



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

Caracterización Físico-química de los lagos de Chapultepec,  
Ciudad de 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:

**María Fernanda Martínez Paz**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**Dr. Javier Alcocer Durand**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



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.  
Martínez  
Paz  
María Fernanda  
56533263  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
310139555
  
2. Datos del tutor  
Dr.  
Javier  
Alcocer  
Durand
  
3. Datos de sinodal 1  
Dra.  
Claudia Inés  
Rivera  
Cárdenas
  
4. Datos de sinodal 2  
Dr.  
Rodolfo Omar  
Arellano  
Aguilar
  
5. Datos de sinodal 3  
Dr.  
Luis Alberto  
Oseguera  
Pérez
  
6. Datos de sinodal 4  
M. en C.  
Adriana  
Gaytán  
Caballero
  
7. Datos del trabajo escrito  
Caracterización Físico-química de los lagos de Chapultepec, Ciudad de México.  
82 p  
2018

## **Agradecimientos**

Este estudio fue apoyado por el proyecto Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Distrito Federal 189194 “Estudio de la productividad primaria de los Lagos Menor y Mayor de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec a través de imágenes satelitales en tiempo real y sobre el impacto de los tóxicos y contaminantes en especies nativas” y el Proyecto de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, UNAM.

Agradezco, al Dr. Javier Alcocer por darme la oportunidad de participar en este proyecto, mi respeto y admiración.

A la Dra. Vilma Ardiles por apoyarme en todo momento durante este proceso.

Al Dr. Luis Oseguera y al Dr. Alfonso Lugo por el apoyo en campo y por resolver siempre mis dudas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ciencias por brindarme mis estudios.

Al Dr. Omar Arellano, la Dra. Claudia Rivera, el Dr. Luis Oseguera y a la M. en C. Adriana Gaytán por sus aportaciones a este trabajo.

También a todas las personas que hicieron este estudio posible, gracias.

Agradezco a mi padre Arturo Martínez, a mi madre Guadalupe Paz y a mi hermano Juan quienes me han enseñado a trabajar duro y nunca rendirme, gracias por apoyarme incondicionalmente, los amo.

A mi abuela Marta por ser el refugio que a veces necesitaba, por escucharme y por su apoyo, gracias.

A mis tíos y tías, quienes han sido una guía en este camino. En especial a mi tío Jorge Martínez quien me ha impulsado siempre a ser una mejor persona.

A mis primos, en especial a Yaz por jalarme las orejas cuando lo necesitaba y por ser uno de los pilares importantes en mi vida, a Nadia por siempre darme ánimos, a Dany, Paola, Manolo y José por estar en esos momentos especiales.

A mis ángeles de la guarda, Manuel y Jorge quienes recuerdo con tanto cariño.

A mis amigas de hace años y que ahora son como mis hermanas, Jad, Jun, Lala, Dany y Wen, quienes han estado siempre presentes y sin importar la distancia o el tiempo sin vernos, seguimos siendo las mejores amigas.

A mis amigos de carrera, principalmente a Julieta por ser la persona que siempre estuvo para mí, quien me apoyo en los momentos más difíciles y fue mi cómplice. A Azalea y Omar por sus consejos y ser incondicionales siempre. A Edson por siempre brindarme su apoyo. A Sandra, Shaden, Diana y los demás, gracias, por compartir esta etapa conmigo.

A mis maestros de la carrera que me enseñaron lo maravillosa que es la Tierra.

A mis maestros y amigos de teatro que me enseñaron a ver la vida de diferente forma y sobre todo a saber confiar en mí.

A la vida, que me ha enseñado a ser fuerte y a encontrar mi verdadero camino.

“Existen múltiples facetas en todos nosotros.  
Quiénes somos y quiénes podríamos ser si  
perseguimos nuestros sueños” MC

“La Tierra tiene música para los que escuchan”  
George Santayana.



## ÍNDICE

	<b>Págs.</b>
1. Resumen .....	11
2. Introducción .....	13
3. Antecedentes .....	19
3.1 Antecedentes históricos.....	19
3.2 Antecedentes generales.....	21
4. Justificación .....	22
5. Objetivos .....	22
6. Área de estudio .....	23
7. Materiales y métodos .....	25
7.1 Trabajo de campo.....	26
7.2 Nutrientes.....	27
7.3 DQO.....	28
7.4 DBO <sub>5</sub> .....	29
7.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	29
7.6. Clorofila-a (Clor-a).....	30
7.7 Índice de estado trófico (IET).....	30
7.8 Calidad de Agua.....	32
7.9 Análisis estadístico.....	34
8. Resultados .....	35
8.1 Parámetros físico-químicos.....	35
8.1.1 Transparencia del Disco Secchi.....	35
8.1.2 Temperatura.....	37
8.1.3 Oxígeno Disuelto (OD).....	39
8.1.4 Porcentaje de Saturación de OD.....	42
8.1.5 pH.....	44
8.1.6 Conductividad (K <sub>25</sub> ).....	47
8.1.7 Fósforo total (P-Tot).....	49
8.1.8 Fósforo Soluble Reactivo (PSR).....	51

	8.1.9. Nitrógeno Total (N-Tot).....	53
	8.1.10 Nitratos (N-NO <sub>3</sub> ).....	54
	8.1.11 Nitritos (N-NO <sub>2</sub> ).....	56
	8.1.12 Amoníaco (N-NH <sub>3</sub> ).....	58
	8.1.13 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID).....	59
	8.2 Análisis estadístico de los parámetros físico- químicos.....	62
	8.3 Clorofila-a (Clor-a).....	62
	8.4 Índice de estado trófico .....	63
	8.5 Indicadores de contaminación: DQO, DBO5 y SST.....	66
9.	Discusión .....	72
10.	Conclusión .....	77
11.	Recomendaciones .....	78
12.	Bibliografía .....	79



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Págs.</b>
<b>Tabla 1.</b> NOM-001-SEMARNAT-1996, Límites máximos permisibles de sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno.	14
<b>Tabla 2.</b> NOM-003-SEMARNAT-1997, Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público.	14
<b>Tabla 3.</b> Ley Federal de Derechos. Calidad de agua.	15
<b>Tabla 4.</b> Ley Federal de Derechos. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos.	15
<b>Tabla 5.</b> Índice de Estado trófico (Moreno, 2010). IET= Índice de Estado Trófico, $Z_{DS}$ = profundidad del Disco de Secchi	31
<b>Tabla 6.</b> Valores indicadores de Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ) en agua superficial (CONAGUA, 2003).	32
<b>Tabla 7.</b> Valores indicadores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua superficial (CONAGUA, 2003).	33
<b>Tabla 8.</b> Valores indicadores de Sólidos suspendidos totales (SST) en agua superficial (CONAGUA, 2003).	33
<b>Tabla 9.</b> Valores de $T^\circ$ , OD, %Sat OD, pH y $K_{25}$ , registrados en los tres lagos de Chapultepec.	35
<b>Tabla 10.</b> Concentraciones de nutrientes (concentraciones mínimas, máximas, promedio y desviación estándar) registradas en los tres lagos de Chapultepec.	61
<b>Tabla 11.</b> Valores de clorofila-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en agua en los tres lagos de Chapultepec. Mín= valor mínimo, Max= valor máximo, Prom= valor promedio y d.e.= desviación estándar.	63
<b>Tabla 12.</b> Clasificación del estado trófico del Lago Viejo con base en la profundidad del disco de Secchi ( $Z_{DS}$ ), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a).	64
<b>Tabla 13.</b> Clasificación del estado trófico del Lago Mayor con base en la profundidad del Disco de Secchi (DS), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a).	65
<b>Tabla 14.</b> Clasificación del estado trófico del Lago Menor de acuerdo a la profundidad del Disco de Secchi (DS), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a).	66
<b>Tabla 15.</b> Clasificación del Lago Viejo por cada sitio de estudio de acuerdo a las concentraciones de DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), DBO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y SS ( $\text{mg L}^{-1}$ ).	67
<b>Tabla 16.</b> Clasificación del Lago Mayor por cada sitio de estudio de acuerdo a las concentraciones de DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), DBO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y SS ( $\text{mg L}^{-1}$ ).	68
<b>Tabla 17.</b> Clasificación del Lago Menor de acuerdo a las concentraciones de DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), DBO ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y SS ( $\text{mg L}^{-1}$ ).	70
<b>Tabla 18.</b> Comparación entre valores de parámetros físico-químicos del presente trabajo con lagos urbanos.	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Págs.</b>
<b>Figura 1.</b> Lago Viejo de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México	23
<b>Figura 2.</b> Lago Mayor de la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México.	24
<b>Figura 3.</b> Lago Menor de la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México.	24
<b>Figura 4.</b> Ubicación general de los Lagos de Chapultepec, Ciudad de México. a) Lago Viejo, b) Lago Mayor, c) Lago Menor. (Tomado de Google Earth).	25
<b>Figura 5.</b> Instrumentos utilizados en los muestreos: a) Ecosonda portátil, b) Disco de Secchi, c) Potenciómetro portátil.	26
<b>Figura 6.</b> Tubo muestreador utilizado para obtención de muestras integradas de agua del lago.	27
<b>Figura 7.</b> Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Viejo.	36
<b>Figura 8.</b> Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Mayor.	36
<b>Figura 9.</b> Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Menor.	36
<b>Figura 10.</b> Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Viejo.	37
<b>Figura 11.</b> Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Mayor.	38
<b>Figura 12.</b> Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Menor.	38
<b>Figura 13.</b> Temperatura promedio en profundidad en los tres lagos.	39
<b>Figura 14.</b> Variación promedio anual del OD en el Lago Viejo.	40
<b>Figura 15.</b> Variación promedio anual del OD en el Lago Mayor.	40
<b>Figura 16.</b> Variación promedio anual del OD en el Lago Menor.	41
<b>Figura 17.</b> OD promedio en profundidad en los tres lagos.	42
<b>Figura 18.</b> Variación promedio anual del %Sat OD en el Lago Viejo.	42
<b>Figura 19.</b> Variación promedio anual del %Sat OD en el Lago Mayor.	43
<b>Figura 20.</b> Variación promedio anual del %Sat OD en el Lago Menor.	43
<b>Figura 21.</b> %Sat OD promedio en profundidad en los tres lagos.	44
<b>Figura 22.</b> Variación promedio anual del pH en el Lago Viejo.	45
<b>Figura 23.</b> Variación promedio anual del pH en el Lago Mayor	45
<b>Figura 24.</b> Variación promedio anual del pH en el Lago Menor.	46
<b>Figura 25.</b> Valores promedio de pH en profundidad en los tres lagos.	46

<b>Figura 26.</b>	Variación promedio anual de la $K_{25}$ en el Lago Viejo.	47
<b>Figura 27.</b>	Variación promedio anual de la $K_{25}$ en el Lago Mayor.	48
<b>Figura 28.</b>	Variación promedio anual de la $K_{25}$ en el Lago menor.	48
<b>Figura 29.</b>	$K_{25}$ promedio en profundidad en los tres lagos.	49
<b>Figura 30.</b>	Concentraciones de fósforo total (P-Tot) en el Lago Viejo.	50
<b>Figura 31.</b>	Concentraciones de fósforo total (P-Tot) en el Lago Mayor.	50
<b>Figura 32.</b>	Concentraciones de fósforo total (P-Tot) en el Lago Menor.	51
<b>Figura 33.</b>	Concentraciones de PSR en el Lago Viejo.	51
<b>Figura 34.</b>	Concentraciones de PSR en el Lago Mayor.	52
<b>Figura 35.</b>	Concentraciones de PRS en el Lago Menor.	52
<b>Figura 36.</b>	Concentraciones de nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Viejo.	53
<b>Figura 37.</b>	Concentraciones de nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Mayor.	53
<b>Figura 38.</b>	Concentraciones de nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Menor.	54
<b>Figura 39.</b>	Concentraciones de nitratos (N- $\text{NO}_3$ ) en el Lago Viejo.	54
<b>Figura 40.</b>	Concentraciones de nitratos (N- $\text{NO}_3$ ) en el Lago Mayor.	55
<b>Figura 41.</b>	Concentraciones de nitratos (N- $\text{NO}_3$ ) en el Lago Menor.	55
<b>Figura 42.</b>	Concentraciones de nitritos (N- $\text{NO}_2$ ) en el Lago Viejo.	56
<b>Figura 43.</b>	Concentraciones de nitritos (N- $\text{NO}_2$ ) en el Lago Mayor.	57
<b>Figura 44.</b>	Concentraciones de nitritos (N- $\text{NO}_2$ ) en el Lago Menor.	57
<b>Figura 45.</b>	Comportamiento de amoníaco (N- $\text{NH}_3$ ) en el Lago Viejo.	58
<b>Figura 46.</b>	Concentraciones de amoníaco (N- $\text{NH}_3$ ) en el Lago Mayor.	58
<b>Figura 47.</b>	Concentraciones de amoníaco (N- $\text{NH}_3$ ) en el Lago Menor.	59
<b>Figura 48.</b>	Concentraciones de NID en el Lago Viejo.	60
<b>Figura 49.</b>	Concentraciones de NID en el Lago Mayor.	60
<b>Figura 50.</b>	Concentraciones de NID en el Lago Menor.	61

## 1. RESUMEN

Los lagos urbanos son cuerpos de agua que han sido incorporados dentro de las ciudades, principalmente utilizados para recreación y cultura, por sus características, estos son vulnerables a las alteraciones ya que reciben vertidos de diferente naturaleza, causando modificaciones en la transparencia, temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad y aumentando su contenido de nutrientes. Estas condiciones afectan no sólo el estado de los lagos, también afecta a la población que tiene contacto con ella. Por eso el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar físico-químicamente las aguas de los tres Lagos del Bosque de Chapultepec con el fin de reconocer su calidad así como su dinámica temporal. Se realizaron muestreos mensuales desde abril del 2015 a marzo del 2016 en los tres lagos de Chapultepec (Lago Viejo, Lago Mayor y Lago Menor), con un total de 6 estaciones. Se midieron diversos parámetros, *in situ* se midieron los parámetros de transparencia, temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de oxígeno disuelto, pH y conductividad, también se sacaron muestras de los lagos para posteriormente en laboratorio obtener nutrientes, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y clorofila-a. Los tres lagos tuvieron una profundidad que nunca excedió 1.2 m, mostraron una baja transparencia de acuerdo al disco de Secchi, siendo el más turbio el Lago Menor con un promedio de  $0.06 \pm 0.04$  m; la temperatura vario entre 11 y 26 °C, el Lago viejo tuvo un promedio de  $18.2 \pm 2.7$  °C para el sitio 1,  $18.9 \pm 2.4$  °C para el sitio 2 y  $18.9 \pm 2.6$  °C para el sitio 3, el Lago Mayor tuvo  $21.4 \pm 2.4$  °C y  $20.8 \pm 2.9$  °C para el sitio 4 y 5 respectivamente y el Lago Menor tuvo  $18.8 \pm 4$ °C, clasificándolos como lagos tropicales; también presentaron una sobresaturación de oxígeno ya que llegan a valores de 300 % en % Sat de OD, el Lago Viejo presentó valores promedio de  $139 \pm 62$  % para el sitio 1,  $136 \pm 50$  % para el sitio 2 y  $124 \pm 39$  % para el sitio 3, el Lago Mayor tuvo  $177 \pm 72$  % y  $196 \pm 74$  % para el sitio 4 y sitio 5, respectivamente y  $140 \pm 85$  % para el Lago Menor; los valores de pH estuvieron entre 7.2 y 11.0; la conductividad fue moderada con valores de 329.7 a 669  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Los tres lagos tuvieron un alto contenido de nutrientes; N-NO<sub>3</sub> con valores entre 1.3 a 10.4 mg L<sup>-1</sup>, N-NO<sub>2</sub> entre 0.003 y 2.4 mg L<sup>-1</sup>, N-NH<sub>3</sub> entre 0.02 y 5.9 mg L<sup>-1</sup>, NID entre 1.4 y 14 mg L<sup>-1</sup>, N-Total entre 4.8 y 24.8 mg L<sup>-1</sup>, PRS entre 0.02 y 0.6 mg L<sup>-1</sup> y P-Total valores entre 0.2 y 1.5 mg L<sup>-1</sup>, al igual que altas concentraciones de clorofila-a con valores

entre 109 y 943  $\mu\text{g L}^{-1}$ , clasificando a los lagos como hipereutróficos. Los valores de los parámetros de calidad de agua en los tres lagos excedieron los límites permisibles establecidos en las NOMs 001 y 003, en la LFD y en el Acuerdo CE-CCA-001/89, por lo tanto, los lagos de Chapultepec no son aptos para el uso recreativo.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los lagos urbanos son cuerpos acuáticos que están incorporados dentro de las ciudades. Son utilizados principalmente para la recreación y el desarrollo cultural, sin embargo, pueden constituir una fuente de recursos para la población que se asienta a su alrededor. Asimismo, proporcionan un hábitat para diversas especies terrestres y acuáticas dándole un gran valor ecológico y paisajístico (García-Rodríguez *et al.*, 2014).

Estos lagos son particularmente vulnerables a las alteraciones antropogénicas ya que actúan como receptores de vertidos de diferente naturaleza, que pueden contaminarlos y/o modificar su estado trófico (Mancini *et al.*, 2012). Por lo anterior, en México se han creado Normas Oficiales Mexicanas (conocidas por su abreviación como NOMs) que en este caso, protegen a los cuerpos acuáticos para evitar su contaminación y tener una calidad de agua adecuada para el bienestar de los ecosistemas y de la población que tiene contacto con éstos. Las NOMs son regulaciones técnicas con un carácter obligatorio y establecen reglas, especificaciones, características, procesos, instalaciones, servicios, métodos y cumplimientos, entre otros, para tener un mejor manejo de los productos, procesos y servicios que pueden afectar a las personas, animales y el medio ambiente en general (DGN, 2015).

Para evaluar la calidad del agua se han creado normas desde 1994, muchas de las cuales siguen vigentes hasta el día de hoy, como las que se nombran a continuación:

1. **NOM-001-SEMARNAT-1996:** *“Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales”*. Evalúa parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Tabla 1).

**Tabla 1.** NOM-001-SEMARNAT-1996 Límites máximos permisibles de sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno, según tipo de cuerpo receptor.

