer *et al.* 2013). Los perfiles de temperatura se utilizaron para determinar la capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ), así como para identificar la presencia de la termoclina, definida cuando el cambio de temperatura por metro de profundidad fuese mayor o igual a  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Para las zonas tropical y ecuatorial, a causa de los pronunciados cambios de densidad ocasionados por altas temperaturas la termoclina es definida por algunos autores como aquella zona donde el gradiente térmico oscila entre  $0.2$  y  $0.5^{\circ}\text{C}$  (Roldan y Ramírez, 2008). Una vez ubicada la termoclina fue posible reconocer las tres capas del lago (epi, meta e hipolimnion) presentes cuando el lago se encuentra estratificado. Los perfiles de oxígeno disuelto se utilizaron para ratificar la estratificación térmica y definir la oxiclina así como la zona anóxica en los lagos.

Las lecturas del fluorómetro se convirtieron a  $\mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  utilizando el algoritmo de la ecuación 1, indicada en el método 445.0 de la United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory (Arar y Collins, 1997). Este método fue específicamente diseñado para utilizar la misma marca y modelo de fluorómetro empleado en la presente investigación (i.e., Turner Designs 10-AU).

$$C_{s,u} = \frac{(C_{e,u}) (VE) (FD)}{V_m} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

- $C_{s,u}$  = concentración de Clor-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en toda la muestra de agua
- $C_{e,u}$  = concentración de Clor-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) no corregida
- VE = volumen (L) de la extracción antes de ser diluida
- FD = factor de dilución
- $V_m$  = volumen (L) de toda la muestra de agua

Los perfiles de Clor-a se utilizaron para determinar la distribución de la Clor-a y obtener los valores promedio para cada lago y así determinar su estado trófico. El máximo profundo de clorofila (DCM por sus siglas en inglés) se usa identificar altas concentraciones de clorofila en zonas “profundas” de la columna de agua. Estrictamente, el DCM puede hacer referencia a la concentración máxima de Clor-a encontrada a cierta profundidad, lejos de la superficie (Camacho, 2006). Signoret *et al.* (1998) sugieren que para establecer el DCM se deben considerar aquellos segmentos de los perfiles que igualen o superen el valor de la media más una desviación estándar.

Se obtuvieron los valores de Clor-a integrada por unidad de área ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ), por medio de los valores de Clor-a de las profundidades muestreadas dentro de la zona eufótica para cada lago.

Para los fines de este trabajo se hace uso de la clasificación de estado trófico de un lago de acuerdo a su concentración de Clor-a propuesta por el Programa Cooperación sobre la Eutrofización creado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982), la cual se describe en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores límites de la OCDE (1982) para la clasificación trófica de un lago de acuerdo con su concentración de Clor-a.

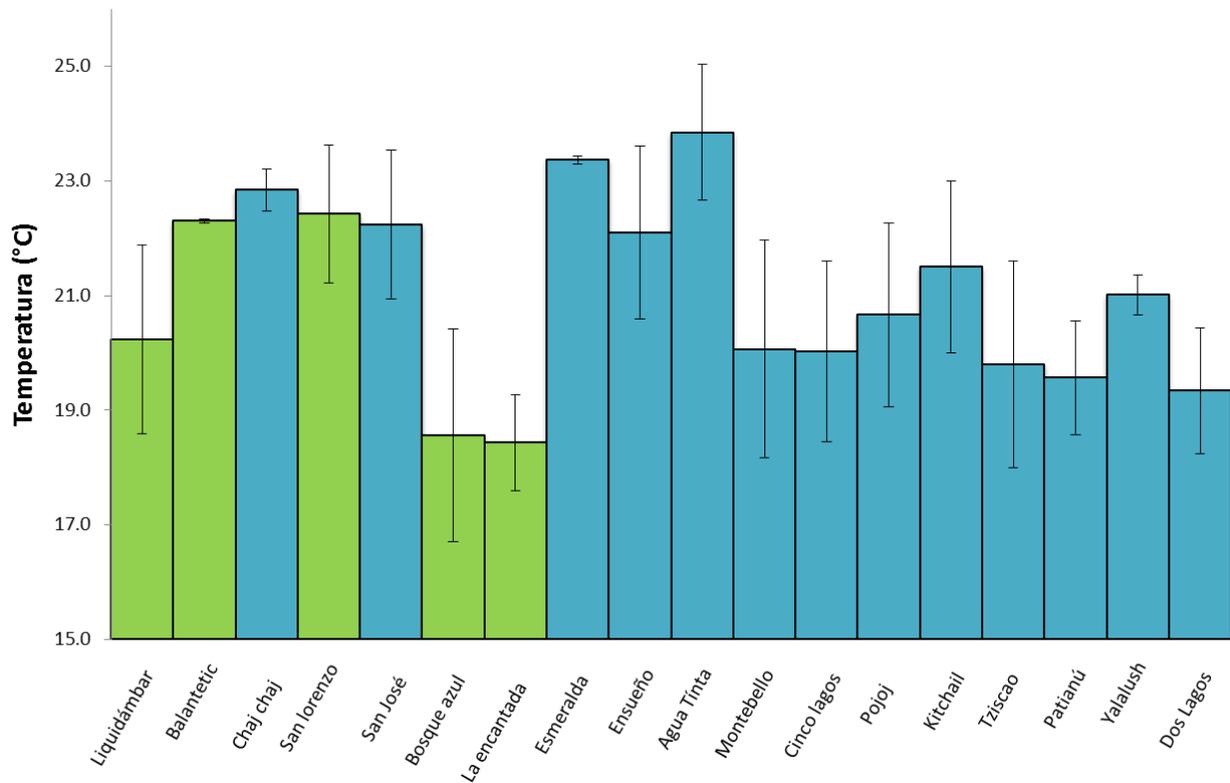
<b>Estado Trófico</b>	<b>Clor-a (<math>\mu\text{g}/\text{L}</math>)</b>
<b>Ultra-oligotrófico</b>	<2.5
<b>Oligotrófico</b>	2.5-8.0
<b>Mesotrófico</b>	8-25
<b>Eutrófico</b>	25-75
<b>Hiper-eutrófico</b>	>75

Para determinar diferencias significativas entre la concentración de Clor-a de los lagos muestreados, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) y una prueba Post *hoc* HSD de Tukey para comparar las concentraciones de Clor-a de los 18 lagos muestreados, utilizando el programa SPSS Statistics, IBM®, versión 21.

## **Resultados**

Con base en los perfiles de temperatura y de oxígeno disuelto, se encontró que los lagos estaban estratificados con excepción de cuatro de ellos (i.e., Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush), todos ellos someros, que se encontraron circulando.

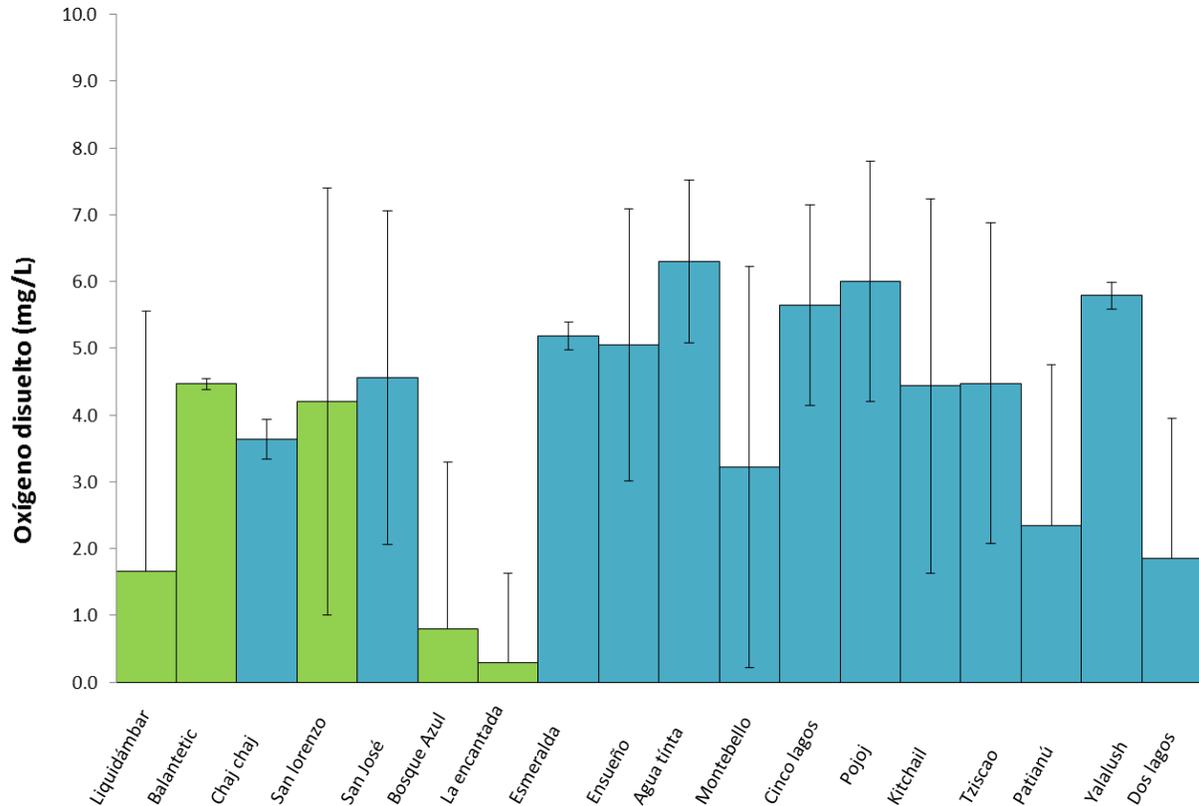
El intervalo de temperatura registrado en los lagos fue de  $17.4^{\circ}\text{C}$  (en el fondo de Bosque Azul) a  $26.3^{\circ}\text{C}$  (en la superficie de San Lorenzo). La temperatura promedio medida en los lagos fue de  $21 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$  (Fig.4).