Parámetros (mg L <sup>-1</sup> , excepto cuando se indique)	Embalses naturales y artificiales			
	Uso de riego agrícola (b)		Uso público urbano (c)	
	Promedio Mensual	Promedio Diario	Promedio Mensual	Promedio Diario
Sólidos Suspendidos Totales	75	125	40	60
Demanda Bioquímica de Oxígeno	75	150	30	60

2. **NOM-003-SEMARNAT-1997:** *“Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”*. También considera DBO<sub>5</sub> y SST (Tabla 2).

**Tabla 2.** NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes.

Límites máximos permisibles de contaminantes		
Tipo de Reuso	Promedio Mensual	
	DBO <sub>5</sub> mg L <sup>-1</sup>	SST mg L <sup>-1</sup>
Servicios al público con contacto directo	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	30	30

Sin embargo, estas normas se aplican a las aguas de descarga que se vierten a los cuerpos acuáticos y no a los sistemas mismos. Por eso, con el fin de tener una referencia de la calidad de agua de los cuerpos acuáticos estudiados en el presente trabajo, se hizo la comparación con la **Ley Federal de Derechos** (LFD) y con el Acuerdo CE-CCA-001/89. La LFD es aplicable en materia de aguas nacionales y establece parámetros de calidad de agua en dos diferentes usos: como fuente de abastecimiento para uso público y como protección de la vida

acuática (Tabla 3). También establece los límites máximos permisibles de contaminantes básicos en descargas de aguas residuales, que considera DBO<sub>5</sub> y SST (Tabla 4). El Acuerdo CE-CCA-001/89 establece criterios ecológicos de calidad de agua para calificar a los cuerpos de agua como aptos para su uso como fuente de abastecimiento de agua potable en actividades recreativas o para la protección de la vida acuática.

**Tabla 3.** Ley Federal de Derechos. Calidad de agua.

Calidad de Agua	Uso	
	Fuente de abastecimiento para uso público	Protección de la vida acuática
Parámetros		
Fósforo Total	0.1	0.05
Nitratos	5	
Nitritos	0.05	
Nitrógeno amoniacal		0.06
Oxígeno disuelto	4	5
pH	6.0-9.0	6.5-8.5
Sólidos Suspendidos Totales	50	

**Tabla 4.** Ley Federal de Derechos. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos.

Parámetros (mg L <sup>-1</sup> )	Uso público urbano	
	Promedio Mensual	Promedio Diario
Sólidos Suspendidos Totales	40	60
Demanda Bioquímica de Oxígeno	30	60

Además, se diseñó un método para dar a conocer de forma más accesible la calidad del agua a la población; este es el **Índice de Calidad de Agua (ICA)**, el cual es un sistema cualitativo



que permite hacer comparaciones de niveles de contaminación. El ICA consideraba 18 parámetros con distinto peso relativo, según su importancia en una evaluación total, sin embargo, hacía una evaluación parcial que no corresponde a la realidad. Con el objeto de mejorar el criterio de evaluación de la calidad de agua se han decidido utilizar tres parámetros indicadores de la misma, que muestran la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos. Estos parámetros son: DBO<sub>5</sub>, la DQO y SST (SEMARNAT, 2007).

La DBO<sub>5</sub> es la cantidad de oxígeno disuelto necesario para oxidar bioquímicamente la materia orgánica de una muestra de agua por cinco días (Déniz, 2010), es decir, es un método que determina la cantidad de materia orgánica biodegradable (SEMARNAT, 2007). La DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar los componentes del agua recurriendo a reacciones químicas (Déniz, 2010), es decir, que mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de estos influye en la disminución del contenido de oxígeno disuelto (SEMARNAT, 2007). Y los SST que son partículas flotantes (residuos vegetales, animales y basura, entre otros) y también aquellas que no son perceptibles a simple vista (como las arcillas y arenas) provienen de las aguas residuales y de la erosión del suelo (SEMARNAT, 2007). Los sólidos suspendidos se componen de un 68% de sólidos orgánicos y de un 32% de sólidos inorgánicos (Seoáñez *et al.*, 2001).

El cumplimiento de las NOMs es un reto principal para mantener una buena calidad de agua, la cual se define como la medida crítica de las propiedades físico-químicas y biológicas de los cuerpos acuáticos en función del uso que se le vaya a dar (García *et al.*, 2009). Una de las principales causas de contaminación en los lagos es el aumento de nutrientes, que induce una variedad de cambios biológicos y químicos en la calidad de agua (Vallentyne, 1974).

Para catalogar las aguas superficiales de acuerdo a su contenido de nutrientes, en 1907, se acuñaron los términos oligotrófico y eutrófico para designar cuerpos acuáticos con baja y

con alta concentración de nutrientes, respectivamente (Margalef, 1983). Es así como una producción de fitoplancton elevada, frecuentemente se asocia con altas concentraciones de fósforo y nitrógeno a través de un proceso denominado eutrofización (Wetzel, 2001).

El proceso de eutrofización de los cuerpos acuáticos se produce de manera natural y paulatina (cientos a miles de años); sin embargo, su aceleración se ve asociada a los vertidos de fuentes antropogénicas de nutrientes que, en corto plazo, decenas de años o menos, la propician (Moreno *et al.*, 2010). Este aumento de biomasa de los productores primarios y secundarios se expresa a través de la reducción de la transparencia y en el color del agua (generalmente verde brillante). También se da una elevada producción de materia orgánica que supera la capacidad de degradación por parte del ecosistema, por lo cual se acumula en los sedimentos, y de esta forma afecta las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) que pueden conducir a condiciones de anoxia (Mazzeo *et al.*, 2002). Con el aumento de la productividad, el gradiente vertical de OD genera valores elevados en la superficie, por la actividad fotosintética del fitoplancton, así como valores cercanos a cero o anoxia en el fondo (cuando los niveles de OD caen por debajo de 5.0 mg/l, la vida acuática corre riesgo) debido a la degradación de la materia orgánica. La hipoxia o anoxia genera gases (p.ej., H<sub>2</sub>S) los cuales proporcionan mal olor al agua (Abarca, 2010).

Al igual que el OD, el pH también se ve afectado por la eutrofización ya que la fotosíntesis intensa basicifica el agua –en aguas con bajas reserva alcalina- cerca de la superficie por el consumo en exceso de CO<sub>2</sub>, lo que obliga a que los productores primarios lo consigan a través de la descomposición de los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$ ); mientras que cerca del fondo la materia orgánica en descomposición libera CO<sub>2</sub> que la acidifica ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ ) al formarse ácido carbónico (Mazzeo *et al.*, 2002).

En cuanto a los nutrientes, el fósforo es un elemento clave que controla la producción primaria en muchos sistemas acuáticos; se encuentra en forma inorgánica como fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>), que es absorbido de forma rápida por las algas (Margalef, 1983). Por otro lado, el

nitrógeno tiene un papel muy importante en los cuerpos acuáticos, ya que es el cuarto elemento más común en las células y también es utilizado por los organismos fotosintetizadores; el nitrógeno se puede encontrar de diferentes formas como el inorgánico que puede existir en estado libre como gas ( $N_2$ ), nitrato ( $NO_3$ ), nitrito ( $NO_2$ ) o amoníaco ( $NH_3$ ), y también como nitrógeno orgánico (Abarca, 2010).

Una variable indicadora que se emplea para evaluar el estado trófico de un lago es la concentración de la clorofila-a (Clor-a), ya que es una aproximación a la estimación de la biomasa del fitoplancton (Chapra, 1997). Las algas, plantas y cianobacterias –todos los organismos autótrofos- contienen este pigmento fotosintético, que constituye entre el 1 y 2% del peso seco de las algas planctónicas (APHA, 2012). El contenido de clorofila de las algas varía dependiendo de la disponibilidad de luz, temperatura y metabolismo (Wetzel y Likens, 2000). Lagos y embalses hipereutróficos pueden tener concentraciones de Clor-a superiores a  $200 \mu g L^{-1}$  (Novotny y Olem, 1994). Uno de los factores de respuesta más importantes de la eutrofización es la acumulación de elevadas concentraciones de biomasa algal (Smith y Bennett, 1999) y con ello, las concentraciones de Clor-a se tornan asimismo muy elevadas en la eutrofización.

La eutrofización en un lago, por lo tanto, no sólo afecta el funcionamiento del ecosistema, sino también puede afectar la calidad del agua para el uso al que se haya establecido (García *et al.*, 2009).

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1 Antecedentes históricos**

El 18 de julio del año 1325 se fundó Tenochtitlan cuando una tribu nómada se asentó en un pequeño islote del lago de Texcoco, donde, según la leyenda, encontró la señal prometida por su Dios Huitzilopochtli “un águila sobre un nopal devorando una serpiente”. Fue así como se estableció la capital del imperio Mexica (Espinoza *et al.*, 2012). El poder y la organización política de esta tribu le permitieron construir un sistema hidráulico complejo para el control de los cuerpos acuáticos asentados en la cuenca de México. Este sistema consistía en la recanalización de ríos, la construcción de diques con compuertas que permitían que el agua fluyera en la ciudad, acueductos, canales para la navegación y el transporte, calzadas que conectaban la isla a las ciudades cercanas y mecanismos –diques- para separar el agua dulce de la salada. Este sistema ayudó a que la ciudad no se inundara y permitió un buen desarrollo de la agricultura (Del Valle, 2011).

Para que la ciudad funcionara adecuadamente se requería la construcción de acueductos, los cuales se realizaban por tres maneras diferentes: en la primera eran acueductos de tierra, bajos y cortos, la segunda eran acueductos hechos de varas y troncos entretejidos con piedras, tierra y césped, y el último sobre taludes hechos de cal y estucados. Los principales acueductos eran el de Chapultepec y el de Acuecuexco (Coyoacán) que abastecían a la ciudad de Tenochtitlan y estaban hechos de la tercera forma (CONAGUA, 2009).

El acueducto de Chapultepec se construyó en 1418. Este transportaría las aguas del manantial de Chapultepec al centro de la ciudad, sin embargo, una inundación destruyó esta construcción en 1449. Posteriormente, fue reconstruido en 1465 e iba de Chapultepec hacia el norte, por la actual calzada Melchor Ocampo, hasta llegar a donde desemboca la calzada Tacuba y continuaba hacia el oriente. Al llegar a la ciudad se hacía subterráneo y se distribuía a toda la población (Peña, 1989).

En 1521, como parte de la estrategia para tomar la ciudad de Tenochtitlan, Hernán Cortés mando a destruir parte del acueducto. Sin embargo, años después ordenó a Cuauhtémoc

reparar y reconstruir la construcción. En 1530 se mandaron a tapiar los manantiales y albercas de Chapultepec para evitar su contaminación (Guzmán, 1989).

En 1650 se construyó otro acueducto desde los manantiales de Chapultepec hasta la fuente conocida como Salto del Agua. Este constaba de 904 arcos y medía más de 3 km de longitud, sin embargo, fue destruido en 1886 (Espinoza *et al.*, 2012).

Mientras tanto, la ciudad sufría de grandes inundaciones. Fue en 1900 cuando Porfirio Díaz inauguró la primera red de drenaje por gravedad, la cual, también incluyó la construcción de una red de alcantarillado, cuyas aguas residuales se arrojaban al Lago de Texcoco. Con esto se logró reducir el problema de las inundaciones (Espinoza *et al.*, 2012).

Durante el periodo colonial y hasta finales del siglo XIX Chapultepec continuaba siendo uno de los principales proveedores de agua para la Ciudad de México (Bolívar, 2013). Sin embargo, el agotamiento de este manantial impulsó a las autoridades a buscar un nuevo abastecimiento para la ciudad, los cuales fueron los manantiales de La Noria, Nativitas, Santa Cruz y San Luis, ubicados todos ellos en Xochimilco (Espinoza *et al.*, 2012).

En el Bosque de Chapultepec se realizaron varias construcciones, entre ellas, el Lago Viejo que fue construido en la primera década del siglo XX, entre 1903 y 1911 (Alcocer *et al.*, 2007). Cuando se construyó, se aprovechó la tierra de la excavación para dejar dos islotes grandes en la parte principal del lago y otros dos en la parte sur (Tovar y Alcántara, 2002). Al principio este lago era abastecido por los manantiales y los afluentes de Chapultepec, pero, cuando éste se terminó, la nueva fuente de abastecimiento fue el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Chapultepec (Alcocer *et al.*, 2007), primera planta de tratamiento creada en 1956 (Jiménez, 2011). El Lago Mayor y Menor de la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec fueron construidos entre 1960 y 1964 (Alcocer *et al.*, 2007).

### 3.2 Antecedentes generales

Los Lagos de Chapultepec han sido objeto de estudio por diferentes investigadores, debido a su gran importancia como lagos urbanos dentro de la ciudad de México, siendo estos los más concurridos por la población como lugar de recreación.

En *“Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del lago Viejo de Chapultepec”* realizado por Alcocer (1988), se pretendió restaurar el Lago Viejo de los efectos negativos de la eutrofización, para lo que se realizó un dragado.

Cruz y Martínez (1999) en *“Respuesta fotosíntesis-irradiación del nanoplancton de dos ecosistemas urbanos”* evaluaron las características fisicoquímicas, también del Lago Viejo.

En *“La macrofauna béntica y su relación con la dinámica físico-química de los lagos de Chapultepec (época de lluvias), Bosque de Chapultepec, México”* estudio realizado por Guzmán (1989) se estimaron los parámetros físico-químicos para evaluar la calidad de agua de los lagos.

Otros trabajos son los de Flores (1991) con *“Contribución al conocimiento de la ictiofauna de los tres lagos de Chapultepec México D.F.”*, Muro (1994) con *“Contribución al conocimiento de la distribución y abundancia de los cladóceros en los tres lagos de Chapultepec”* y Gonzáles (1995) con *“Estudio de la variación espacial y temporal de los ciliados planctónicos de los lagos de Chapultepec, D.F.”*, todos ellos evaluaron parámetros biológicos y físico-químicos.

Todos los trabajos mencionados concuerdan que los tres lagos de Chapultepec tiene altos niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo), baja transparencia, pH elevado debido a la alta actividad fotosintética y una alta concentración de SST.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

Los tres lagos del Bosque de Chapultepec son cuerpos de agua urbanos que presentan problemas de eutrofización como consecuencia de estar alimentados por aguas tratadas secundariamente, así como por recibir descargas de aguas residuales irregulares de los negocios que se encuentran en la periferia. A pesar de la problemática evidente que presentan estos lagos no se ha llevado a cabo un estudio que permita analizar su situación ni cómo ha evolucionado ésta en el tiempo. Con base en lo anterior, es necesario evaluar las distintas variables físicas, químicas y biológicas de calidad de agua considerando que los cuerpos acuáticos deben cumplir con los lineamientos establecidos en la Norma Mexicana de Calidad del Agua para uso de contacto directo/recreativo y para la preservación de la biota acuática.

#### **5. OBJETIVOS**

Caracterizar físico-químicamente las aguas de los tres Lagos del Bosque de Chapultepec con el fin de reconocer su calidad así como su dinámica temporal.

Para cumplir con este objetivo general se plantearon las siguientes metas cubriendo un ciclo anual:

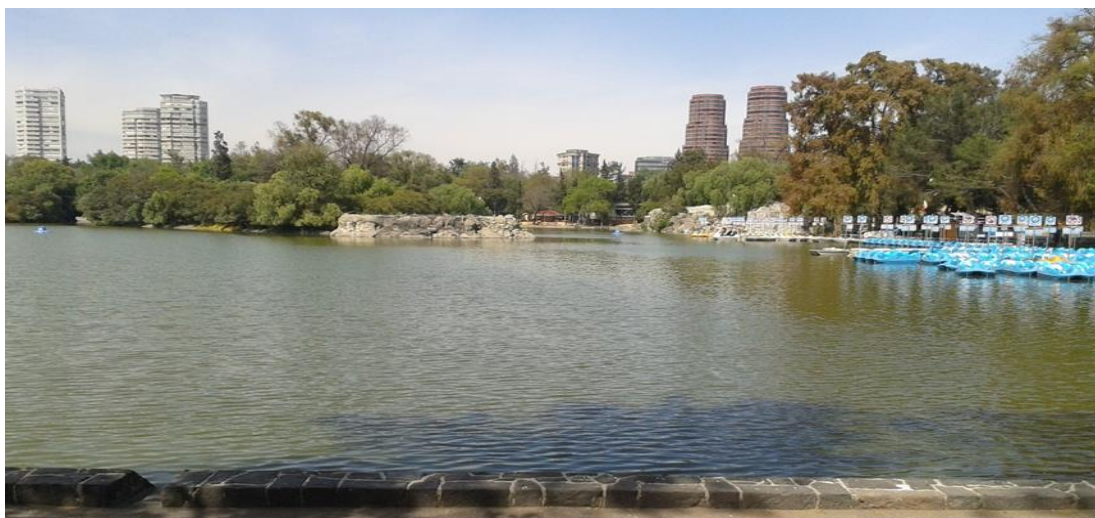
- Medir la temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, pH y conductividad en los tres Lagos del Bosque de Chapultepec.
- Estimar la concentración de nutrientes (fósforo total, fósforo soluble reactivo, nitrógeno total, nitratos, nitritos, amoníaco y nitrógeno inorgánico disuelto), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y los Sólidos Suspendedos Totales, en los tres Lagos del Bosque de Chapultepec.
- Comparar los valores de los parámetros evaluados en los lagos con los enunciados en las NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, la Ley Federal de Derechos y el Acuerdo CE-CCA-001/89, considerando el uso destinado de los Lagos de Chapultepec.

## 6. ÁREA DE ESTUDIO

En la Ciudad de México, al oeste-suroeste en la Delegación Miguel Hidalgo, se encuentra el Bosque de Chapultepec, entre los 19° 24' y 19° 26' de latitud Norte y los 99° 11' y 99° 12' de longitud Oeste, con un área de 6.7 Km<sup>2</sup>. Dentro de éste se encuentran tres lagos: el Lago Viejo, el Lago Mayor y Lago Menor (Alcocer *et al.*, 2007).

El Lago Viejo (Fig. 1) se encuentra en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec, abarca una superficie total de 60,240 m<sup>2</sup>, donde 12,240 m<sup>2</sup> corresponden a la superficie de sus islas. Tiene un perímetro de 1,883 m y su cuenca contiene 49,525 m<sup>3</sup> de agua, con una profundidad media de 1.0 m y una máxima de 1.8 m. Su ancho máximo que va de este-oeste es de 208 m y su longitud máxima en norte-sur es de 438 m (Alcocer, 1988).