**Fig. 4.** Temperatura promedio de los lagos de Montebello muestreados, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. Las barras de error indican la desviación estándar (Verde=Lagos Impactados, Azul=Lagos prístinos).

La concentración de oxígeno disuelto varió de 12.6 mg/L en el epilimnion de Liquidámbar a 0.0 mg/L (i.e., por debajo del límite de detección) en el hipolimnion de los lagos estratificados. El promedio de todos los lagos muestreados fue  $3.9 \pm 1.8$  mg/L (Fig. 5).

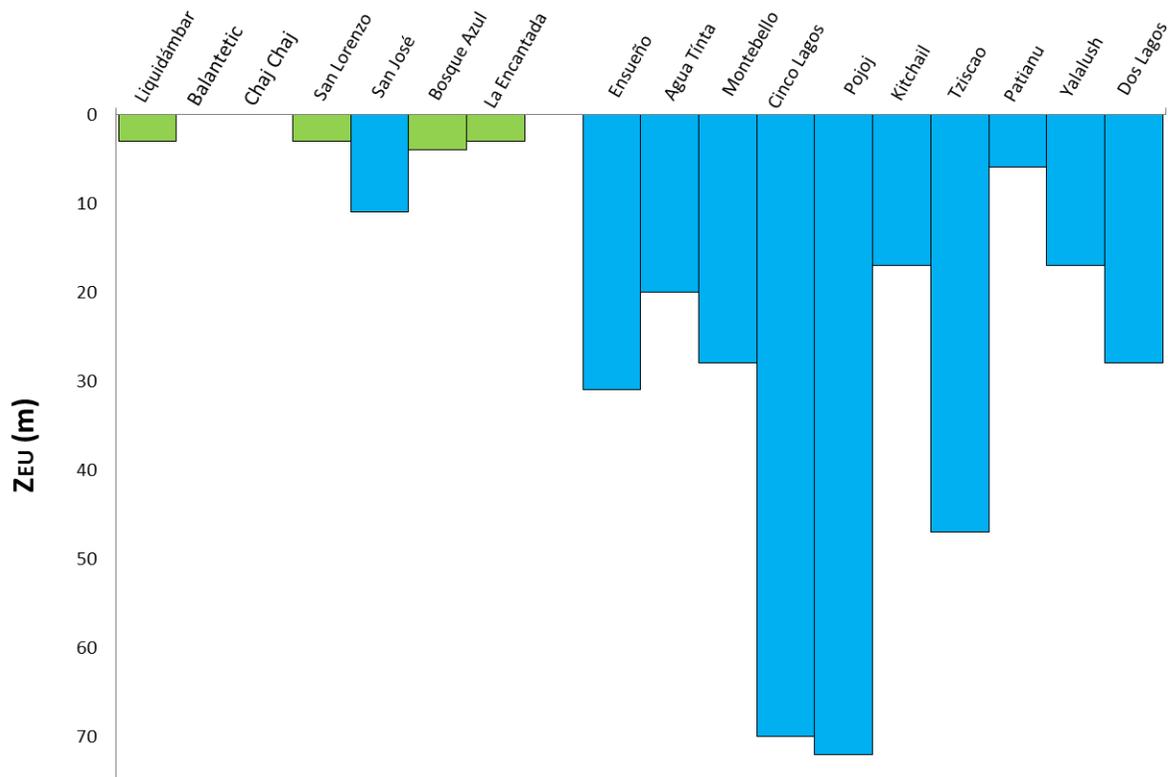
Los lagos con perfiles homogéneos de oxígeno (con diferencias no mayores a 1 mg/L entre la concentración en superficie y fondo) fueron los que estaban circulando: Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush. Por el contrario, los lagos estratificados presentaron perfiles clinógradados con hipolimnia anóxicos, salvo Cinco Lagos y Agua Tinta que alcanzaron condiciones de hipoxia, es decir concentraciones menores a 2-3 mg/l de oxígeno disuelto (USGS 2008.)



**Fig. 5.** Concentración de oxígeno disuelto promedio de los lagos de Montebello muestreados, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. Las barras de error indican la desviación estándar (Verde = Lagos Impactados, Azul = Lagos prístinos).

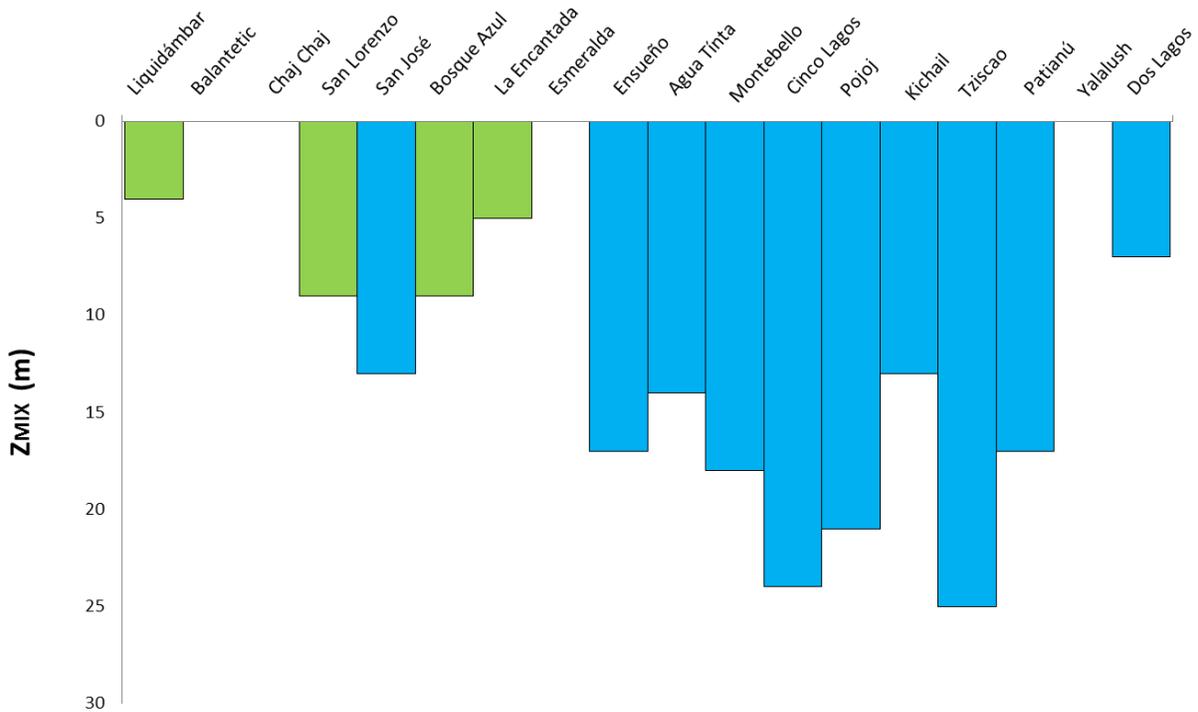
La  $Z_{EU}$  más amplia se encontró en Pojoj con 72 m y la mínima en Liquidámbar a 1.7 m. Los lagos cuya zona eufótica es angosta ( $Z_{EU} < 5$  m de profundidad) son Liquidámbar, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada con un promedio de  $3.25 \pm 0.5$  m. En contraparte, el promedio de la  $Z_{EU}$  en el resto de los lagos fue de  $31.5 \pm 22.4$  m.