Algunos lo consideran como dos lagos (Lago Mayor y Lago Menor de la 1ª Sección) debido a que está cruzado por la avenida Colegio Militar, la cual es una de las más visitadas (Alcocer *et al.*, 2007). El Lago Viejo tiene una alimentación de tres fuentes: el Río Hondo, el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Chapultepec y descargas de agua cruda (aguas negras sin tratar) que vienen de los locales comerciales ubicados en la periferia del lago (Alcocer, 1988).



**Figura 1.** Lago Viejo de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México.



Los Lagos Mayor y Menor se ubican en la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec. El Lago Mayor (Fig. 2) cuenta con un área total de 58,200 m<sup>2</sup>, tiene un perímetro de 1,858 m y su cuenca contiene 59,709 m<sup>3</sup> de agua con una profundidad media de 1.1 m y una profundidad máxima de 1.3 m, mientras que el Lago Menor (Fig. 3) tiene un área total de 27,600 m<sup>2</sup>, cuenta con un perímetro de 1,082 m, su cuenca contiene 26,573 m<sup>3</sup>, con una profundidad media de 1.1 m y una profundidad máxima de 1.2 m (Alcocer, 1988).



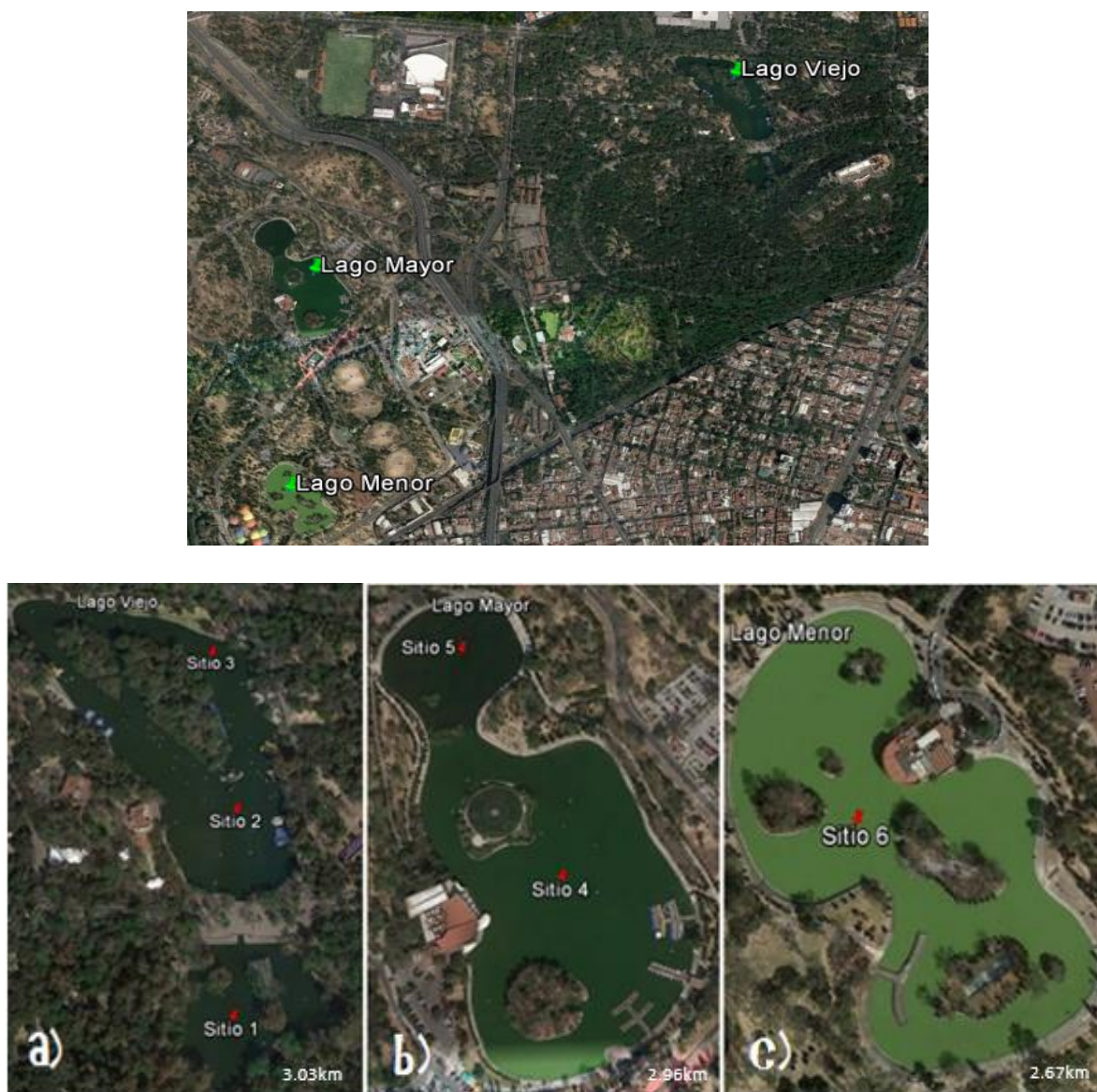
**Figura 2.** Lago Mayor de la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México.



**Figura 3.** Lago Menor de la 2ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México.

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron muestreos mensuales en los tres lagos del Bosque de Chapultepec durante un periodo anual, desde abril del 2015 hasta marzo del 2016. En total se ubicaron 6 estaciones de muestreo, de las cuales 3 se encuentran en el Lago Viejo (2 en la sección grande y 1 en la sección pequeña), 2 en el Lago Mayor y 1 en el Lago Menor (Fig. 4).

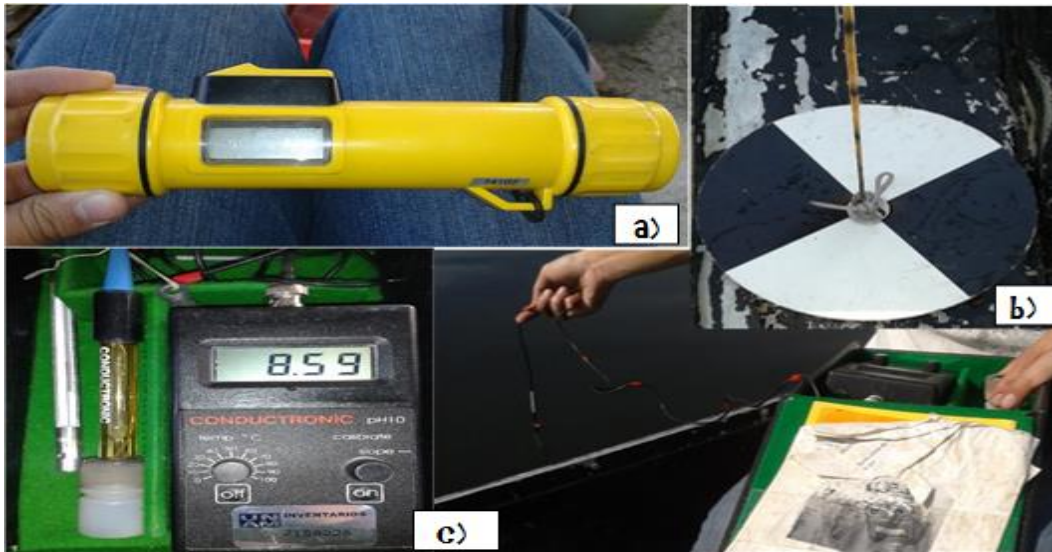


**Figura 4.** Ubicación general de los Lagos de Chapultepec, Ciudad de México. a) Lago Viejo, b) Lago Mayor y c) Lago Menor (Tomado de Google Earth).

## 7.1 Trabajo de Campo

En cada estación se midió la profundidad, para lo cual se utilizó un ecosonda manual con precisión de 0.2 m y exactitud de 0.1 m (Fig. 5a). Para medir la transparencia del agua se utilizó un disco de Secchi (Fig. 5b). Para la obtención del pH se utilizó un potenciómetro portátil marca Conductronic modelo PH10 con precisión de  $\pm 0.01$  y exactitud de  $\pm 1.0\%$  (Fig. 5c). Se utilizó una sonda multiparamétrica marca YSI (Yellow Spring Instruments, Ohio, E.U.) (Fig 5d) para obtener el oxígeno disuelto (OD) con precisión de 0.1 mg/L y exactitud de 0.3 mg/L, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat OD), temperatura ( $T^\circ$ ) con precisión y exactitud de  $0.1\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1\text{ C}$  y conductividad eléctrica estandarizada a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  ( $K_{25}$ ) con precisión de  $0.1\text{ }\mu\text{S/cm}$  y exactitud de  $\pm 0.5\%$ . Todas las mediciones se realizaron cada 20 cm de profundidad.

Para el análisis de los nutrientes,  $\text{DBO}_5$ , DQO, SST y clorofila-a se tomaron muestras de agua mediante un tubo muestreador, el cual se utilizó varias veces hasta llenar 5L (Fig. 6), éste se coloca de forma vertical en el agua y se jala su extremo, para obtener una muestra que integre la columna de agua. Las muestras fueron mantenidas a  $4^\circ\text{C}$  y oscuridad para su análisis posterior en el laboratorio del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical en la FES Iztacala.



**Figura 5.** Instrumentos utilizados en los muestreos: a) Ecosonda portátil, b) Disco de Secchi, c) Potenciómetro portátil.



**Figura 6.** Tubo muestreador utilizado para obtención de muestras integradas de agua del lago.

## 7.2 Nutrientes

### 7.2.1 Trabajo de Laboratorio

Para la determinación de nitrógeno y fósforo total se realizó una digestión química de la materia orgánica presente utilizando persulfato de potasio en condiciones básicas (5 mL por cada 50 mL de muestra). Muestras de 100 mL fueron introducidas en una autoclave durante 45 minutos a 115°C para completar la digestión (Valderrama, 1981). Una vez enfriadas las muestras se procedió al análisis de los nutrientes. El nitrógeno se determinó en forma de  $\text{N-NO}_3$  y el fósforo en forma de  $\text{P-PO}_4$ , ambos en  $\text{mg L}^{-1}$ , con los métodos espectrofotométricos de reducción con cadmio (Nitruver 5) y del ácido ascórbico (Phosver 5) utilizando un laboratorio portátil de calidad de agua marca HACH modelo DREL/2000 (HACH, 1993) con un precisión de  $\pm 1.5 \text{ mg L}^{-1}$  y + 14% y exactitud de  $\pm 1.5 \text{ mg L}^{-1}$  y + 14%.

Otro volumen de 500 mL de cada muestra fue filtrado a través de un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/F (0.7  $\mu\text{m}$  de apertura nominal de poro). Esto fue usado para la determinación de la concentración de fósforo reactivo soluble (PRS) y de nitrógeno en forma de amoníaco ( $\text{N-NH}_3$ ), nitritos ( $\text{N-NO}_2$ ) y nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) mediante los métodos descritos en el manual del laboratorio portátil de calidad del agua HACH DREL/2000 (HACH, 1993). La precisión y

exactitud fueron de  $\pm 0.02 \text{ mg L}^{-1}$  y  $-5.0\%$  para PRS,  $\pm 0.02 \text{ mg L}^{-1}$  y  $-7.3\%$  para N-NH<sub>3</sub>,  $\pm 0.002 \text{ mg L}^{-1}$  y  $+8.0\%$  para N-NO<sub>2</sub> y  $\pm 1.1 \text{ mg L}^{-1}$  y  $+10\%$  para N-NO<sub>3</sub>.

Se calculó el nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y el nitrógeno orgánico (N<sub>ORG</sub>), donde el NID es la suma de N-NO<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub> y N-NH<sub>3</sub> y el N<sub>ORG</sub> es la diferencia del N total y el NID.

### 7.3 DQO

#### 7.3.1 Trabajo de laboratorio:

Se colocaron 50 mL de la muestra en un matraz de reflujo de 500 mL, a éste se le agregó 1 g de sulfato mercúrico, 5 mL de reactivo de ácido sulfúrico y 25 mL de la solución de dicromato de potasio; se mezcló. Se colocó el matraz en un condensador y se puso a funcionar sin calentar, mientras se le agregaba lentamente 70 mL de reactivo de ácido por la parte superior abierta del condensador, se agitó. Posteriormente, se le aplicó calor y se puso a reflujo por 2 horas, se cubrió la entrada superior del condensador con un vaso para evitar la entrada de material extraño, al terminar se dejó enfriar. Por último, se diluyó el volumen al doble con agua destilada y se le añadieron de 10 a 12 gotas de indicador de ferroin para realizar una titulación con sulfato ferroso amoniacal. Al mismo tiempo se realizó lo mismo con un testigo de agua destilada.

Para obtener el DQO se calculó con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de DQO} = \frac{(a - b)(M)(8000)}{\text{mL de muestra}}$$

Donde, **a** son los mL de sulfato ferroso amoniacal usado en el testigo, **b** son los mL de sulfato ferroso amoniacal usados en la muestra y **M** es la molaridad del sulfato ferroso amoniacal.

## 7.4 DBO<sub>5</sub>

### 7.4.1 Trabajo de laboratorio

Primero se neutralizaron las muestras a un pH entre 6.5 y 7.5. Se colocó el mismo volumen de muestra en 2 frascos de DBO; posteriormente, se llenaron los frascos con agua de dilución cuidando de no producir burbujas de aire y se taparon. Uno de los frascos (A) fue llevado a incubar durante 5 días a 20°C en obscuridad. Al otro frasco (B) se le adicionó 1 mL de sulfato manganoso y 1 mL de álcali-ioduro-azida, se tapó y se agitó bien. Se dejó sedimentar el precipitado y también se le adicionó 1 mL de ácido sulfúrico para agitar nuevamente. Posteriormente, se realizó una titulación con tiosulfato de sodio. La cantidad de OD se calculó con la siguiente fórmula:

$$\frac{mg}{L} \text{ de OD} = \frac{(mL \text{ gastados de tiosulfato})(N)(8000)}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde N es la normalidad del tiosulfato de sodio.

Finalmente, al frasco A se le realizó el mismo procedimiento después de los 5 días de incubación. Y se utilizó la siguiente fórmula para calcular el DBO<sub>5</sub>:

$$\frac{mg}{L} \text{ de DBO}_5 = \frac{\left(\frac{mg}{L} OD_A\right) - \left(\frac{mg}{L} OD_B\right)}{\% \text{ de la dilución expresado en decimales}}$$

## 7.5 Sólidos Suspendidos Totales

### 7.5.1 Trabajo de laboratorio

Primero se prepararon los crisoles de Gooch. Para esto se colocó un filtro de fibra de vidrio GF/F (apertura de poro nominal de 0.7 µm) dentro de cada crisol, se humedeció el filtro con agua para asegurar que se adhiriera al fondo. Luego se calentaron los crisoles en horno de 103 a 105 °C por una hora y se dejaron enfriar (esto se realiza hasta obtener un peso constante *P1* o hasta que la diferencia de peso fuese menor al 4% del peso anterior). Después, se filtraron las muestras y se volvieron a colocar los crisoles en el horno a 105°C

por una hora, se dejaron enfriar y pesar (P2). Finalmente, se utilizó la siguiente fórmula para obtener los resultados:

$$\frac{mg}{L} \text{ de Sólidos suspendidos} = \frac{(P2 \text{ en mg} - P1 \text{ en mg})(1000)}{mL \text{ de muestra}}$$

## 7.6. Clorofila-a (Clor-a)

### 7.6.1 Trabajo de laboratorio

Volúmenes conocidos de muestras se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio GF/F (apertura de poro nominal de 0.7  $\mu\text{m}$ ). Los filtros fueron macerados con ayuda de un macerador de tejidos con punta de teflón con acetona al 90%. Para la extracción de la Clor-a, cada filtro se dejó en reposo durante un periodo de 20 h aproximadamente, en obscuridad y refrigeración. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas (por 3000 rpm durante 15 min) para obtener un sobrenadante y leer las muestras en un fluorómetro digital Turner Design 10-AU (método EPA 445.0, Arar y Collins, 1997).

Finalmente, las lecturas obtenidas se convirtieron a  $\mu\text{g}$  de Clor-a por litro con la siguiente fórmula:

$$\frac{\mu\text{g}}{L} \text{ Clorofila } a = \frac{(\text{Ce. Ve. FD})}{(\text{Vm})}$$

Donde,  $\mathbf{C_e}$  es la concentración de Clor-a ( $\mu\text{g/L}$ ) obtenida de la solución extractora,  $\mathbf{V_e}$  es el volumen (L) utilizado para la extracción,  $\mathbf{FD}$  es el factor de dilución y  $\mathbf{Vm}$  corresponde al volumen (L) de la muestra de agua.

## 7.7 Índice de estado trófico (IET)

Se calculó el Índice de estado trófico propuesto por Carlson (1977), el cual utiliza los valores de profundidad del Disco de Secchi ( $Z_{DS}$ ) y las concentraciones de fósforo total (PT) y Clor-

a. El IET varía de 0 (oligotrófico) a 100 (hipereutrófico). La Tabla 4 presenta los valores de  $Z_{DS}$ , PT y Clor-a de acuerdo al IET correspondiente (Moreno *et al.*, 2010).

**Tabla 5.** Índice de Estado trófico - IET- (Moreno *et al.*, 2010). ( $Z_{DS}$  = profundidad del disco de Secchi).

IET	$Z_{DS}$ (m)	Fósforo total (mg/m <sup>3</sup> )	Clorofila a (mg/m <sup>3</sup> )	Estado
0	64	0.75	0.04	Oligotrófico
10	32	1.5	0.12	
20	16	3	0.34	
30	8	6	0.94	
40	4	12	2.6	Mesotrófico
50	2	24	6.4	
60	1	48	20	
70	0.50	96	56	Eutrófico
80	0.25	192	154	
90	0.12	384	427	
100	0.06	768	1183	Hipereutrófico

El IET también se puede calcular de manera independiente para cada variable mediante las siguientes fórmulas:

**a) Índice de estado trófico del Disco de Secchi=  $IET_{Z_{DS}}$**

$$IET_{Z_{DS}} = 60 - 14.41\ln(Z_{DS})$$

Dónde:  $Z_{DS}$  está en m

**b) Índice de estado trófico del fósforo total=  $IET_{Pt}$**

$$IET_{Pt} = 14.42\ln(Pt) + 4.15$$

Dónde:  $Pt$  está en mg/m<sup>3</sup>



c) Índice de estado trófico de clorofila=  $IET_{Clor-a}$

$$IET_{Clor-a} = 9.81 \ln(Clor-a) + 30.6$$

Dónde: **Clor-a** esta en  $mg/m^3$

## 7.8 Calidad de Agua

Como referentes de calidad de agua se utilizaron los criterios mencionados en la NOM-001-SEMARNAT-1996, la NOM-003-SEMARNAT-1997, la LFD y el Acuerdo CE-CCA-001/89.