Se observa una notable diferencia entre los lagos ubicados al NW del PNLN y el resto, ya que presentan una menor profundidad en el límite de la  $Z_{EU}$  respecto a los demás aquí estudiados (Fig. 6). Debido a que el perfilador de fluorescencia requiere de una columna de agua mínima para registrar, no fue posible emplearlo en los más someros (i.e., Balantetic, Chaj Chaj y Esmeralda).



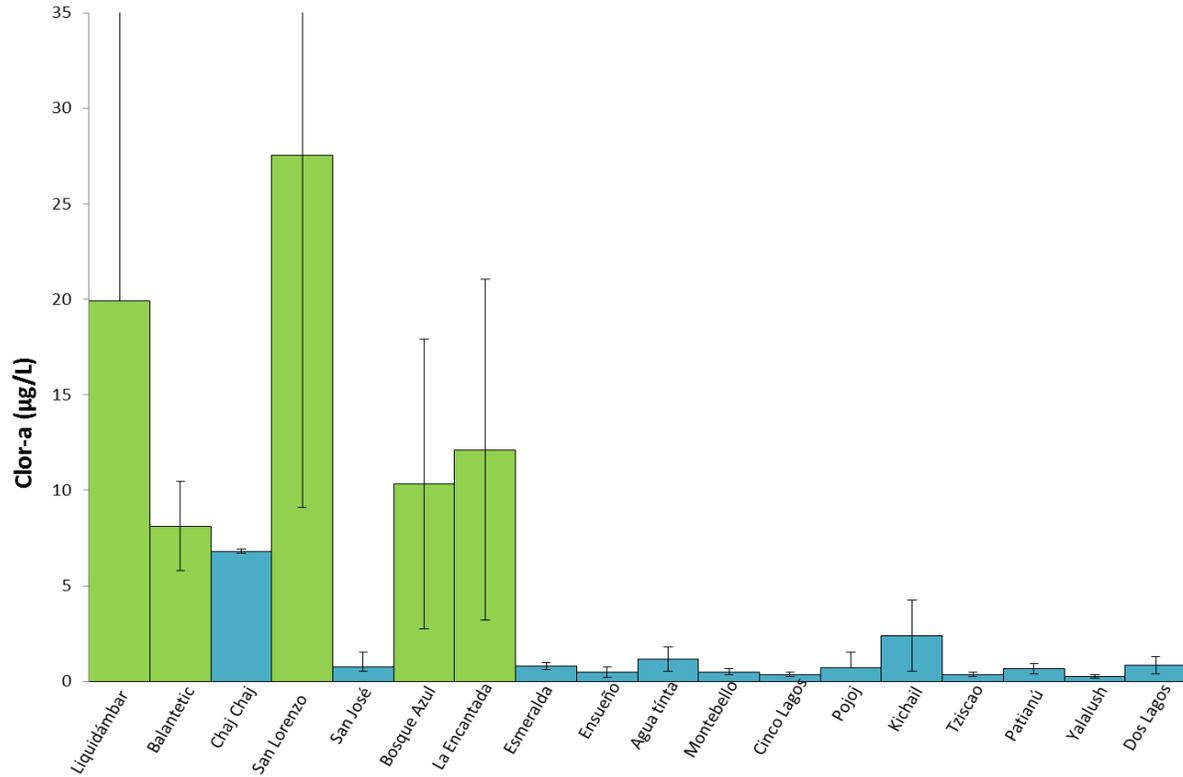
**Fig. 6.** Zona eufótica (Z<sub>EU</sub>) de los lagos de Montebello muestreados, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. (Verde = Lagos Impactados, Azul = Lagos prístinos).

La capa de mezcla más amplia se encontró en Tzisco (0- 25 m de profundidad) y la más reducida en Liquidámbar (0-4 m de profundidad). En promedio la Z<sub>MIX</sub> de los lagos estratificados es de  $14 \pm 6.7$  m (Fig. 7). Es notable la diferencia entre la profundidad a la que se sitúa la capa de mezcla entre lagos impactados y prístinos; siendo más profunda en lagos prístinos ( $16.5 \pm 4.1$  m) y reducida en lagos impactados ( $6.9 \pm 3.1$  m).



**Fig. 7.** Capa de mezcla ( $Z_{MIX}$ ) de los lagos de Montebello muestreados, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. (Verde = Lagos Impactados, Azul = Lagos prístinos).

La mayor concentración promedio de Clor-a se registró en San Lorenzo ( $27.5 \pm 18.5 \mu\text{g/L}$ ) y la mínima en Yalalush ( $0.3 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$ ). Se observa una notable diferencia entre los lagos ubicados al NW ( $14.6 \pm 12 \mu\text{g/L}$ ) respecto a los del SE ( $0.8 \pm .6 \mu\text{g/L}$ ) del PNLM. Los lagos del NW presentan una mayor concentración de Clor-a respecto a los demás estudiados (Fig. 8), a excepción de San José, debido a que se ha observado que el flujo de agua es de San José hacia los demás lagos del Sistema Tepancoapan a causa de su elevación. Por otro lado, Chaj Chaj que también pertenece al sistema Tepancoapan, a pesar de estar categorizado como no impactado, tiene una concentración de Clor-a cercana a la mesotrofia.



**Fig. 8.** Concentración de clorofila-a (Clor-a) promedio de los lagos de Montebello muestreados, ordenados de NW a SE a lo largo de la zona de fractura dominante. Las barras de error indican la desviación estándar (Verde = Lagos Impactados, Azul = Lagos prístinos).

Se encontraron diferencias significativas en la concentración de Clor-a en los 18 lagos muestreados en el nivel  $p < 0.05$  para las tres condiciones [ $F(17,36) = 161.8, p = 0.00$ ]. Las comparaciones Post hoc usando la prueba HDS de Tukey indican diferencias entre los lagos que pertenecen al Sistema Candelaria y los que pertenecen al Sistema Tepancoapan (Tabla 3). A excepción del lago San José que está ubicado dentro del sistema Tepancoapan, no presenta diferencias significativas con respecto a los lagos ubicados en el Sistema Candelaria.

**Tabla 3.** Subconjuntos homogéneos generados de la prueba HDS de Tukey. Coincidentes con la ubicación de los lagos dentro de los Sistemas Tepancoapan y Candelaria, a excepción de San José.

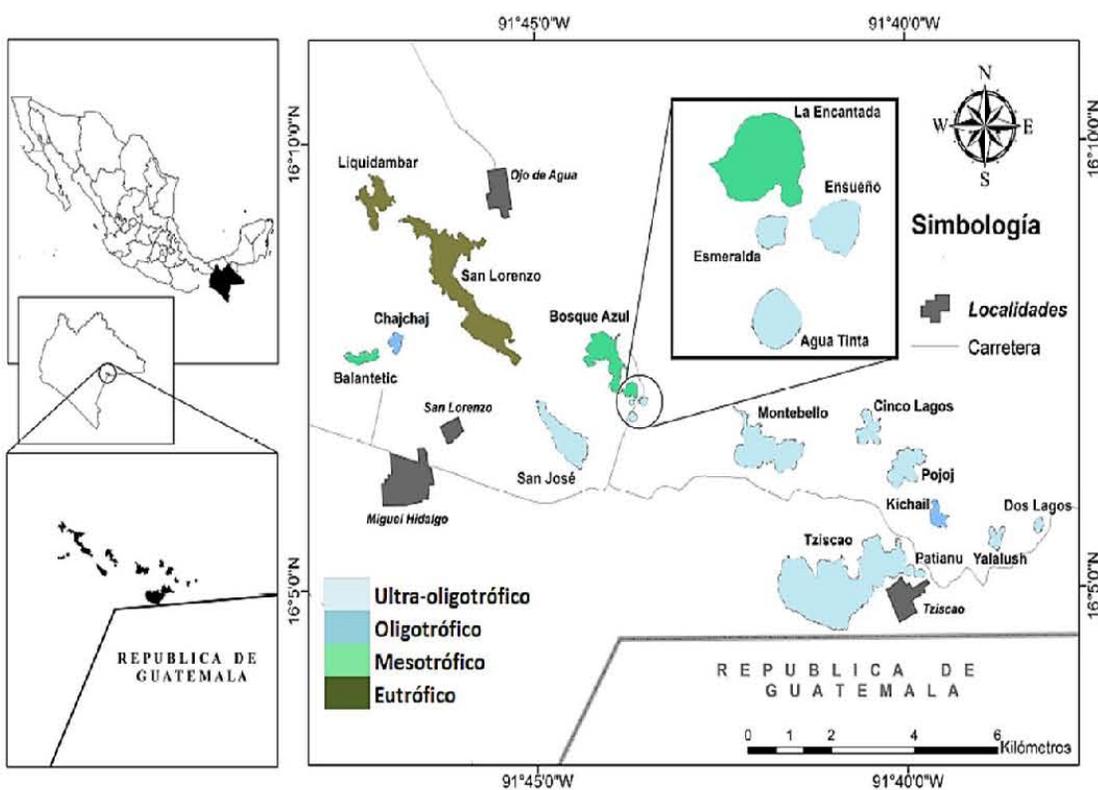
Sistema	Lagos	N	Subconjunto para alfa = 0.05						
			1	2	3	4	5	6	
Candelaria	Yalalush	3	0.3000						
Candelaria	Tziscaco	3	0.3000						
Candelaria	Cinco Lagos	3	0.4000						
Candelaria	Ensueño	3	0.5000						
Candelaria	Montebello	3	0.5333						
Candelaria	Patianú	3	0.6667						
Tepancoapan	San José	3	0.7333						
Candelaria	Pojoj	3	0.7333						
Candelaria	Esmeralda	3	0.8000						
Candelaria	Dos Lagos	3	0.8333						
Candelaria	Agua Tinta	3	1.3667						
Candelaria	Kichail	3	2.4000						
Tepancoapan	Chaj Chaj	3		6.7667					
Tepancoapan	Balantetic	3		8.1000	8.1000				
Tepancoapan	Bosque Azul	3			10.3333	10.3333			
Tepancoapan	La Encantada	3				12.1333			
Tepancoapan	Liquidámbar	3					19.9000		
Tepancoapan	San Lorenzo	3							27.5333
	Sig.		0.5990	0.9810	0.4960	0.8130	1.0000		1.0000

En la Figura 9 se presenta los estados tróficos de los 18 lagos estudiados, definidos con base en la concentración media de Clor-a en cada uno de ellos y la clasificación de la OCDE (Tabla 2).

Con base en la clasificación de Alcocer *et al.* (2016), a los resultados de concentración de Clor-a de este trabajo y su estado trófico se diferenciaron los lagos en cuatro categorías: someros prístinos, someros impactados, profundos prístinos y profundos impactados (Tabla 4, Fig. 9). La concentración de Clor-a promedio de los lagos impactados fue de  $15.6 \pm 8 \mu\text{g/L}$ . mientras que los prístinos  $1.2 \pm 1.8 \mu\text{g/L}$ .

**Tabla 4.** Zona fótica, profundidad de la termoclina, concentración de Clor-a y estado trófico de los lagos de Montebello estudiados. ( $Z_{EU}$ =profundidad de zona eufótica, Clor-a= concentración de clorofila-a, D.E. = desviación estándar, SD= Sin datos, NP= No presenta).

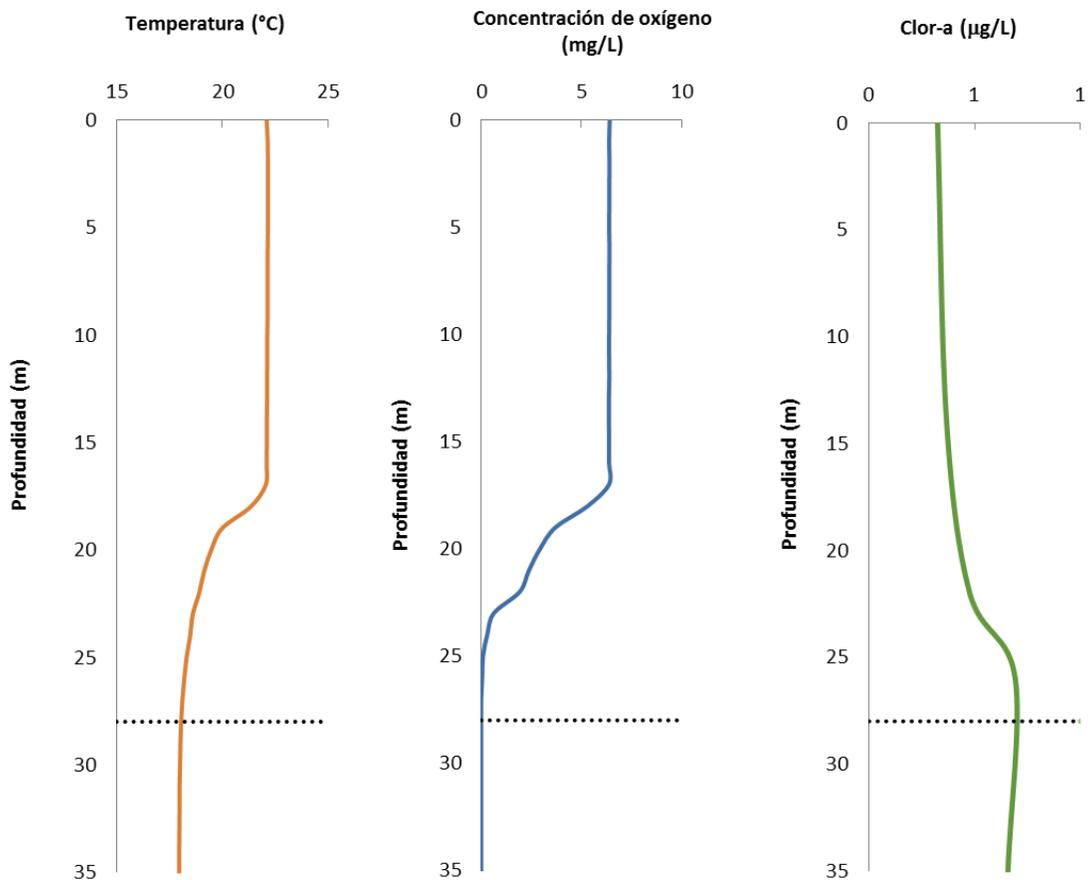
Clasificación	Lago	$Z_{EU}$ (m)	$Z_{MIX}$ (m)	Clor-a ( $\mu\text{g/L}$ )			D.E.	Estado Trófico	
				mín	máx	media			
Impactados	Someros	Liquidámbar	3	4	2.4	71.4	36.9	48.8	Eutrófico
		San Lorenzo	3	10	6.6	39.3	23.0	23.1	Eutrófico
		Balantetic	SD	NP	6.7	10.8	8.8	2.9	Mesotrófico
	Profundos	Bosque Azul	4	9	3.4	23	13.2	13.9	Mesotrófico
		La Encantada	3	5	1	24.2	12.6	16.4	Mesotrófico
Prístimos	Someros	Chaj Chaj	SD	NP	6.7	6.9	6.8	0.1	Oligotrófico
		San José	11	13	0.5	1	0.8	0.4	Ultra-oligotrófico
		Esmeralda	SD	NP	0.6	0.9	0.8	0.2	Ultra-oligotrófico
		Agua Tinta	20	14	0.6	2	1.3	1.0	Ultra-oligotrófico
		Kichail	17	13	0.5	4.5	2.5	2.8	Oligotrófico
		Patianu	6	17	0.4	0.5	0.5	0.1	Ultra-oligotrófico
		Yalalush	17	NP	0.2	0.4	0.3	0.1	Ultra-oligotrófico
		Montebello	19.4	18	0.3	0.7	0.5	0.3	Ultra-oligotrófico
	Profundos	Ensueño	31	17	0.2	0.9	0.6	0.5	Ultra-oligotrófico
		Cinco Lagos	70	24	0.3	0.5	0.4	0.1	Ultra-oligotrófico
		Pojoj	72	21	0.2	2.2	1.2	1.4	Ultra-oligotrófico
		Tziscaco	47	25	0.2	0.5	0.4	0.2	Ultra-oligotrófico
		Dos Lagos	28	7	0.2	1.3	0.8	0.8	Ultra-oligotrófico