También se utilizaron los indicadores de calidad de agua proporcionados por la CONAGUA (2003), que se presentan en las Tablas 5, 6 y 7.

**Tabla 6.** Valores indicadores de Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ) en agua superficial (CONAGUA, 2003).

<b>Criterio (mg/l)</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Color</b>
$DBO_5 \leq 3$	<b>Excelente:</b> no contaminada	Azul
$3 < DBO_5 \leq 6$	<b>Buena calidad:</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.	Verde
$6 < DBO_5 \leq 30$	<b>Aceptable:</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	Amarillo
$30 < DBO_5 \leq 120$	<b>Contaminada:</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	Naranja
$DBO_5 > 120$	<b>Fuertemente contaminada:</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	Rojo

**Tabla 7.** Valores indicadores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua superficial (CONAGUA, 2003).

<b>Criterio (mg/l)</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Color</b>
DQO ≤ 10	<b>Excelente:</b> No contaminada	Azul
10 < DQO ≤ 20	<b>Buena calidad:</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.	Verde
20 < DQO ≤ 40	<b>Aceptable:</b> con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	Amarillo
40 < DQO ≤ 200	<b>Contaminada:</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	Naranja
DQO > 200	<b>Fuertemente contaminada:</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	Rojo

**Tabla 8.** Valores indicadores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en agua superficial (CONAGUA, 2003).

<b>Criterio (mg/l)</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Color</b>
SST ≤ 25	<b>Excelente:</b> clase de excepción, muy buena calidad.	Azul
25 < SST ≤ 75	<b>Buena calidad:</b> Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.	Verde
75 < SST ≤ 150	<b>Aceptable:</b> aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.	Amarillo
150 < SST ≤ 400	<b>Contaminada:</b> Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Aguas con alto contenido de material suspendido.	Naranja
SST > 400	<b>Fuertemente contaminada:</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.	Rojo

## 7. 9 Análisis estadístico

Las bases de datos con todas las variables físico-químicas fueron capturadas en el programa Microsoft Office Excel (2016). Se realizó un análisis de varianza para saber si existían diferencias entre los sitios de muestreo de cada variable ( $T^{\circ}$ , OD, % de saturación de OD, pH,  $K_{25}$ , P-Total, PRS, N-Total, N- $\text{NO}_3$ , N- $\text{NO}_2$ , N- $\text{NH}_3$  y NID) con un nivel de confianza de 95%. Para este análisis se consideraron dos hipótesis: Hipótesis Nula (entre los sitios no existen diferencias significativas) e Hipótesis Alternativa ( $:$  al menos uno de los sitios tiene diferencias significativas). En los casos donde se aceptó la hipótesis alternativa, se realizó un análisis de Tukey, para especificar las diferencias significativas entre los sitios para cada variable. Ambos se realizaron con el programa Microsoft Office Excel (2016).

## 8. Resultados

### 8.1 Parámetros físico-químicos

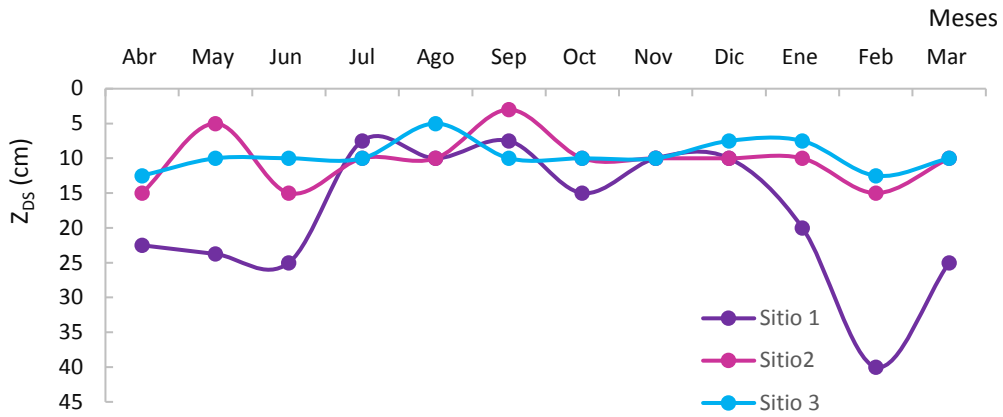
Los parámetros medidos *in situ* (T°, OD, %Sat OD, pH y K<sub>25</sub>) se presentan en la Tabla 8. Se muestran los valores promedio de toda la columna de agua por cada parámetro en todo el año.

**Tabla 9.** Valores de T°, OD, %SAT OD, pH y K<sub>25</sub> registrados en los tres lagos de Chapultepec. Para cada sitio de muestreo se presentan valor mínimo y máximo en la primera fila y promedio y desviación estándar en la segunda fila.

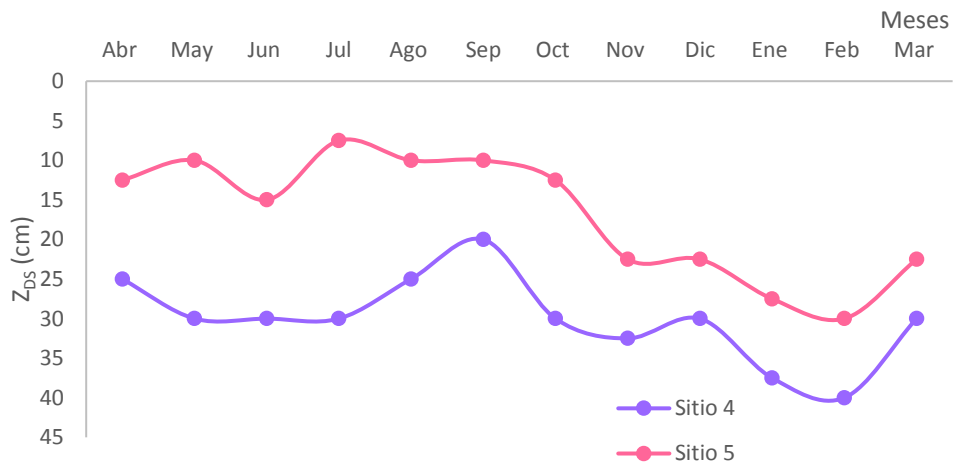
Lago	Sitio	T (°C)	OD (mg L <sup>-1</sup> )	SAT OD (%)	pH	K <sub>25</sub> (μS cm <sup>-1</sup> )
Lago Viejo	1	12.0 - 25.8	1.0 - 22.9	14 - 292	7.35 - 10.9	381 - 614
		18.2 ± 2.7	10.5 ± 4.7	139 ± 62	8.92 ± 0.55	477.6 ± 51.6
	2	12.9 - 22.5	0.5 - 19.4	7 - 259	8.26 - 10.26	356 - 544
18.9 ± 2.4		10.1 ± 3.6	136 ± 50	9.45 ± 0.44	437.3 ± 45.4	
3	3	12.8 - 22.4	1.1 - 15.4	16 - 228	8.78 - 10.45	335 - 520
		18.9 ± 2.6	9.2 ± 2.7	124 ± 39	9.54 ± 0.38	430.0 ± 46.7
Lago Mayor	4	15.6 - 25.2	1.2 - 25.6	18 - 311	7.23 - 11.01	418 - 590
		21.4 ± 2.4	12.5 ± 5.1	177 ± 72	8.68 ± 0.77	509.1 ± 51.6
5	5	14.2 - 25.7	1.0 - 24.7	15 - 313	7.61 - 10.66	391 - 599
		20.8 ± 2.9	14.4 ± 5.4	196 ± 74	9.59 ± 0.66	504.6 ± 49.3
Lago Menor	6	11.7 - 26.7	1.2 - 21.9	16 - 300	7.89 - 11.00	329.7 - 669.0
		18.8 ± 4.0	11.0 ± 5.4	140 ± 85	9.76 ± 0.67	487.9 ± 66.4

#### 8.1.1 Transparencia del Disco Secchi

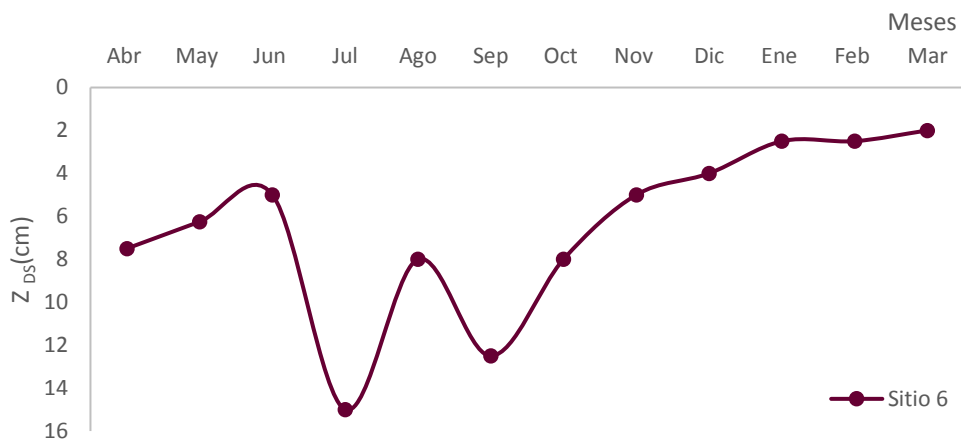
Todos los lagos presentaron una baja transparencia. En el lago Viejo (Fig. 7) la transparencia varió entre 3 cm (septiembre) y 40 cm (febrero). En el lago Mayor (Fig. 8) los valores fluctuaron entre 7 cm (julio) y 40 cm (febrero). Y en el lago Menor (Fig. 9) se encontraron valores entre 2 cm (marzo) y 15 cm (julio).



**Fig. 7.** Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Viejo.



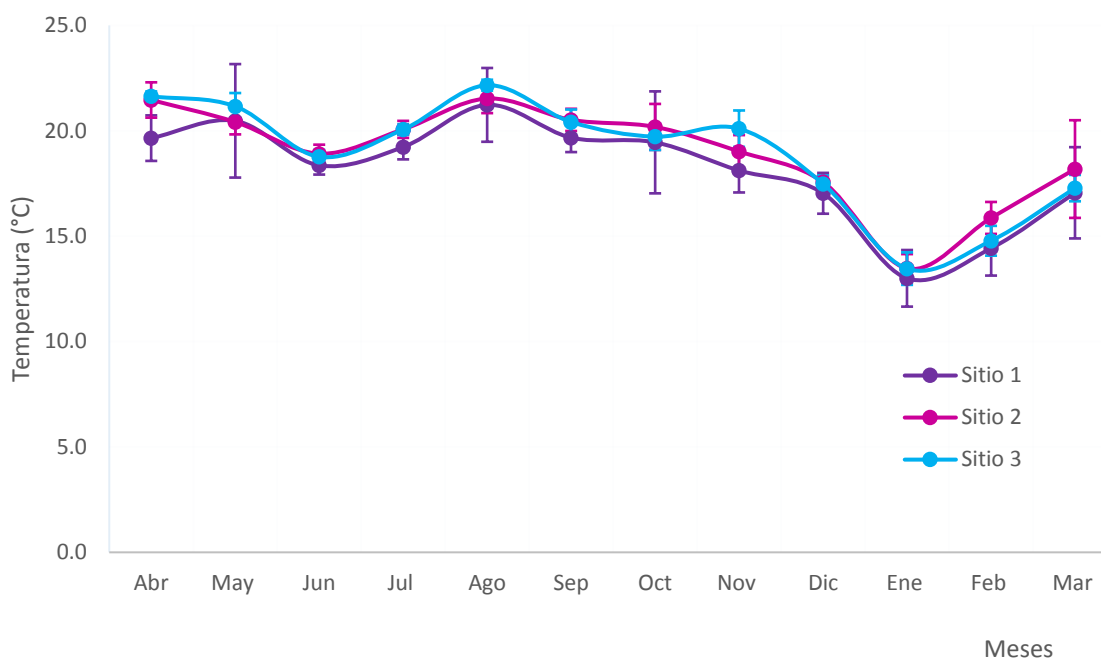
**Fig. 8.** Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Mayor.



**Fig. 9.** Variación anual de la profundidad del disco Secchi en el Lago Menor.

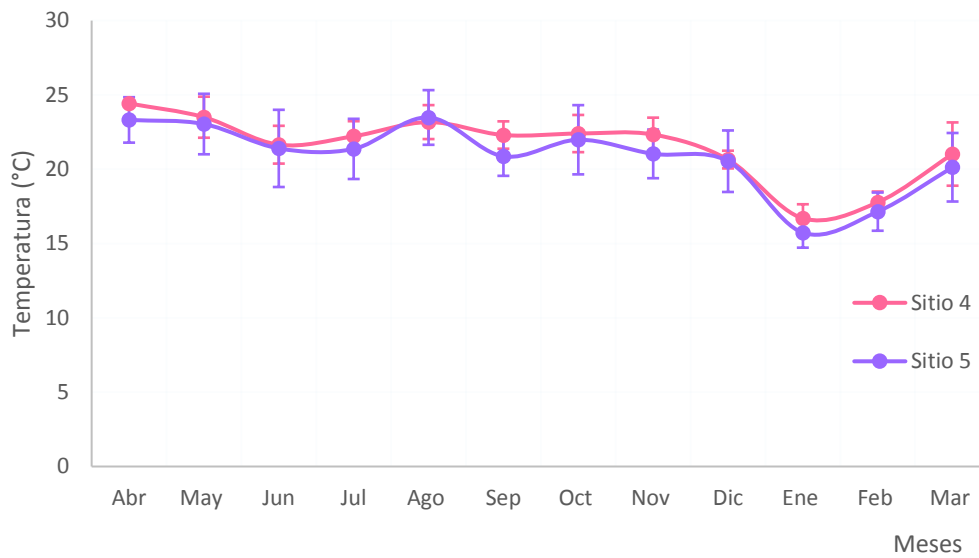
### 8.1.2 Temperatura

La temperatura del Lago Viejo varía entre 12.0 y 25.8 °C. Los valores promedios mínimos se presentaron en el mes de enero con  $13 \pm 1.3$  °C en el sitio 1, en el sitio 2 con  $13.5 \pm 0.7$  °C y en el sitio 3 con  $13.5 \pm 0.8$  °C, mientras que los valores promedio máximos se presentaron en el mes de agosto con valores en el sitio 1 de  $21.2 \pm 1.8$  °C, el sitio 2 con  $21.5 \pm 0.7$  °C y el sitio 3 con  $22.2 \pm 0.3$  °C (Fig. 10).



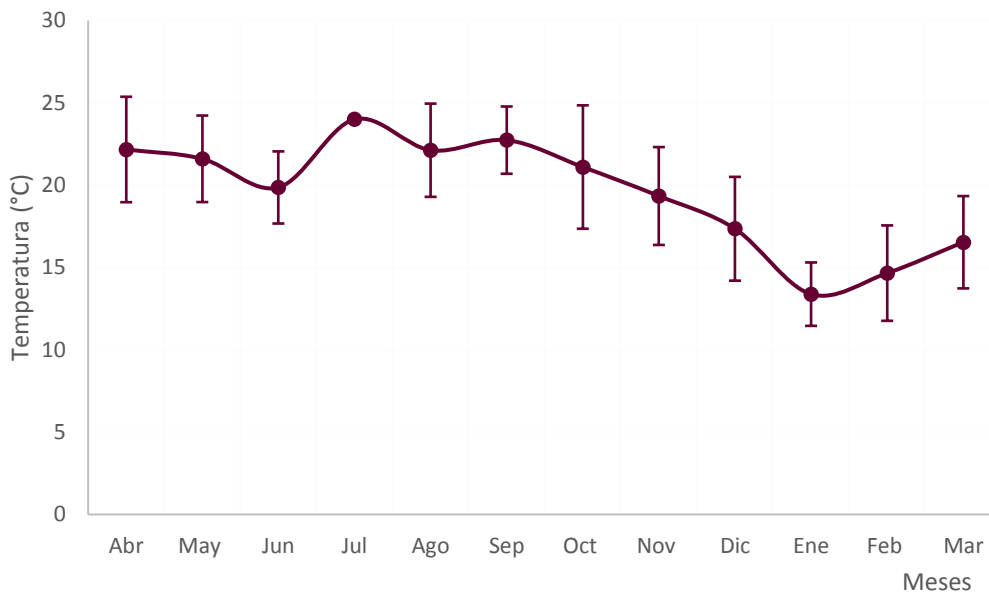
**Fig. 10.** Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor la temperatura presentó valores entre 14.2 y 25.7 °C. El valor promedio mínimo se presentó en el mes de enero para ambos sitios, con  $16.7 \pm 0.9$  °C para el sitio 4 y el sitio 5 con  $15.7 \pm 1$  °C, mientras que El valor promedio máximo se presentó en el mes de abril para el sitio 4 con  $24.5 \pm 0.1$  °C y en el mes de agosto para el sitio 5 con  $23.5 \pm 1.8$  °C (Fig. 11).



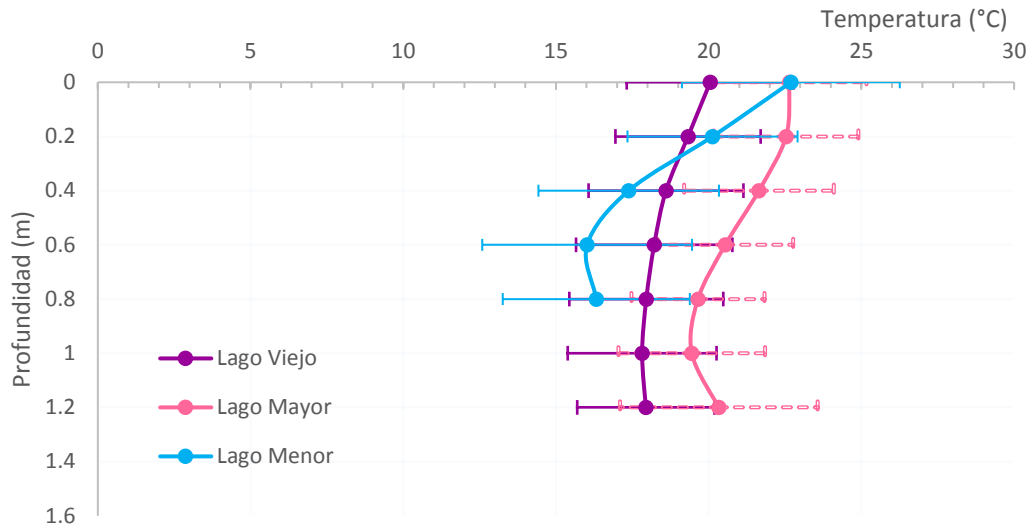
**Fig. 11.** Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Mayor.