**Fig. 9.** Estado trófico de los lagos de Montebello con base en su concentración de Clor-a.

## Someros prístinos

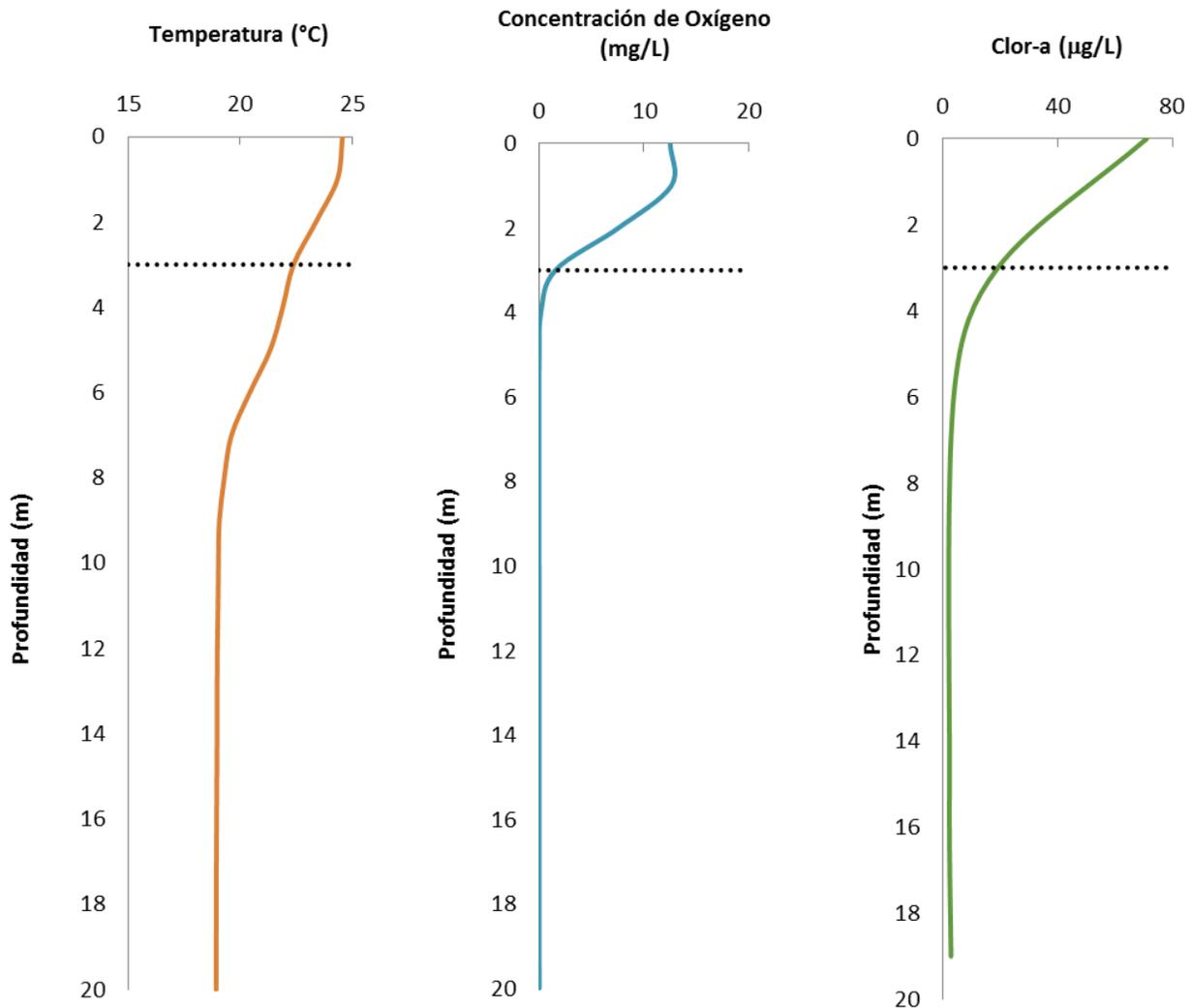
Pertencen a este grupo los lagos Agua Tinta, Chaj Chaj, Esmeralda, Kichail, Patianú, San José, Yalalush y Montebello. Todos a excepción de Chaj Chaj y San José se localizan al SE del parque, es decir en el Sistema Candelaria. Solo los lagos Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush se encontraron circulando. El promedio entre la ubicación del techo y piso del metalimnion de los lagos estratificados es profundo ( $15.2 \pm 2.5$  m). El límite de la Z<sub>EU</sub> se encuentra en promedio a los  $16.5 \pm 7.6$  m. La concentración de Clor-a promedio es de  $1.7 \pm 2.2$  µg/L, el valor mínimo se registró en el epilimnion de Yalalush (0.3 µg/L) y máximo en Chaj Chaj (6.8 µg/L). Se encontraron máximos profundos de clorofila (DCM) en los lagos Agua Tinta a 20 m y Yalalush a 18 m. La concentración de oxígeno disuelto se registró en un intervalo de 0 a 7.5 mg/L, en promedio  $4.6 \pm 1.3$  mg/L. Los lagos estratificados presentan perfiles de temperatura y oxígeno disuelto clinógrafos (e.g. Montebello, Fig. 10). Aquellos lagos que se encontraron circulando muestran perfiles homogéneos.



**Fig. 10.** Perfiles de temperatura (naranja), oxígeno disuelto (azul) y clorofila-a (verde) en el lago Montebello como ejemplo de lago somero prístino (---- = límite de la Z<sub>EU</sub>).

## Someros impactados

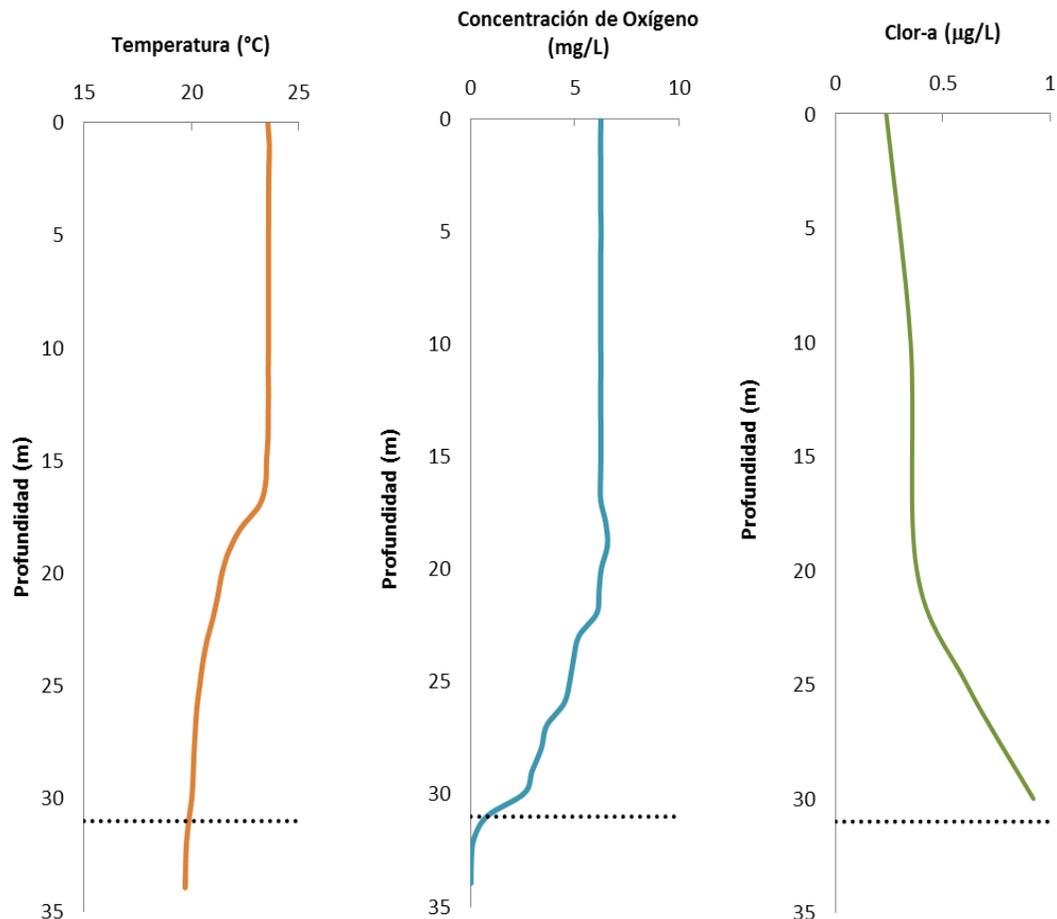
En esta clasificación están los lagos Balantetic, Liquidámbar y San Lorenzo. Ubicados al NW del Parque en el Sistema Tepancoapan. Balantetic fue el único lago de este grupo que no presentó estratificación. El promedio entre la ubicación del techo y piso del metalimnion de estos lagos es cercano a la superficie ( $7.3 \pm 3.9$  m). El grosor de la Z<sub>EU</sub> de es más angosto respecto a los lagos someros prístinos, en promedio  $3 \pm 0$  m. La concentración promedio de Clor-a del grupo es  $22.8 \pm 14.1$   $\mu\text{g/L}$ . Los valores mínimos y máximos se registraron en el hipolimnion y epilimnion de Liquidámbar, respectivamente ( $2.4$  y  $71.4$   $\mu\text{g/L}$ ). Los máximos de clorofila de los lagos mencionados son superficiales; en Liquidámbar en la superficie y en San Lorenzo a 4 m. La concentración de oxígeno disuelto se registró en un intervalo de 0 a 12.61 mg/L, en promedio  $3.4 \pm 1.6$  mg/L. Los lagos estratificados presentan perfiles de temperatura, oxígeno disuelto y Clor-a clinógrafos (e.g. Liquidámbar, Fig. 11). Los lagos que se encontraron circulando presentan perfiles homogéneos.



**Fig. 11.** Perfiles de temperatura (naranja), oxígeno disuelto (azul) y clorofila-a (verde) en el lago Liquidámbar como ejemplo de lago somero impactado (---- = límite de la Z<sub>EU</sub>).

## Profundos prístinos

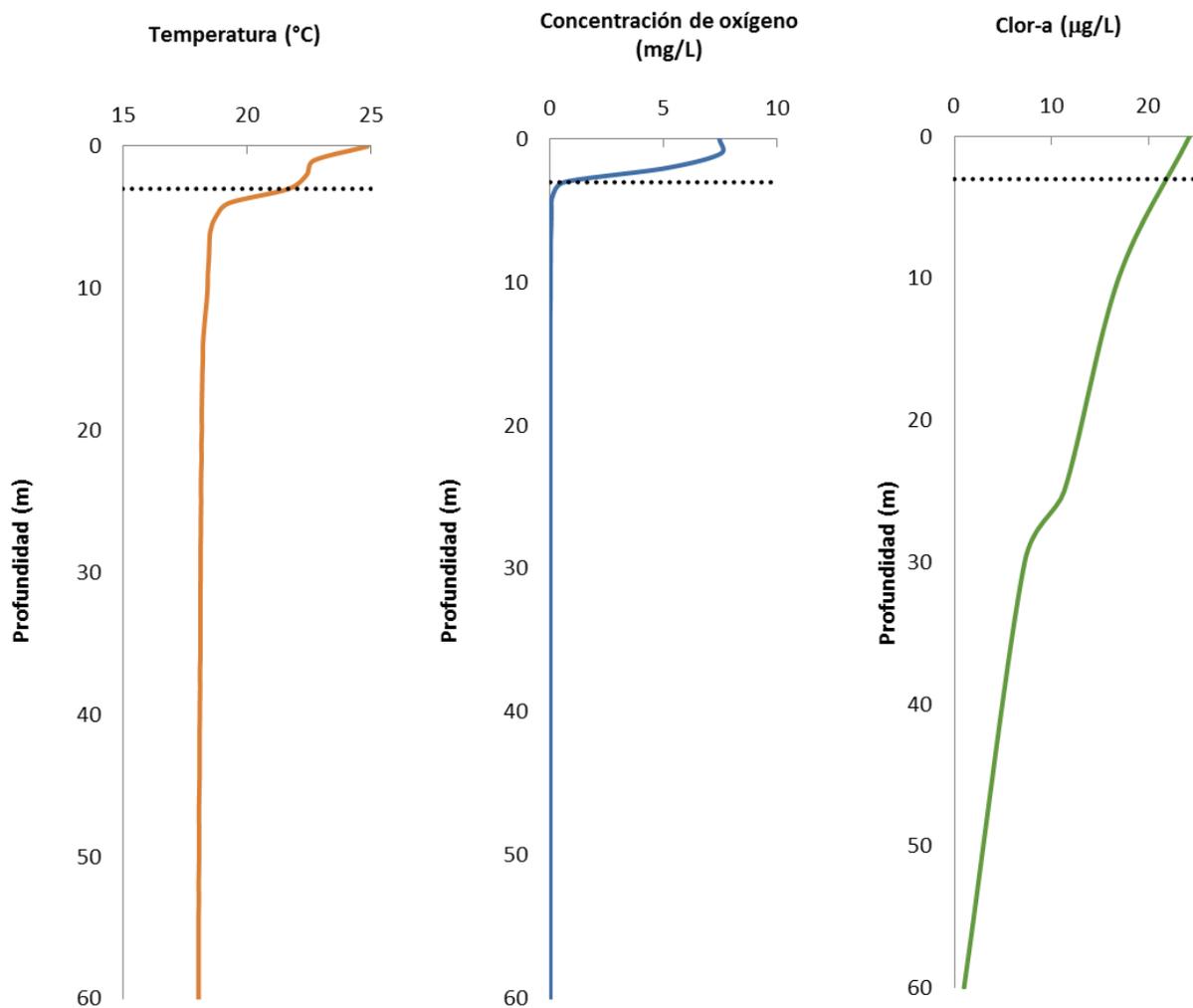
Comprende a Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Pojoj y Tzisco, todos ellos ubicados en el Sistema Candelaria. Todos los lagos de esta clasificación se encontraron estratificados. El promedio entre la ubicación del techo y piso del metalimnion es profundo ( $18.7 \pm 7.0$  m). La Z<sub>EU</sub> es amplia, en promedio  $50 \pm 21$  m. La concentración promedio de Clor-a del grupo es  $0.7 \pm 0.3$   $\mu\text{g/L}$ . El valor mínimo se registró en el epilimnion de Dos lagos ( $0.2$   $\mu\text{g/L}$ ) y el valor máximo en el hipolimnion de Pojoj ( $2.2$   $\mu\text{g/L}$ ). Estos lagos presentan DCM; Cinco Lagos a 40 m, Dos lagos a 26 m, Ensueño a 30m Pojoj a 40m y Tzisco a 30m. La concentración de oxígeno disuelto se registró en un intervalo de 0.01 a 8.02 mg/L, en promedio  $4.4 \pm 1.6$  mg/L. Los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto son clinógrafos, mientras que los de Clor-a son ortógrafos (e.g. Ensueño, Fig. 12).



**Fig. 12.** Perfiles de temperatura (naranja), oxígeno disuelto (azul) y clorofila-a (verde) en el lago Ensueño como ejemplo de lago profundo prístino (---- = límite de la Z<sub>EU</sub>).

## Profundos impactados

En este grupo se encuentran los lagos Bosque Azul y La Encantada, ambos pertenecientes al Sistema Tepancoapan. Los lagos se encontraron estratificados en el periodo de muestreo. El promedio entre la ubicación del techo y piso del metalimnion es somero ( $6.5 \pm 3.1$  m). La profundidad de la ZEU es también cercana a la superficie, en promedio  $3.5 \pm 0.7$  m. La concentración promedio de Clor-a del grupo es  $12.7 \pm 0.8$   $\mu\text{g/L}$ , el valor máximo se encontró en el epilimnion de La Encantada ( $24.2$   $\mu\text{g/L}$ ) y el mínimo en el hipolimnion del mismo lago ( $1.0$   $\mu\text{g/L}$ ). En ambos lagos los máximos de clorofila se sitúan en la superficie y en ambos casos el máximo supera el doble de la concentración promedio de la columna de agua. La concentración de oxígeno disuelto se registró en un intervalo de 0 a  $8.91$  mg/L, en promedio  $0.5 \pm 0.4$  mg/L. Los perfiles de Clor-a, temperatura y oxígeno disuelto son clinógrafos (e.g. La Encantada, Fig. 13).



**Fig. 13.** Perfiles de temperatura (naranja), oxígeno disuelto (azul) y clorofila-a (verde) en el lago La Encantada como ejemplo de lago profundo impactado (---- = límite de la ZEU).

Los valores más altos de Clor-a integrada por unidad de área (Tabla 5) se presentan en aquellos lagos que se encuentran al NW del Parque, es decir en el Sstema Tepancoapan.

Lago	Som/Pro	Pri/Imp	Zeu (m)	Clor-a (mg/m <sup>2</sup> )
Liquidámbar	Som	Imp	3	180.8
San Lorenzo	Som	Imp	3	151.5
Balantetic	Som	Imp	-	35.6
Bosque Azul	Pro	Imp	4	87.2
La Encantada	Pro	Imp	3	92.4
Chaj Chaj	Som	Pri-Imp	-	27.2
San José	Som	Pri	11	10.5
Esmeralda	Som	Pri	-	3
Agua Tinta	Som	Pri	20	25.6
Kitchail	Som	Pri	17	18.3
Patianu	Som	Pri	6	4.6
Yalalush	Som	Pri	17	5.4
Montebello	Som	Pri	28	12.8
Ensueño	Pro	Pri	31	13.8
Cinco Lagos	Pro	Pri	70	29.8
Pojoj	Pro	Pri	72	29.2
Tziscoa	Pro	Pri	47	19.9
Dos Lagos	Pro	Pri	28	18.2

**Tabla 5.** Clor-a integrada por unidad de área desde la superficie hasta el límite de ZEU de cada lago, ordenados de NW a SW (ZEU = profundidad de zona eufótica; Som/Prof = somero ó profundo; Pri/Imp = prístino o impactado).