El Lago Menor presentó valores entre 11.7 y 26.7 °C. El valor promedio mínimo se presentó en el mes de enero con  $13.38 \pm 1.9$  °C y el valor promedio máximo en el mes de julio con  $24.0 \pm 0$  °C (Fig. 12).



**Fig. 12.** Variación promedio anual de la temperatura en el Lago Menor.

El Lago Viejo presentó valores entre  $17.9 \pm 2.2$  y  $20.1 \pm 2.7^\circ\text{C}$ , el Lago Mayor valores entre  $20.3 \pm 3.2$  y  $22.7 \pm 2.5^\circ\text{C}$  y para el Lago Menor presentó valores entre  $16.3 \pm 3.1$  y  $22.7 \pm 3.6^\circ\text{C}$ , como mínimos y máximos, correspondientemente (Fig. 13).

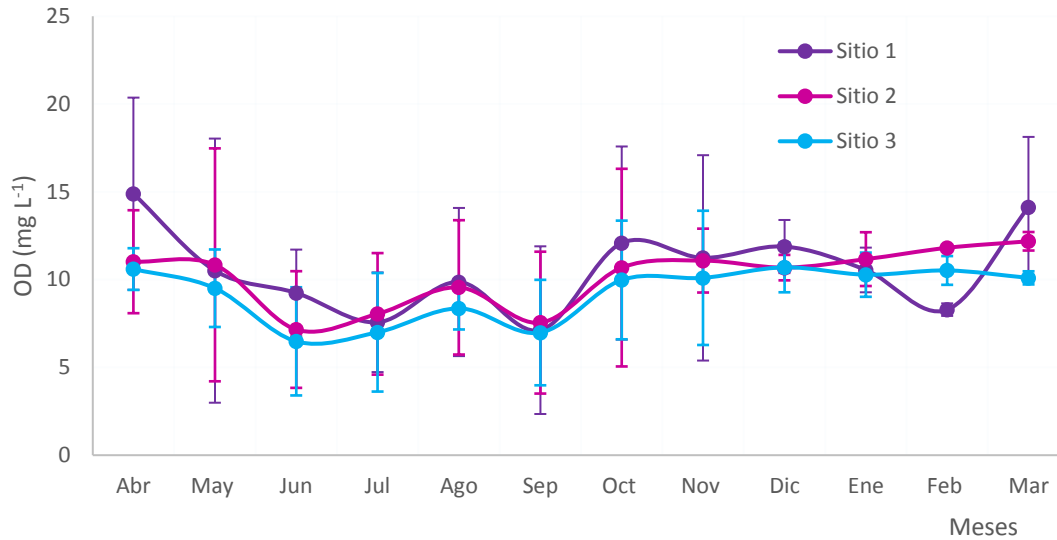


**Fig. 13.** Temperatura promedio en profundidad en los tres lagos.

### 8.1.5 Oxígeno disuelto (OD)

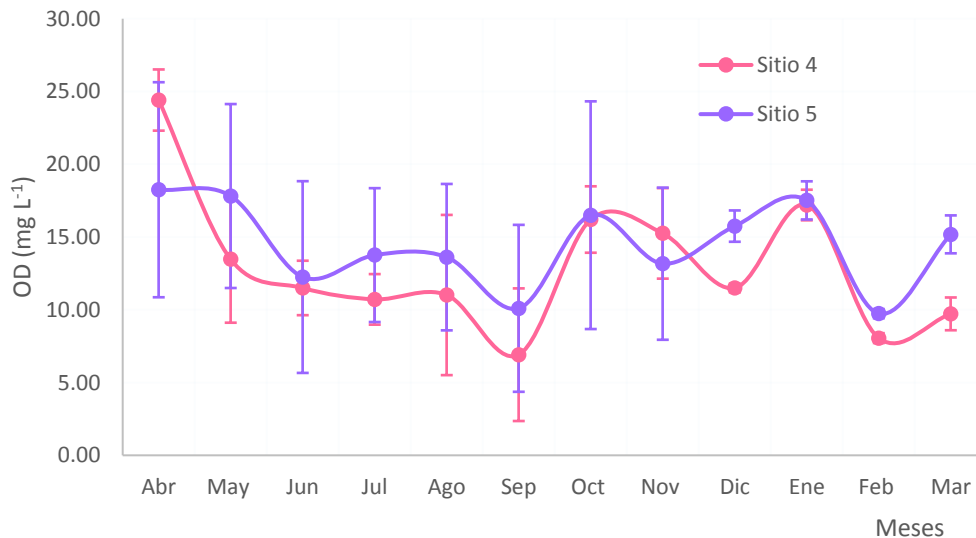
El OD del Lago Viejo varía entre 0.5 y  $22.9 \text{ mg L}^{-1}$ . Los valores promedio mínimos se presentaron en el mes de septiembre para el sitio 1 con  $7.1 \pm 4.7 \text{ mg L}^{-1}$ , y para el sitio 2 y 3 en el mes de junio con  $7.1 \pm 3.3$  y  $6.4 \pm 3 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. Los valores promedio máximos se presentaron en el mes de abril para el sitio 1 con  $14.8 \pm 5.4 \text{ mg L}^{-1}$ , para el sitio 2 en marzo con  $12.2 \pm 0.5 \text{ mg L}^{-1}$  y para el sitio 3 en diciembre con  $10.7 \pm 1.4 \text{ mg L}^{-1}$  (Fig. 14).





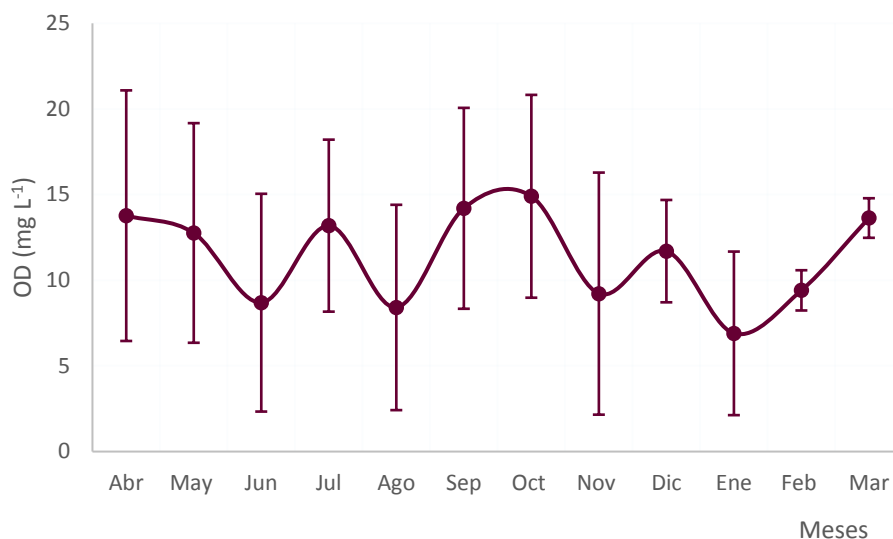
**Fig. 14.** Variación promedio anual del OD en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor las concentraciones de OD variaron entre 1.0 y 25.6 mg L<sup>-1</sup>. Los valores promedio mínimos fueron en el mes de septiembre para el sitio 4 con  $9.7 \pm 0.3$  mg L<sup>-1</sup> y en el mes de enero para el sitio 5 con  $6.9 \pm 4.7$  mg L<sup>-1</sup>. Los valores promedio máximos se presentaron en el mes de abril en ambos sitios con  $24.4 \pm 2.1$  mg L<sup>-1</sup> para el sitio 4 y  $18.2 \pm 7.3$  mg L<sup>-1</sup> para el sitio 5 (Fig. 15).



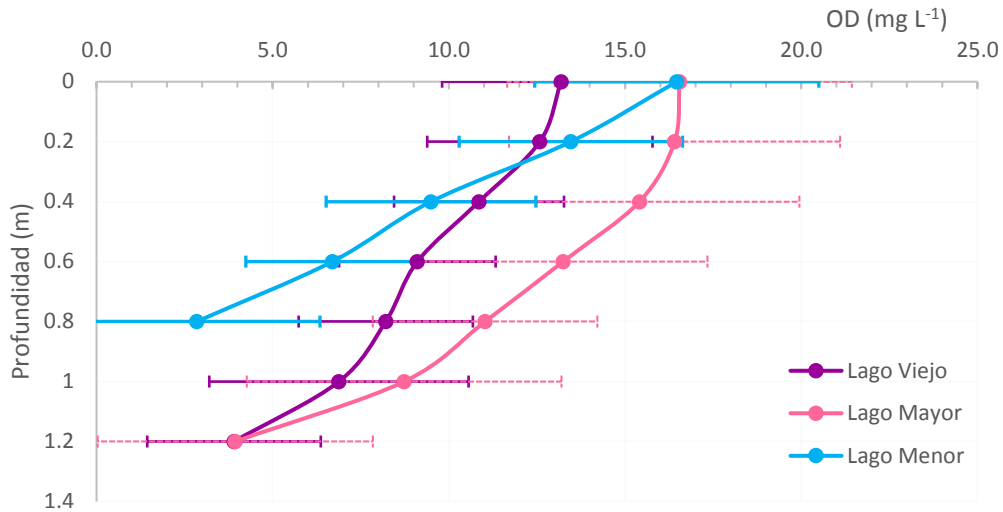
**Fig. 15.** Variación promedio anual del OD en el Lago Mayor.

Para el Lago Menor se presentaron valores entre 1.2 y 21.9 mg L<sup>-1</sup>. El valor promedio mínimo se presentó en el mes de enero con 6.9 ± 4.7 mg L<sup>-1</sup> y el valor promedio máximo se presentó en el mes de octubre con 14.9 ± 5.9 mg L<sup>-1</sup> (Fig. 16).



**Fig. 16.** Variación promedio anual del OD en el Lago Menor.

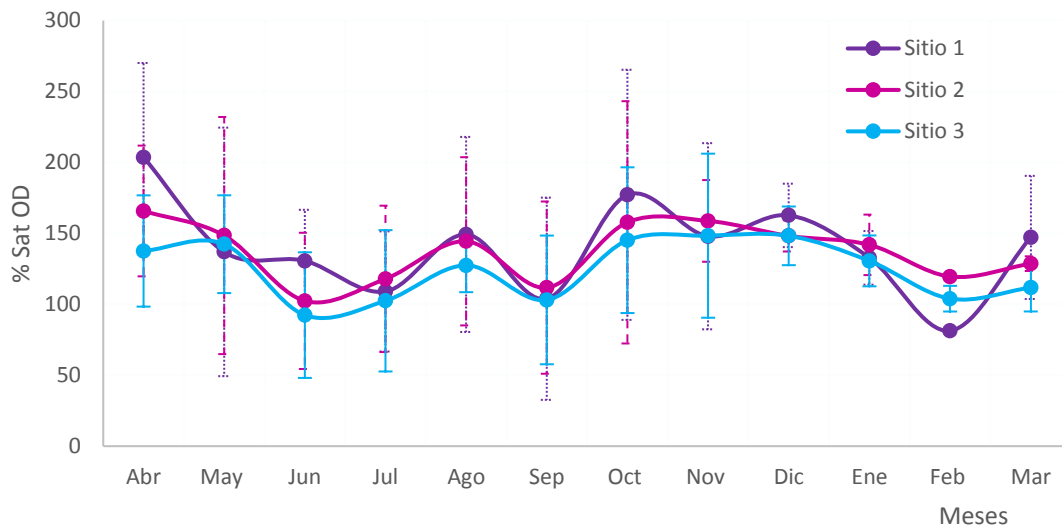
El lago Viejo y el lago Mayor muestran un comportamiento similar del OD en la columna de agua a diferencia del lago Menor. Las mayores concentraciones de OD en el lago Viejo fueron de 13.2 ± 3.4 mg L<sup>-1</sup> y en el lago Mayor fueron de 16.6 ± 4.9 mg L<sup>-1</sup> y registraron 3.9 ± 2.5 y 3.5 ± 3.4 mg L<sup>-1</sup> como concentración mínima, respectivamente. En el Lago Menor se registró un mínimo de 2.8 ± 3.5 mg L<sup>-1</sup> y un máximo de 16.5 ± 4.0 mg L<sup>-1</sup> en profundidad y superficie, respectivamente (Fig. 17).



**Fig. 17.** OD promedio en profundidad en los tres lagos.

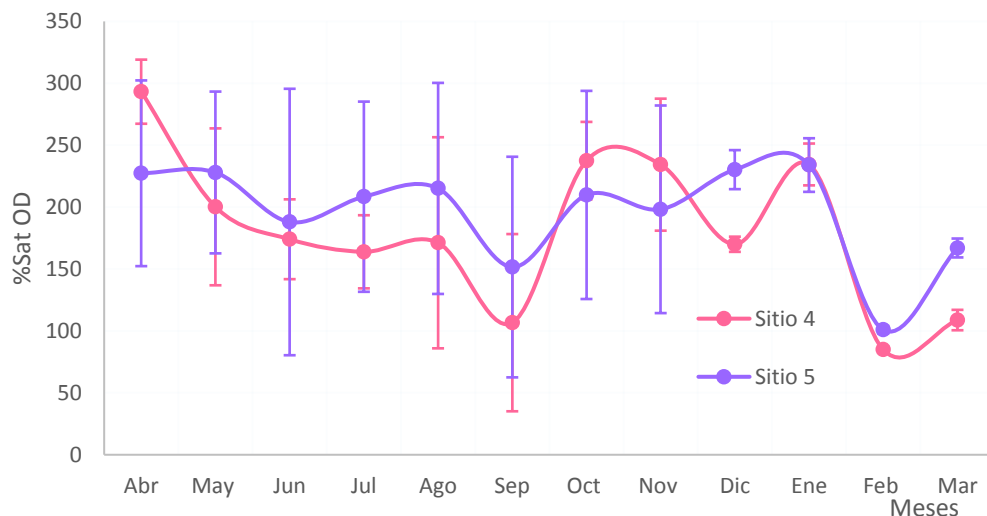
### 8.1.6 Porcentaje de saturación de OD (% SAT OD)

El % Sat OD en el Lago Viejo varía de 7 a 292 %. Donde los valores promedio mínimos se encontraron en el mes de febrero para el sitio 1 con  $81.3 \pm 2.6$  % y en el mes de junio para el sitio 2 con  $102.4 \pm 48$  % y el sitio 3 con  $92.3 \pm 44.2$  %. Los valores promedio máximos se encontraron en los meses de abril para el sitio 1 con  $203.6 \pm 66.4$  %, noviembre para el sitio 2 con  $158.7 \pm 28.7$  % y enero para el sitio 3 con  $130.6 \pm 17.9$  % (Fig. 18).



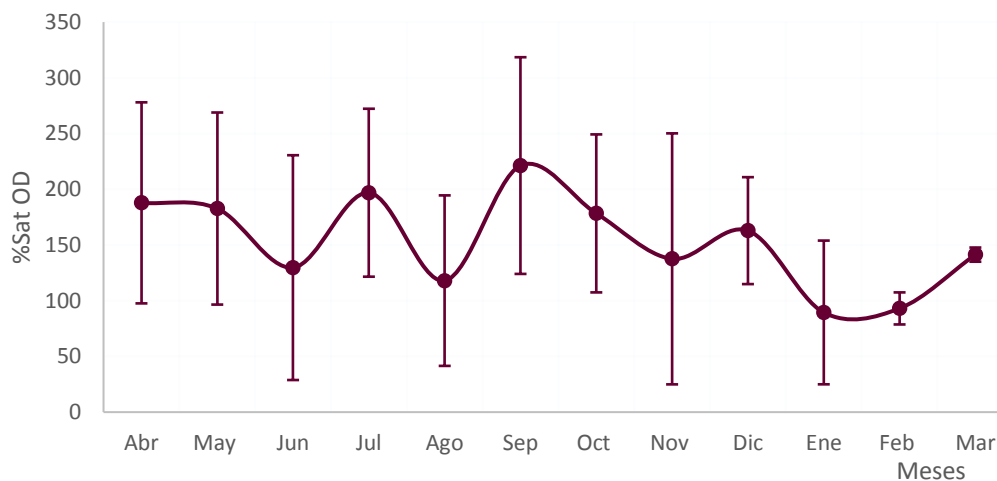
**Fig. 18.** Variación promedio anual del %Sat OD en el Lago Viejo.

El Lago Mayor mostró valores entre 15 y 313 %. Los valores promedio mínimos se presentaron en los meses de febrero para el sitio 4 con  $84.8 \pm 2.5$  % y septiembre para el sitio 5 con  $151.5 \pm 89$  %. Los valores promedio máximos se presentaron en los meses de abril para el sitio 4 con  $293.2 \pm 25.8$  % y enero para el sitio 5 con  $233.9 \pm 21.6$  % (Fig. 19).



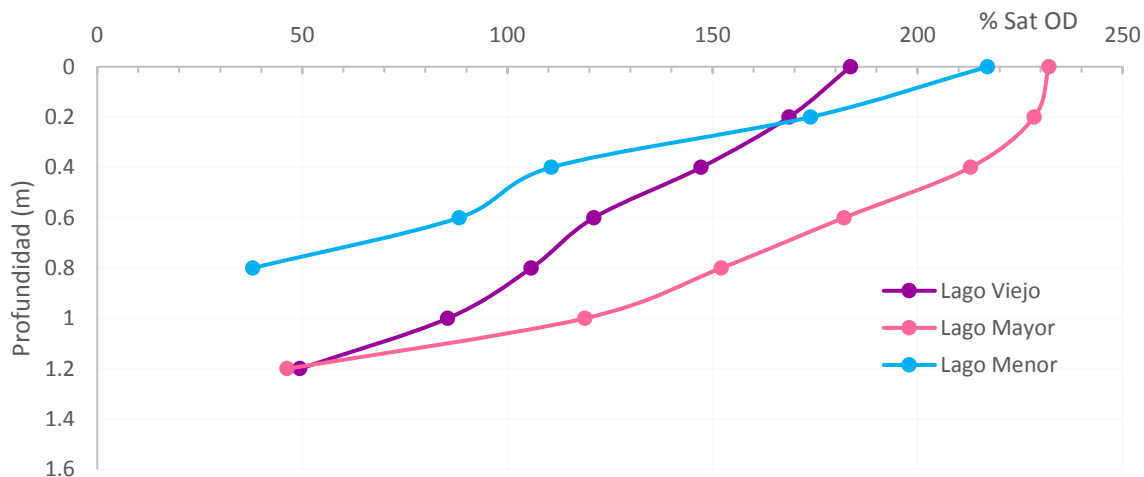
**Fig. 19.** Variación promedio anual del % Sat OD en el Lago Mayor.

El % Sat OD en el Lago Menor varía de 16 a 300 %. Los valores promedio mínimos se presentaron en el mes de enero con  $89 \pm 64.4$  % y su máximo en septiembre con  $221.2 \pm 97.2$  % (Fig.20).



**Fig. 20.** Variación promedio anual del % Sat OD en el Lago Menor.

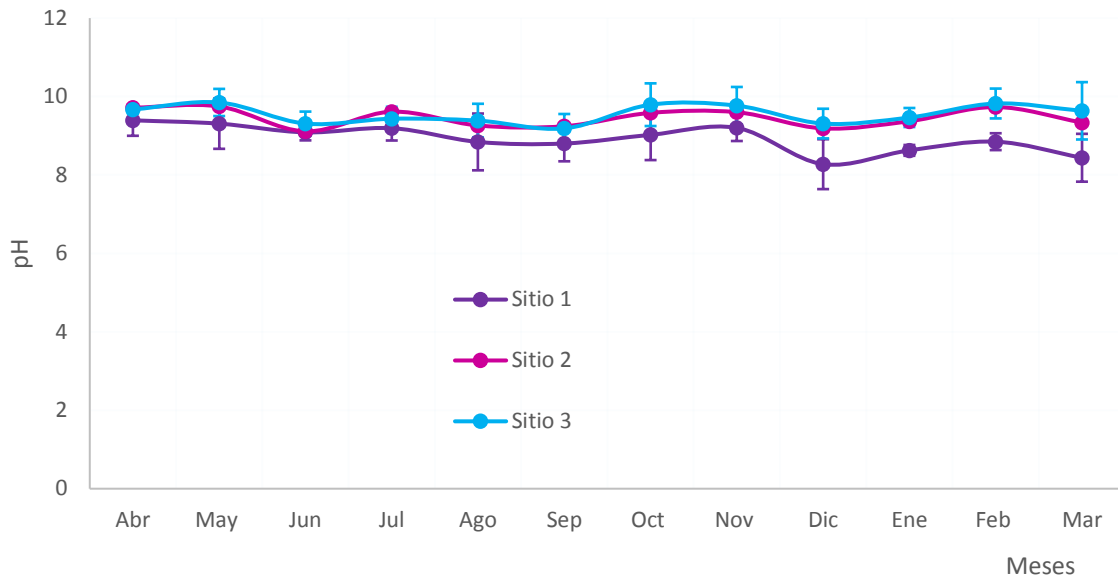
En el Lago Viejo se registraron valores mínimos y máximos de  $49 \pm 27\%$  (en agua de fondo) y  $183 \pm 50.7\%$  (en agua superficial). En el lago Mayor los valores variaron entre  $46 \pm 36\%$  y  $232 \pm 70\%$  en superficie y profundidad, respectivamente. Y en el lago Menor el valor mínimo fue de  $38 \pm 46\%$  y el máximo de  $217 \pm 90\%$  (Fig. 21).



**Fig. 21.** %Sat OD promedio en profundidad en los tres lagos.

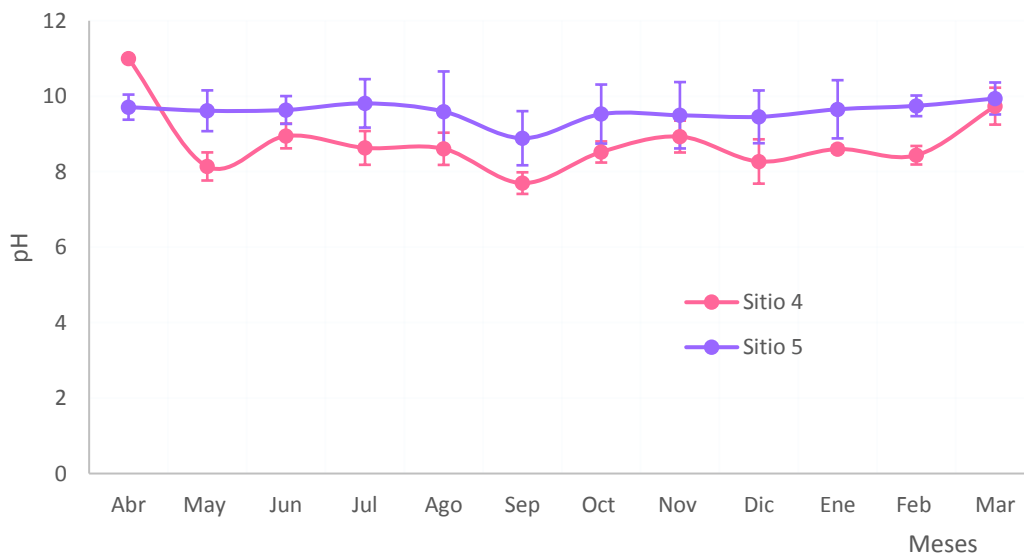
### 8.1.5 pH

El pH en el Lago Viejo mostró valores entre 7.35 y 10.45. Los valores promedio mínimos fueron en el mes de diciembre para los sitios 1 con valores de  $8.2 \pm 0.6$  y el sitio 2 con  $9.1 \pm 0.3$ , mientras que para el sitio 3 fueron en septiembre con  $9.1 \pm 0.3$ . Los valores promedio máximos fueron en el mes de abril para el sitio 1 con  $9.40 \pm 0.3$  y para los otros dos fue en el mes de mayo con  $9.94 \pm 0.4$  para el sitio 2 y  $9.8 \pm 0.1$  para el sitio 3 (Fig. 22).



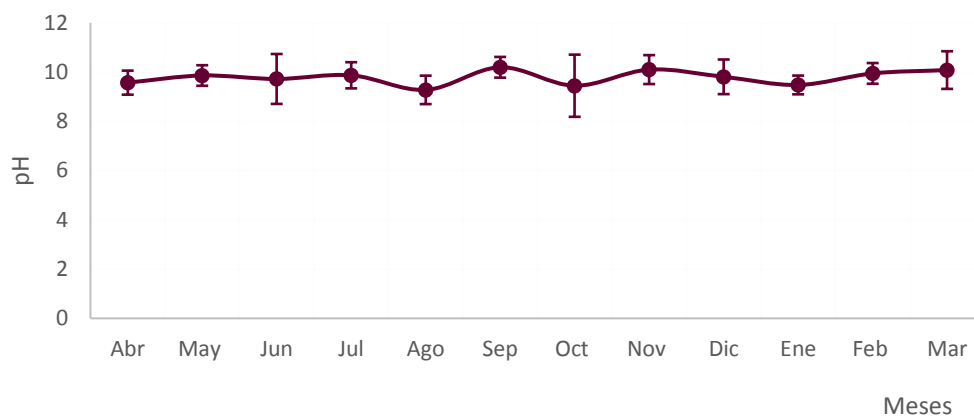
**Fig. 22.** Variación promedio anual de pH en el Lago Viejo.

Para el Lago Mayor sus valores variaron entre 7.23 y 11.01. Sus valores promedio mínimos se encontraron en los meses de mayo para el sitio 4 con  $8.13 \pm 0.3$  y septiembre para el sitio 5 con  $8.88 \pm 0.7$ . Mientras que los valores máximos se encontraron en el mes de abril para el sitio 4 con  $10.9 \pm 0.01$  y mayo para el sitio 5 con  $9.94 \pm 0.4$  (Fig. 23).



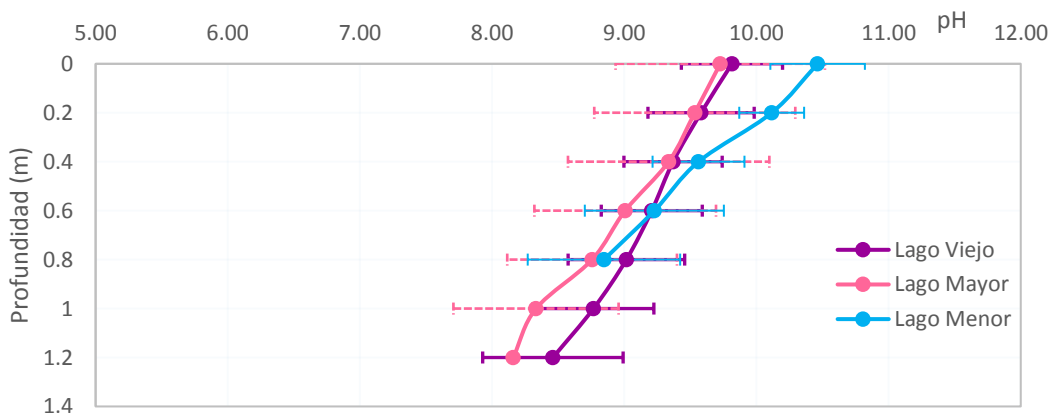
**Fig. 23.** Variación promedio anual de pH en el Lago Mayor.

El lago Menor presentó valores entre 7.89 y 11. Su valor promedio mínimo se encontró en el mes de agosto con  $9.2 \pm 0.5$  y el máximo en el mes de septiembre con  $10.2 \pm 0.4$  (Fig. 24).



**Fig. 24.** Variación promedio anual de pH en el Lago Menor.

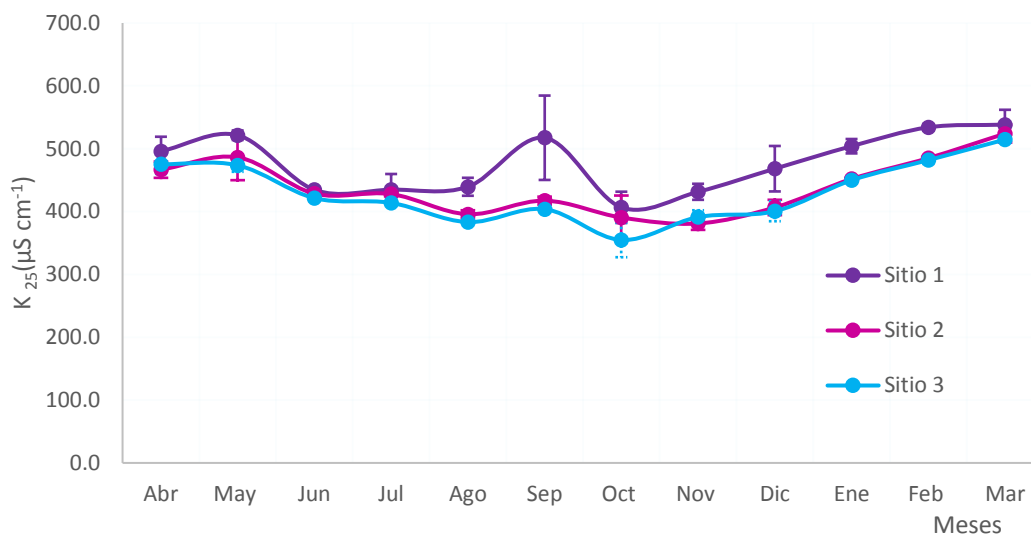
Los valores de pH de los lagos Viejo y Mayor tienen un comportamiento similar en la columna de agua. El lago Viejo presentó valores entre  $8.5 \pm 0.5$  y  $9.8 \pm 0.4$ , el lago Mayor entre  $8.2 \pm 0.0$  y  $9.7 \pm 0.8$  y el lago Menor entre  $8.9 \pm 0.6$  y  $10.5 \pm 0.4$ . Los valores mayores se registraron en agua superficial y los menores valores en profundidad (Fig. 25).



**Fig. 25.** Valores promedio de pH en profundidad en los tres lagos.

### 8.1.6 Conductividad ( $K_{25}$ )

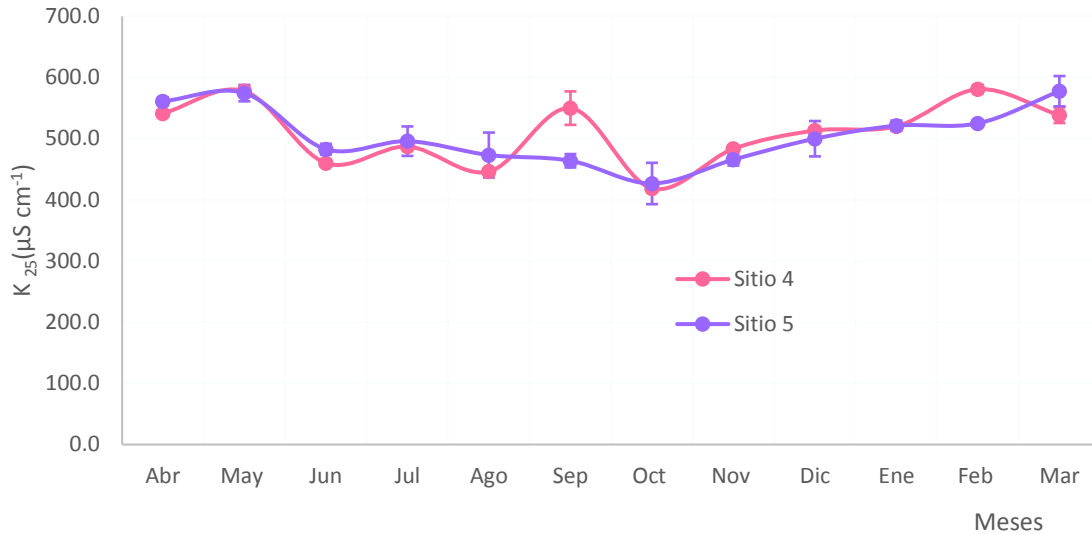
El  $K_{25}$  del Lago Viejo varía entre 335 y 614  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Los valores promedios mínimos se presentaron en el mes de octubre para los sitios 1 y 3 con  $407 \pm 25 \mu\text{S cm}^{-1}$  y  $355 \pm 27 \mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente, y para el sitio 2 su valor promedio mínimo fue en el mes de noviembre con  $381 \pm 10 \mu\text{S cm}^{-1}$ ; mientras que los valores promedio máximos se presentaron en el mes de marzo con valores en el sitio 1 de  $538 \pm 24 \mu\text{S cm}^{-1}$ , el sitio 2 con  $524 \pm 14 \mu\text{S cm}^{-1}$  y el sitio 3 con  $515 \pm 4 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Fig. 26).



**Fig. 26.** Variación promedio anual de  $K_{25}$  en el Lago Viejo.

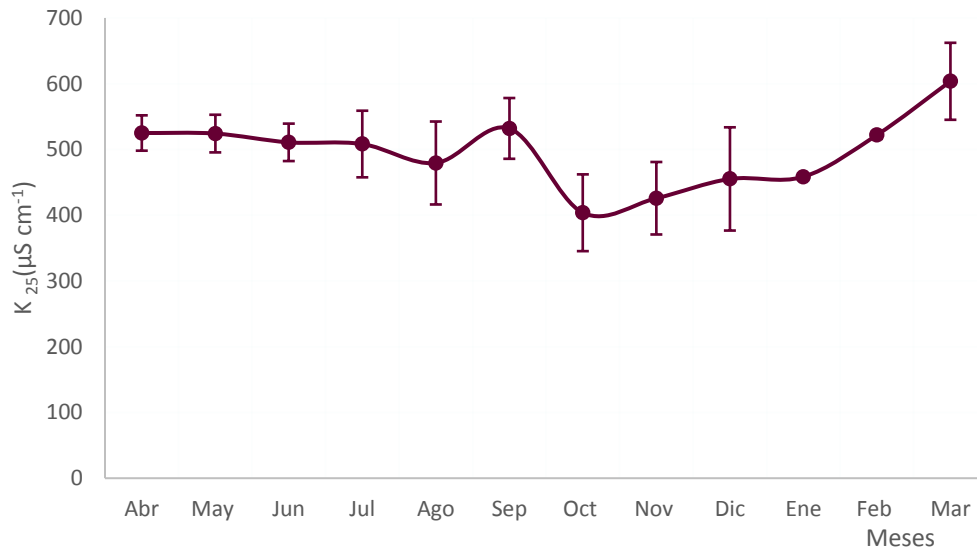
El Lago Mayor obtuvo valores entre 391 y 599  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Los valores promedio mínimos fueron en el mes de octubre con  $419 \pm 0.8 \mu\text{S cm}^{-1}$  para el sitio 4 y con  $426 \pm 34 \mu\text{S cm}^{-1}$  para el sitio 5. Mientras que los valores promedio máximos fueron en febrero para el sitio 4 con  $581 \pm 7 \mu\text{S cm}^{-1}$  y marzo para el sitio 5 con  $577 \pm 25 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Fig. 27).





**Fig. 27.** Variación promedio anual de K<sub>25</sub> en el Lago Mayor.

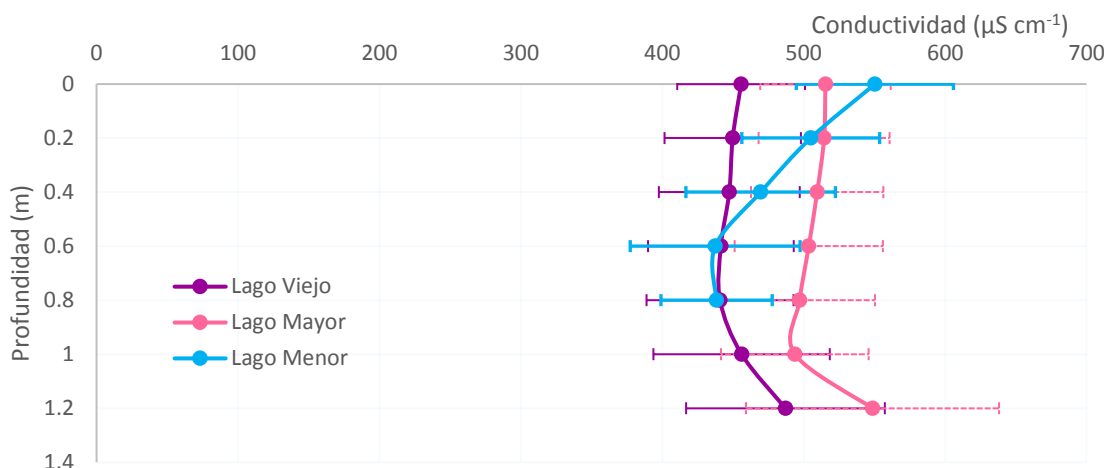
Para el Lago Menor los valores variaron entre 329 y 669  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . El valor promedio mínimo fue en octubre con  $403 \pm 7 \mu\text{S cm}^{-1}$  y el máximo en marzo con  $603 \pm 58 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Fig. 28).