## Discusión

La primera diferencia que se encontró entre los lagos prístinos y los impactados es en relación a la zona eufótica. En los lagos prístinos alcanza mayor profundidad (hasta los 72 m,  $31 \pm 24$  m en promedio), indicando una alta transparencia del agua. Por el contrario, la  $Z_{EU}$  es muy somera en los lagos impactados ( $3 \pm 2$  m promedio). La baja penetración de la luz está frecuentemente asociada, salvo cuando existe la presencia de elevada cantidad de sedimentos (turbidez terrígena), a la alta densidad de fitoplancton (turbidez biogénica), dado que la eutrofización incrementa la biomasa fitoplanctónica (Roldán y Ramírez, 2008). En este sentido, la baja profundidad de  $Z_{EU}$  en los lagos impactados probablemente se deba a que están eutrofizados.

Con relación a la temperatura, la  $Z_{MIX}$  en los lagos impactados, en los casos en que están estratificados, es más reducida ( $7 \pm 3$  m promedio) en comparación con los prístinos estratificados ( $17 \pm 5$  m promedio). En los lagos con mayor estado trófico y derivado de una mayor turbidez, la termoclina se encuentra ubicada más cercana a la superficie y por ende la  $Z_{MIX}$  es menor, lo cual coincide con la hipótesis que mencionan Roldán y Ramírez (2008); cuando un lago recibe una carga incrementada de nutrientes, aumenta el crecimiento de todos los productores incrementando la turbidez biogénica. En consecuencia este hecho hace que la penetración de la luz disminuya y la energía se absorba en una capa superficial más delgada, por lo tanto el gradiente de temperatura distintivo de la termoclina se localizará a menor profundidad.

Los lagos estratificados, tanto impactados como prístinos presentan un perfil clinógrafo de oxígeno disuelto. Los lagos en zonas tropicales suelen presentar un déficit de oxígeno independientemente del patrón térmico y nivel de biomasa fitoplanctónica, que presentan pues debido a la temperatura de estas zonas en el hipolimnion de estos lagos la descomposición de materia orgánica en el fondo la cual implica consumo de oxígeno, puede ser hasta cuatro veces más rápida que en lagos templados (Esteves, 1998). Además, la concentración de saturación de oxígeno disuelto es inversamente proporcional a su temperatura (Horne y Goldman, 1994), por lo que a mayor temperatura la concentración de oxígeno disuelto suele ser menor. Sin embargo, la profundidad de la zona anóxica en lagos prístinos e impactados varió; en los lagos impactados la zona anóxica es más amplia y se aproxima a la superficie de forma asociada a hipolimnia también más amplios, mientras que en los prístinos las condiciones anóxicas se presentan solamente cerca del fondo.

Los lagos ubicados en el Sistema Tepancoapan (al NW del PNLN) fueron caracterizados con un estado trófico más avanzado (meso a eutróficos). Los perfiles de Clor-a tienen una pendiente clinográfica, es decir con máximos cercanos a la superficie para luego descender rápidamente. En cambio, los lagos pertenecientes al Sistema Candelaria (al SE del parque), presentan estados menos avanzados (ultraoligo a oligotróficos) y sus perfiles de Clor-a son ortógrafos y en algunos se presenta el DCM.

Los lagos que presentaron DCM son Agua Tinta, Yalalush, Cinco Lagos, Dos Lagos, Ensueño, Pojoj y Tzisaio, todos ellos con estado trófico ultra-oligotrófico u oligotrófico. La presencia de un DCM es común en lagos oligotróficos con una  $Z_{EU}$  que llega hasta el metalimnion y en donde se acumula el fitoplancton (Gervais *et al.*, 1997). Otra característica común en la mayoría de estos lagos es un DCM ubicado por debajo del límite de la zona eufótica “tradicional”, esto, del 1% del SPAR (Rodríguez, 2011., Pinel *et al.* 2008), aproximadamente alrededor del 0.1% de la SPAR lo cual ha sido observado en otros lagos oligotróficos tropicales como Alchichica (González, 2014., Rodríguez, 2011).

La clasificación *a priori* que se hizo de los lagos, resultó coincidente con el estado trófico calculado salvo para San José y Chaj Chaj, ambos del Sistema Tepancoapan, que se caracteriza por que la mayoría de sus lagos están impactados. En el caso del lago San José, la baja concentración de Clor-a puede deberse a la red de drenaje que, aunque no es visualmente evidente al ser en su mayor parte subterránea, en un estudio geomorfológico del área de estudio se identifica que puede estar determinada por que algunos cuerpos de agua tienen una mayor elevación con respecto al nivel del mar (Durán *et al.* 2014). San José no está contemplado en este grupo, aunque podría ser el caso, explicando así que sus aguas fluyen de este lago a los demás del Sistema Tepancoapan y no en sentido contrario. Por otro lado, Hernández (2016) reporta concentraciones para Chaj Chaj de 13.7  $\mu\text{g/L}$  de Clor-a, que son del doble de lo registrado en el presente estudio, lo cual sugiere más bien un estado de mesotrofia. Incluso los valores aquí reportados para Chaj Chaj se encuentran bastante alejados de los “típicos” registrados para los demás lagos ultraoligo y oligotróficos, lo que implica un estado trófico más avanzado.

Si se toman en cuenta los resultados de los subconjuntos homogéneos de la prueba HDS Tukey para la Clor-a, mostrados en la Tabla 3, se obtiene una mejor idea del comportamiento de los lagos, en dónde San José se debería clasificar formando parte del Sistema Candelaria y Chaj Chaj permanece con los del Sistema Tepancoapan.

El Plan Rector de Producción y Conservación (SAGARPA-FIRCO, 2007) 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 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 PNLN. El cambio de uso de suelo y la pérdida de la cobertura vegetal generan cambios en la estabilidad de agregados y estructura del suelo haciéndolos más vulnerables a los procesos erosivos que conllevan a la movilización de material edáfico y productos químicos a la base de la cuenca donde se ubica el sistema lagunar de Montebello (Martínez, 2015). Los principales problemas ambientales asociados a la agricultura dentro del PNLN son uso de agroquímicos que contaminan los cuerpos de agua y la sustitución de bosques por áreas de cultivo (INEGI, 2010).

No hay información sobre estudios del estado trófico de los lagos del PNLM antes de que se reportaran cambios en su coloración, sin embargo debido a la cercanía de los lagos con estado trófico avanzado (Liquidámbar, San Lorenzo, Balantetic, Bosque azul y La Encantada) a posibles fuentes de contaminación como son descargas del río Grande de Comitán, así como el escurrimiento de nutrientes provenientes de las zonas de cultivos que rodean estos lagos, es posible aseverar que todos los lagos tuvieron un estado original prístino es decir de ultraoligotrófico a oligotrófico, a partir del cual evolucionaron al eutrófico derivado del aporte de los contaminantes antropogénicos.

Se respalda, por tanto, que el cambio en la coloración de los lagos está relacionado al cambio de su estado trófico y que éste está muy probablemente relacionado a la cercanía de fuentes de contaminación antropogénica.

Con respecto a la concentración máxima de Clor-a registrada en Liquidámbar (71  $\mu\text{g/L}$ ), el cual fue identificado como un lago eutrófico, se han reportado valores similares (con una concentración máxima de Clor-a de 79.4  $\mu\text{g/L}$ ; Gusev, 2008) en un sistema de lagos kársticos en la región Vladimir, en Rusia Central durante los años 2003 y 2004. En general las regiones con tipo de suelo kárstico son especialmente susceptibles a contaminación de sus cuerpos de agua por actividad antropogénica debido a las propiedades particulares del karst y a los residuos que son vertidos hacia los acuíferos (Aguilar *et al.* 2013, Hernández *et al.* 2011).

La menor concentración de Clor-a (0.2  $\mu\text{g/L}$ ) fue encontrada en Yalalush, Dos Lagos, Ensueño, Pojoj y Tzisco, valor similar a lo reportado por Cervantes *et al.* (2009) y Cervantes *et al.* (2015) en sistemas kársticos oligotróficos de México (El Padre y Minicenote en Yucatán, Cenote Azul en Quintana Roo). La presencia de diversos cuerpos de agua con condiciones oligotróficas en suelos kársticos de México es importante, pues se pueden tomar como referencia en cuanto su estado trófico inicial antes de alguna perturbación antropogénica.

Un sistema kárstico similar al PNLM es el del Parque Nacional Lagunas de Ruidera, España; lo anterior debido a la variedad de cuerpos de agua que presenta este sistema de lagos con diferentes formas, propiedades fisicoquímicas y que, al igual que el PNLM, sus lagos también presentan comunicación entre ellos (Álvarez *et al.* 2007). Estos autores reportan concentraciones de Clor-a promedio en la columna de agua que van de 0.4  $\mu\text{g/L}$  hasta 9  $\mu\text{g/L}$ . Asimismo, afirman que los procesos de contaminación que perjudican a las Lagunas de Ruidera, clasificadas en estados de oligo a mesotróficas, tienen una estrecha relación con el agua superficial (fluvial y lacustre) y las aguas subterráneas. Explican también que, al igual que en las cercanías del PNLM, existe un exceso de fertilización con compuestos nitrogenados en zonas de cultivo cercanas al parque, lo cual provoca la contaminación de estos lagos.