**Fig. 28.** Variación promedio anual de K<sub>25</sub> en el Lago Menor.

En general, se registraron valores entre 330 y 669  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Los valores de conductividad presentaron un comportamiento similar en columna de agua entre el lago Viejo y el Lago

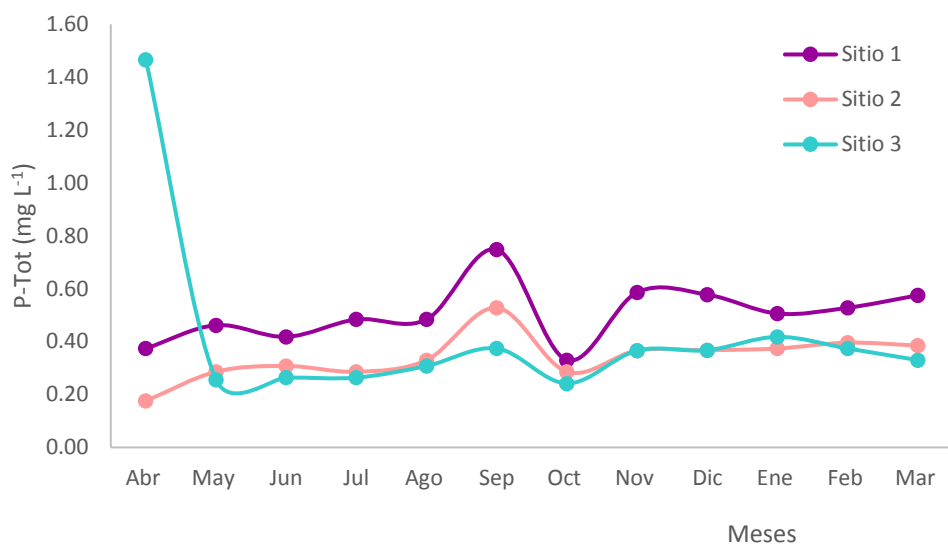
Mayor. El Lago Viejo presentó valores promedios entre  $456 \pm 45 \mu\text{S cm}^{-1}$  (en superficie) y  $487 \pm 70 \mu\text{S cm}^{-1}$  (en profundidad); el lago Mayor entre  $515 \pm 46$  en superficie y  $548 \pm 89 \mu\text{S cm}^{-1}$  en profundidad y el lago Menor entre  $438 \pm 39 \mu\text{S cm}^{-1}$  y  $550 \pm 55 \mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente (Fig. 29).



**Fig. 29.** K<sub>25</sub> promedio en profundidad en los tres lagos.

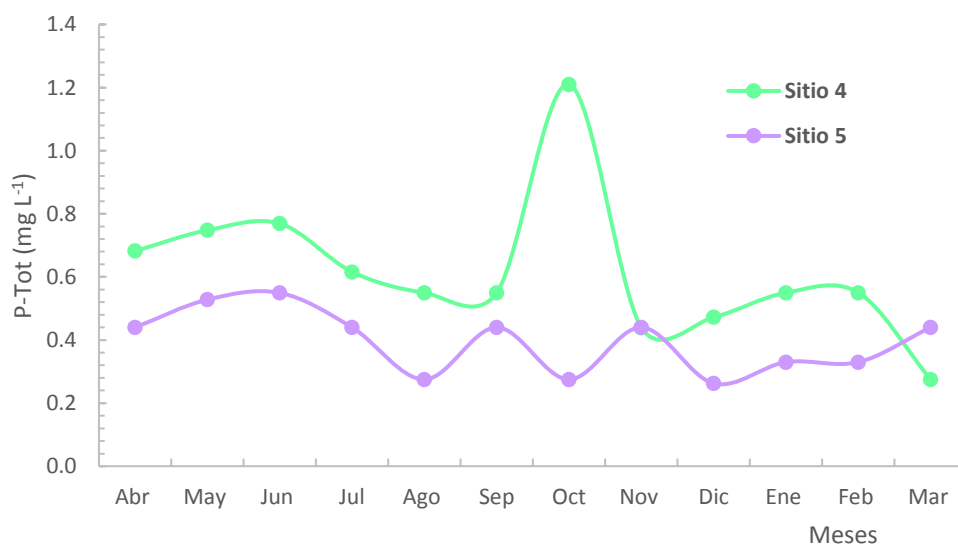
### 8.1.7 Fósforo total (P-Tot)

En general, las concentraciones de P-Tot variaron entre  $0.18 \text{ mg L}^{-1}$  y  $1.47 \text{ mg L}^{-1}$ , ambos valores en el Lago Viejo (Fig. 30). En este lago se observa un comportamiento similar en los tres sitios, excepto en el sitio 3, en el mes de abril, ya que presentó el valor más elevado ( $1.47 \text{ mg L}^{-1}$ ). En los tres sitios se observa una mayor concentración de P-Tot en agosto.



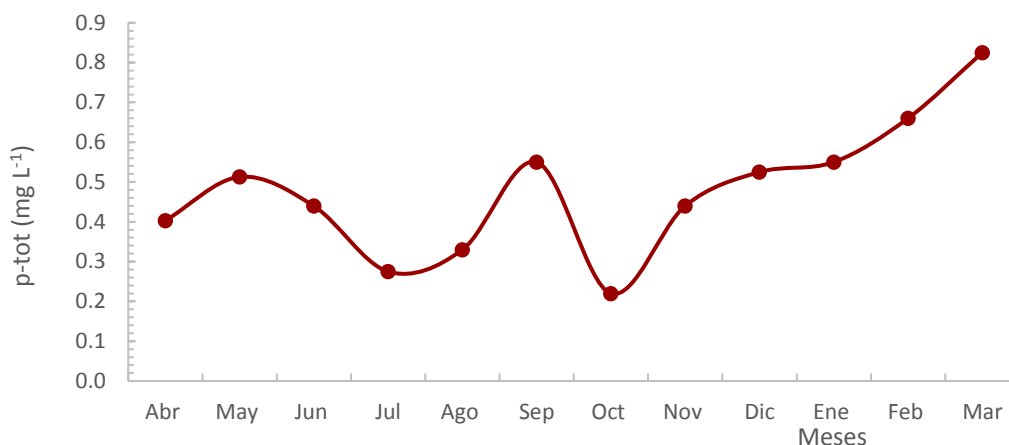
**Fig. 30.** Concentraciones de fósforo total (P-Tot) en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor (Fig. 31) se observó un comportamiento similar entre los dos sitios a lo largo del año, excepto en octubre, ya que en el sitio 4 se registraron 1.21 mg L<sup>-1</sup>. En general fueron mayores las concentraciones de P-Tot en el sitio 4, en comparación con el sitio 5.



**Fig. 31.** Concentraciones de fósforo total (P-Tot) en el Lago Mayor.

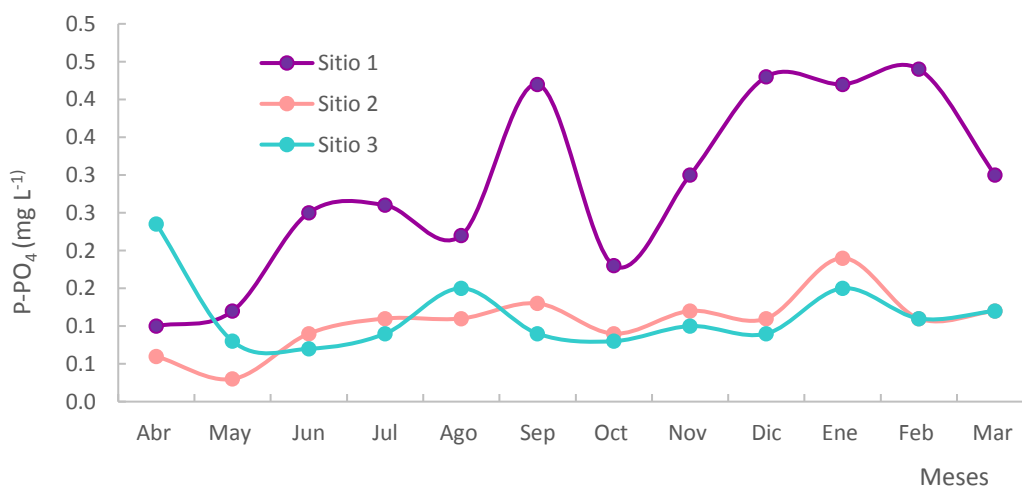
En el Lago Menor (Fig. 32) las concentraciones fluctuaron entre 0.22 mg L<sup>-1</sup> en el mes de octubre y 0.83 mg L<sup>-1</sup> en marzo de 2016.



**Fig.32.** Variación temporal de la concentración de fósforo total (P-Tot) en el Lago Menor.

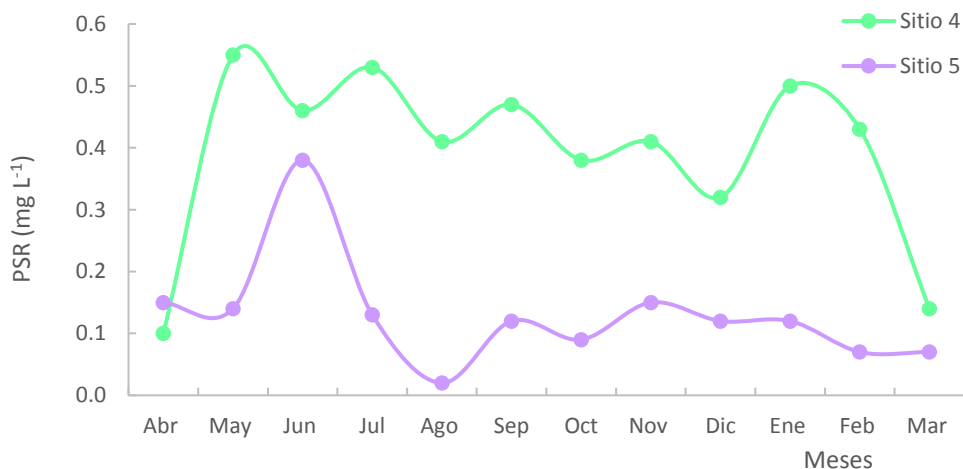
### 8.1.8 Fósforo Soluble Reactivo (PSR)

En el lago Viejo (Fig. 33) el sitio 1 muestra valores más elevados que en los otros dos sitios. Las concentraciones de PSR fluctuaron entre 0.03 mg L<sup>-1</sup> para el sitio 2 en mayo y 0.44 mg L<sup>-1</sup> para el sitio 1 en febrero de 2016.



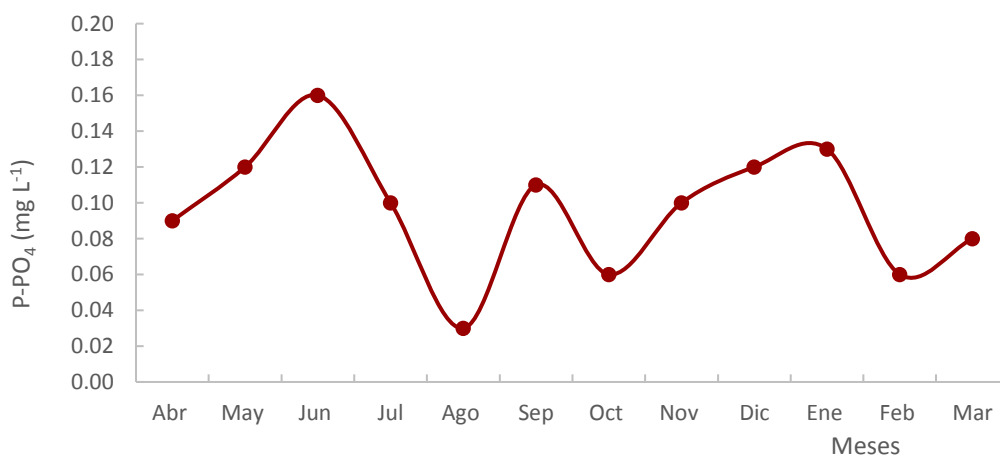
**Fig. 33.** Variación temporal de la concentración de PSR en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor (Fig. 34) el sitio 4 presentó valores más elevados que el sitio 5 a lo largo del año. En el sitio 4 las concentraciones de PSR variaron entre 0.1 mg L<sup>-1</sup> (abril) y 0.55 mg L<sup>-1</sup> (mayo). En el sitio 5 las concentraciones de PSR se registraron entre 0.02 mg L<sup>-1</sup> (agosto) y 0.38 mg L<sup>-1</sup> (junio).



**Fig. 34.** Variación temporal de la concentración de PSR en el Lago Mayor.

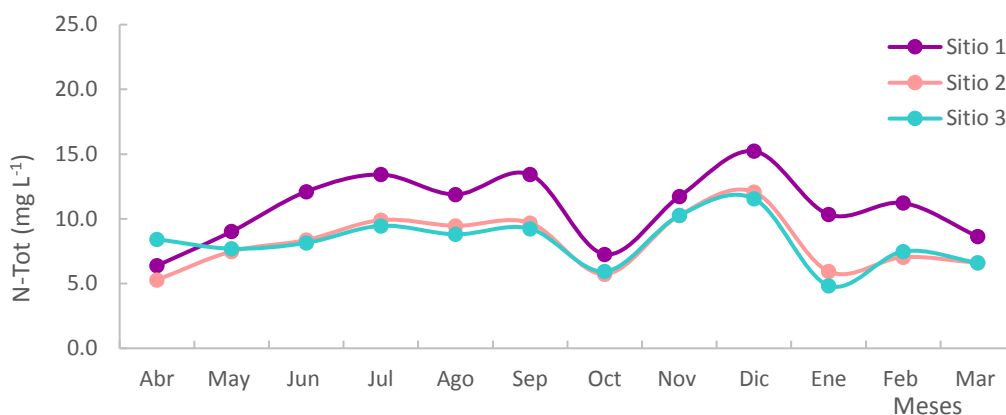
En el Lago Menor (Fig. 35) se observaron concentraciones de PSR con valores mínimos de 0.03 mg L<sup>-1</sup> en agosto y máximos de 0.16 mg L<sup>-1</sup> en junio.



**Fig. 35.** Variación temporal de la concentración de PSR en el Lago Menor.

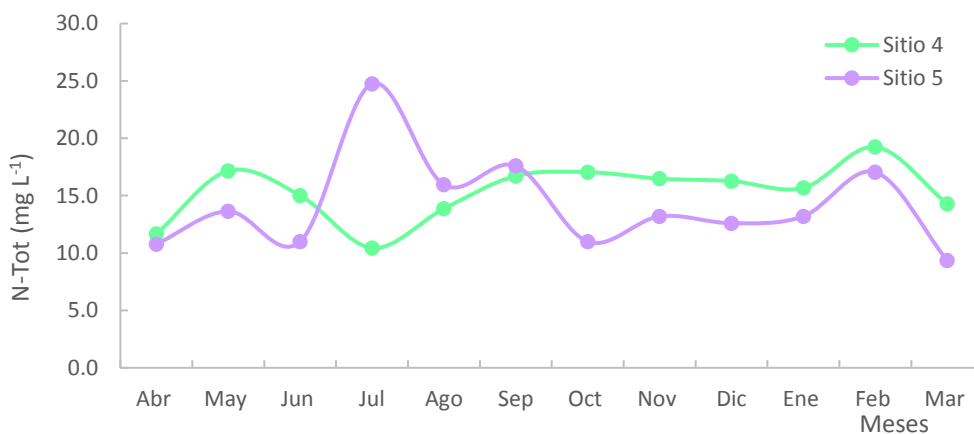
### 8.1.9. Nitrógeno Total (N-Tot)

Las concentraciones de N-Tot en el Lago Viejo (Fig. 36) presentaron un comportamiento muy similar en los tres sitios. En los sitios 1 y 2 los valores mínimos se registraron en abril y los valores máximos en diciembre. En el sitio 1 los valores variaron entre  $6.4 \text{ mg L}^{-1}$  y  $15.2 \text{ mg L}^{-1}$ . En el sitio 2 los valores se encontraron entre  $5.3 \text{ mg L}^{-1}$  y  $12.1 \text{ mg L}^{-1}$ . Y en el sitio 3 los valores variaron entre  $4.8 \text{ mg L}^{-1}$  (enero) y  $11.6 \text{ mg L}^{-1}$  (diciembre).



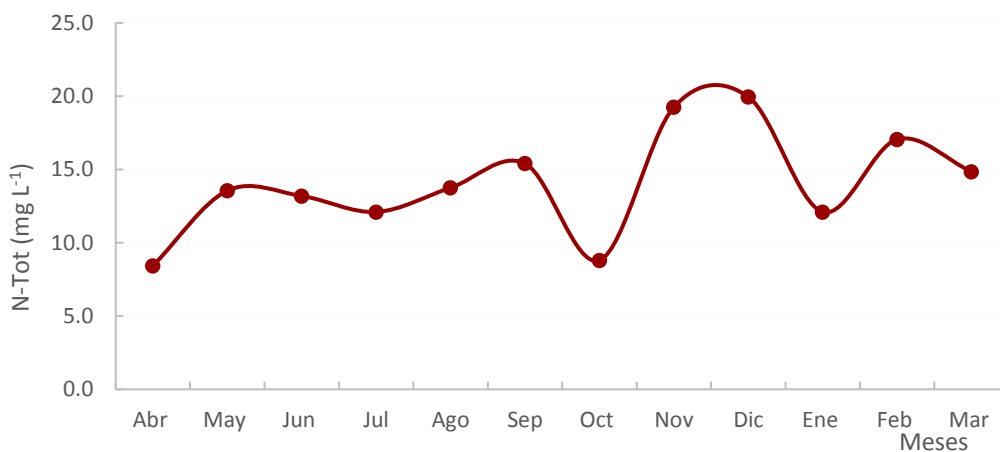
**Fig. 36.** Variación temporal de la concentración de nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor (Fig. 37) el sitio 4 presentó valores entre  $10.5 \text{ mg L}^{-1}$  en julio y  $19.3 \text{ mg L}^{-1}$  en febrero. En el sitio 5 los valores se encontraron entre  $9.4 \text{ mg L}^{-1}$  en marzo de 2016 y  $24.8 \text{ mg L}^{-1}$  en julio.