## Conclusiones

De acuerdo a los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto se identificaron a los lagos Balantetic, Chaj Chaj, Esmeralda y Yalalush en circulación cuyos perfiles se mostraron constantes en la columna de agua. El resto de los lagos estaban estratificados presentando perfiles clinógrados. Los perfiles de PAR permitieron identificar el grosor de la zona eufótica, siendo angosta en los lagos Liquidámbar, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada. i.e. ancha en San José, Ensueño, Agua Tínta, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Kitchail, Tzisco, Patianu, Yalalush y Dos lagos.

Con base en la determinación de la concentración de Clor-a fitoplanctónica en los 18 lagos se observó que ésta es mayor en los lagos ubicados en el sistema Tepancoapan y menor en aquellos que se encuentran en el sistema Candelaria.

Los patrones de distribución en la columna de agua de Clor-a difieren en los lagos impactados y prístinos. Los impactados presentan máximos cercanos a la superficie, mientras que los prístinos presentan máximos de Clor-a a mayor profundidad.

De acuerdo a la estimación del estado trófico a partir de la concentración de Clor-a fitoplanctónica cinco de los 18 lagos muestreados se clasificaron como “impactados”, cuyos estados tróficos según la OCDE van de mesotróficos a eutróficos (1 a 71.4  $\mu\text{g/L}$  de Clor-a). Los otros 13 lagos se clasificaron como “prístinos” y sus estados tróficos varían de ultra-oligotrófico a oligotrófico (0.2 a 6.9  $\mu\text{g/L}$  de Clor-a). La razón por la que los valores de concentración de Clor-a de los cuatro estadios se sobrelapan, posiblemente reside a la gran variabilidad en la profundidad de los lagos y a diferencias en la distribución vertical en la profundidad a la que se presentan en cada uno de ellos.

Los lagos impactados y prístinos difieren en el espesor de la capa de mezcla, la profundidad de la termoclina y en el espesor de la zona eufótica, parámetros que son todos ellos mayores en los prístinos respecto a los impactados.

El cambio en la coloración de los lagos de la zona NW del PNLM está relacionado al incremento de su estado trófico, pues éste refleja un aumento en la concentración de Clor-a. Debido a la cercanía de fuentes de contaminación antropogénica es posible aseverar la evolución de los lagos al eutrófico derivado del aporte de los contaminantes antropogénicos.

## Referencias

- Aguilar D. Y., Bautista F., Mendoza M. I. E., Delgado C. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 243-263.
- Alcocer J. 2007. El agua epicontinental de México, México, *Ciencia* 58(3): 26-35.
- Alcocer J., Oseguera L., Sánchez G., González C., Martínez J., González R. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology*. 75: 56-65.
- Álvarez M. y Cirujano S. 2007. *Ecología Acuática y Sociedad de las Lagunas de Ruidera*. CSIC, Madrid.
- Arar E. y Collins G. 1997. In vitro determination of chlorophyll-a and pheophytin-a in a marine and freshwater alga by fluorescence. Environmental Protection Agency.
- Aubriot L. y Bonilla S. 2013. Protocolo para la extracción y el análisis de clorofila-a por espectrofotometría. Sección Limnología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República de Uruguay, Uruguay.
- Camacho A. 2006. On the occurrence and ecological features of deep chlorophyll maxima (DCM) in Spanish stratified lakes. *Limnetica* 25 (1-2): 453-478.
- Carlson R. 1977. Atrophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. March 1977. 22(2): 361-369.
- Cervantes A., Mezeta M. y Gutiérrez A. 2009. Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 19 (2): 177-180.
- Cervantes A., Gutiérrez M. 2015. Physicochemistry and zooplankton of two karstic sinkholes in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Limnology*; 74 (2): 382-393
- CONAGUA. 2014. Portal en internet de la Comisión Nacional del Agua, disponible en <http://www.conagua.gob.mx/>.
- CONANP. 2009. Consultorías Integrales para el Desarrollo Rural Sustentable. Estudio para el monitoreo de la calidad de las lagunas en el Parque Nacional Lagunas de Montebello, México.

- CONANP, 2011 Programa de monitoreo de la calidad de agua: estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan. CONANP. Comitán de Domínguez, Chiapas.
- CONANP-SENARNAT. 2007. Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello, México.
- CFE 2012a. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo II: Geohidrología. México.
- CFE 2012b. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Tomo I: Hidrometeorología, México.
- Dodds K. 2002. Freshwater Ecology: Concepts and environmental applications. Academic press Kansas State University, Manhattan.
- Durán I., Escolero O., Muñoz E., Castillo M. y Silva G. 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.
- Esteves F. 1998. Fundamentos de Limnología. Segunda edición. Editorial Interciencia. Sao Paulo.
- Galicia V. 2012. Cambio de color en las lagunas de Montebello: Las atonalidades de una problemática tonal. Tesis de licenciatura. Centro de investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán.
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- Gervais F. 1997. Light-dependent growth, dark survival, and glucose uptake by cryptophytes isolated from a freshwater chemocline. Journal of Phycology. 33: 18-25.
- González C. 2014. Variación a largo plazo de la concentración y distribución vertical de la clorofila a fitoplanctónica en el Lago Alchichica, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. México.
- González del Castillo C. 2003. RAMSAR Ficha Informativa de los Humedales de Montebello.

- Gusev S. 2008. Photosynthetic Pigments of Plankton in Some Karst Lakes of Central Russia. *Inland Water Biology*. 3: 217-224.
- 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, Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Hernández L., Rebolledo M., Merino M., Soto A., Le Cossec A., Monroy E. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems *Water, Air, & Soil Pollution*. 218(1-4): 517-528.
- Horne J. y Goldman R. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill, Science. New York, USA.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Carta hidrológica de aguas superficiales (2010).
- 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 de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Melo C. y Cervantes J. 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.
- Moreta J. 2008. La eutrofización de los lagos y sus consecuencias. Facultad de Ciencias de la Salud, Escuela de Nutrición y Salud Comunitaria, Tecnología en Saneamiento Ambiental. Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- OCDE. 1982. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte Paris.
- Orozco C., Pérez A., Gonzáles M., Rodríguez F., y Alfayate J. 2011. Contaminación Ambiental. Una visión desde la química. Paraninfo SA. Madrid.
- Palmer A, Gert L. Van Dijken, Greg B., Brian J., Kate L., Matthew. M. y Kevin R. 2013, Light and nutrient control of photosynthesis in natural phytoplankton populations from the Chukchi and Beaufort seas, Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 58(6), 2013, 2185-2205.

- Pérez L. H., Pérez L. G., Pérez L. M. 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.
- Pinel B., Ghadouani A. y Gélinas M. 2008. Development and persistence of deep chlorophyll maxima in oligotrophic lakes over the summer season. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologie*. 30: 409-415.
- Rangel J., Enríquez P. y Sáintz E. 2009. Variación de la diversidad de aves de sotobosque en el Parque Nacional Lagos de Montebello, Chiapas, México. *Acta Zool. Mex.* 25(3): 479-495.
- Reynolds C. 2006. *The Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press. Reino Unido.
- Rodríguez A. 2011. Composición, estructura y biomasa en un lago monomítico cálido. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Roldan G. y Ramírez J. 2008. *Fundamentos de Limnología neotropical*, Segunda Edición, Editorial Universidad de Antioquía. Colombia.
- SAGARPA-FIRCO (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Fideicomiso de Riesgo Compartido). 2007. Plan Rector de Producción y Conservación, Microcuenca Juznajib La Laguna, Comitán Chiapas.
- Signoret M., Bulit C. y Pérez R. 1998. Patrones de distribución de clorofila *a* y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica* 8 (2): 81-88.
- United States Geological Survey (USGS). 2008. Hypoxia in the Gulf of Mexico. Consultado en Marzo del 2017 en: [https://toxics.usgs.gov/hypoxia/hypoxic\\_zone.html](https://toxics.usgs.gov/hypoxia/hypoxic_zone.html)
- Vásquez M. y Méndez E. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
- Vera M., Hernández P., Alcocer J., Ardiles V., Oseguera L. 2015. Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.

Villalpando L. 2015. Uso de percepción remota para la estimación de índice trófico de las lagunas del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Wetzel R. G. 2001. Limnology: Lake and river ecosystems. Academic Press. San Diego.

Witt C., Rangin C., Andreani L., Olaz N. & Martínez J. 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.