**Fig. 37.** Variación temporal de la concentración de nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Mayor.

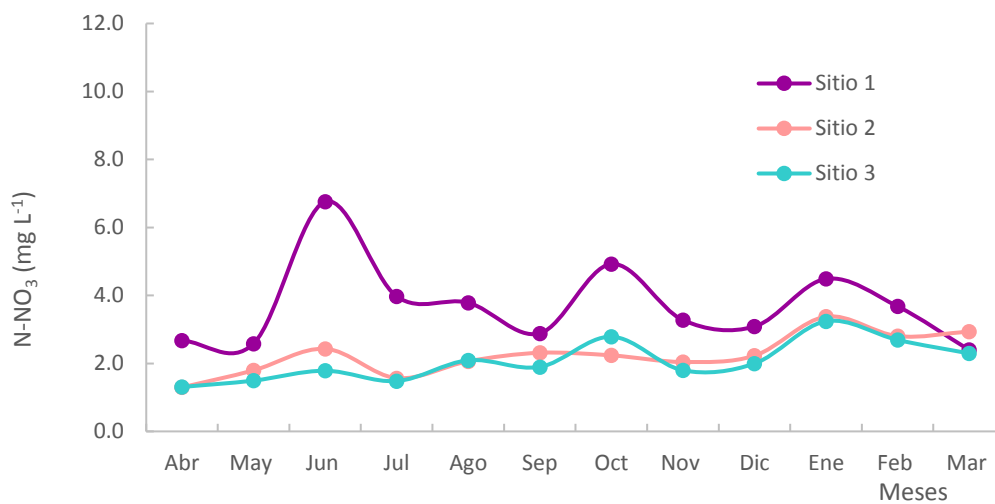
El Lago Menor (Fig. 38) presentó concentraciones entre 8.4 mg L<sup>-1</sup> en abril y 20 mg L<sup>-1</sup> en diciembre.



**Fig. 38.** Variación temporal de la concentración nitrógeno total (N-Tot) en el Lago Menor.

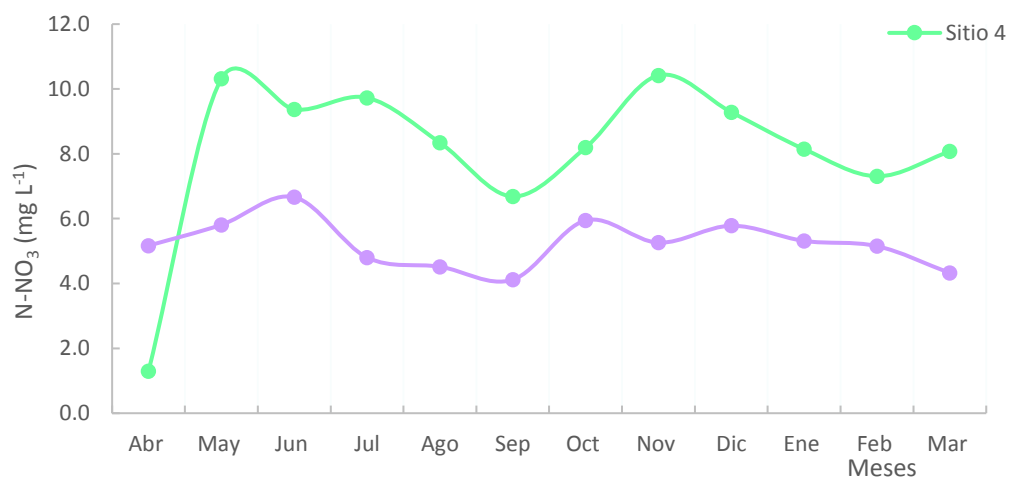
### 8.1.10 Nitratos (N-NO<sub>3</sub>)

En el Lago Viejo (Fig. 39) las concentraciones de nitratos variaron entre 1.30 mg L<sup>-1</sup> y 6.7 mg L<sup>-1</sup>, registrándose los valores mayores en el sitio 1 en junio (6.7 mg L<sup>-1</sup>), octubre (4.9 mg L<sup>-1</sup>) y enero (4.5 mg L<sup>-1</sup>). Los sitios 2 y 3 presentaron concentraciones similares.



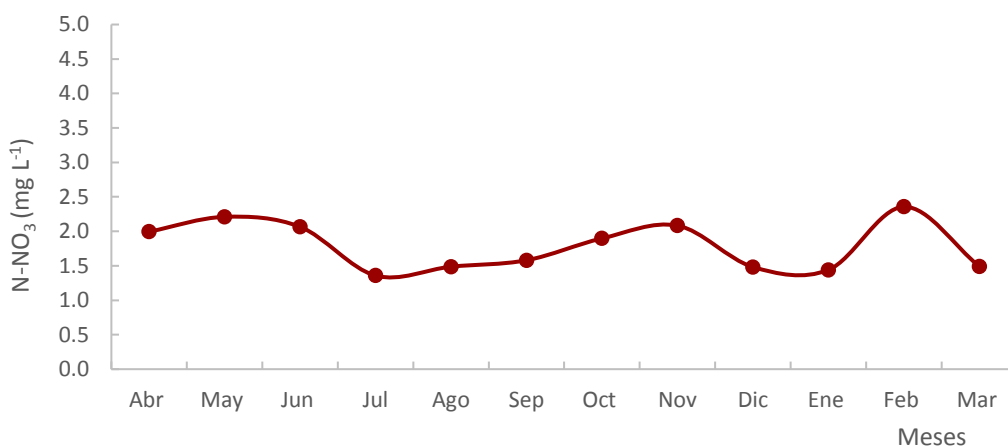
**Fig. 39.** Variación temporal de la concentración de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) en el Lago Viejo.

En el lago Mayor (Fig. 40) se observa un comportamiento similar entre los dos sitios, donde el sitio 4 muestra valores más elevados que el sitio 5.



**Fig. 40.** Variación temporal de la concentración de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) en el Lago Mayor.

En el lago Menor (Fig. 41) se presentaron concentraciones mínimas en julio (1.4 mg L<sup>-1</sup>) y máximas en febrero con 2.4 mg L<sup>-1</sup>.

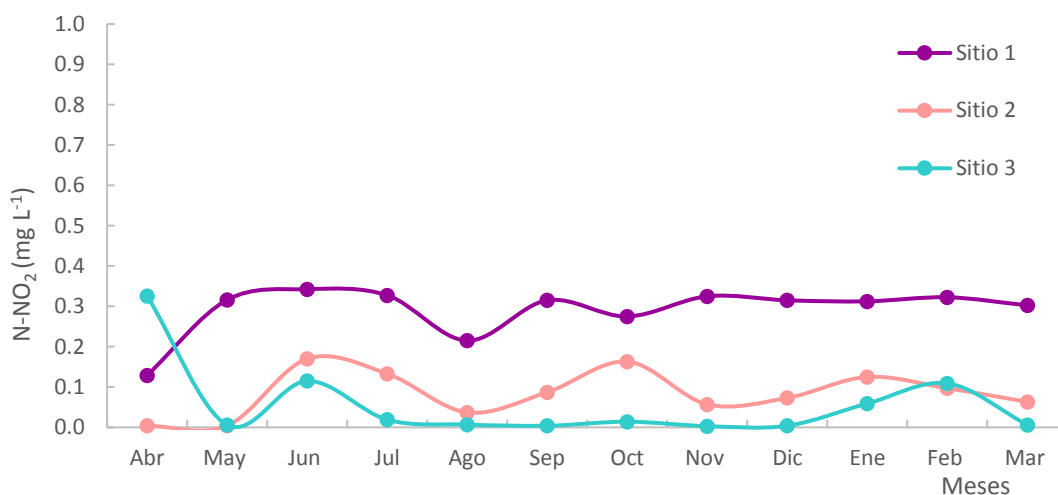


**Fig. 41.** Variación temporal de la concentración de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) en el Lago Menor.



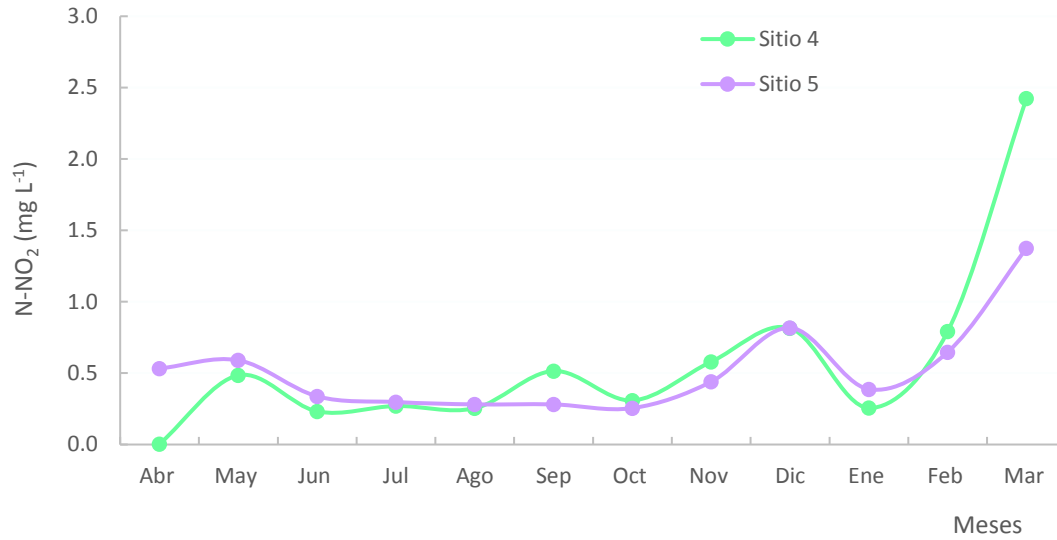
### 8.1.11 Nitritos (N-NO<sub>2</sub>)

Las concentraciones de nitritos en los lagos de Chapultepec son bajas por ser una especie inestable que rápidamente se reduce u oxida, sin embargo los valores fluctúan en un amplio intervalo de entre 0.003 y 2.4 mg L<sup>-1</sup>. En el lago Viejo (Fig. 42) las concentraciones fluctuaron entre 0.13 y 0.34 mg L<sup>-1</sup> para el sitio 1, entre 0.004 y 0.17 mg L<sup>-1</sup> para el sitio 2 y entre 0.003 y 0.33 mg L<sup>-1</sup> para el sitio 3.

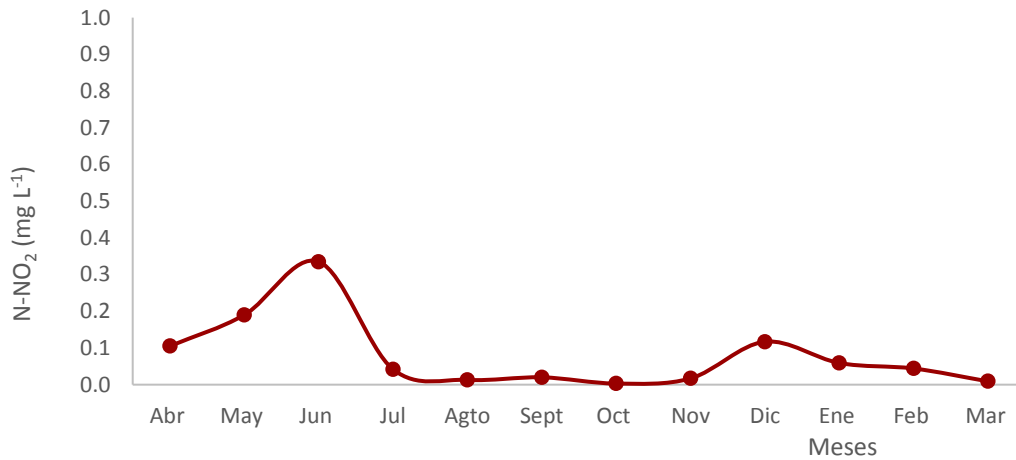


**Fig. 42.** Variación temporal de la concentración de nitritos (N-NO<sub>2</sub>) en el Lago Viejo.

El Lago Mayor (Fig. 43) los valores mínimos se encontraron en el mes de abril, para el sitio 4, con 0.004 mg L<sup>-1</sup> y en octubre, para el sitio 5, con 0.25 mg L<sup>-1</sup>. Los valores máximos se registraron en el mes de marzo 2016 con 2.4 mg L<sup>-1</sup> (sitio 4) y 1.4 mg L<sup>-1</sup> (sitio 5).



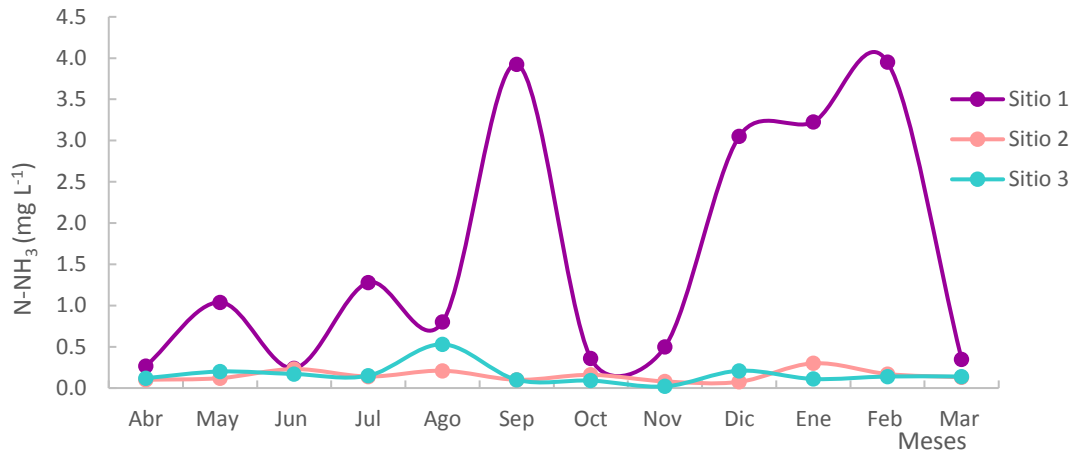
**Fig. 43.** Variación temporal de la concentración de nitritos (N-NO<sub>2</sub>) en el Lago Mayor. En el Lago Menor (Fig. 44) el valor más elevado ocurrió en el mes de junio con 0.335 mg L<sup>-1</sup> y el valor más bajo en el mes de octubre con 0.003 mg L<sup>-1</sup>.



**Fig. 44.** Variación temporal de la concentración de nitritos (N-NO<sub>2</sub>) en el Lago Menor.

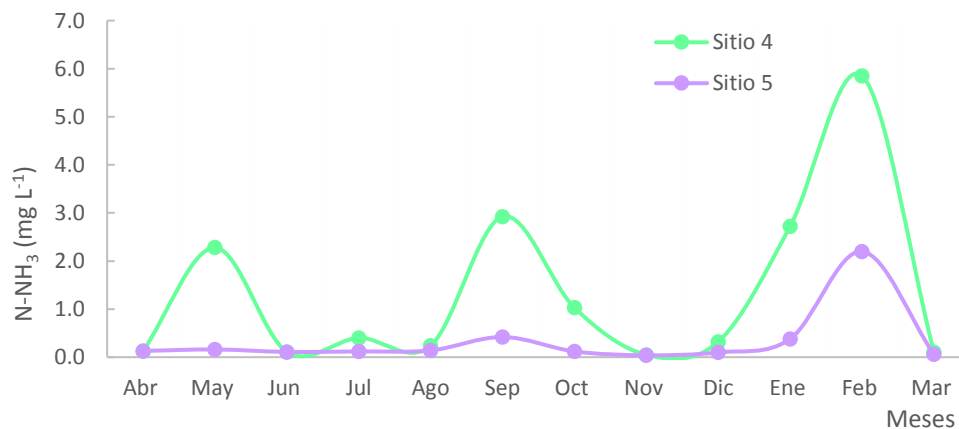
### 8.1.12 Amoníaco (N-NH<sub>3</sub>)

El lago Viejo (Fig. 45) tiene un comportamiento y valores similares en los sitios 2 y 3; sin embargo, el sitio 1 muestra valores más elevados; en este caso se observan dos máximos con 3.93 mg L<sup>-1</sup> en agosto y en febrero.



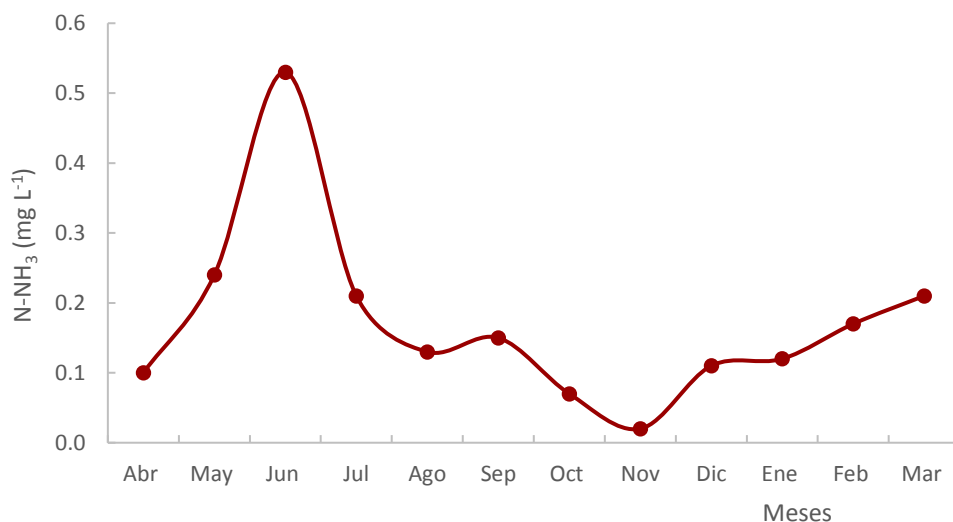
**Fig. 45.** Variación temporal de la concentración de amoníaco (N-NH<sub>3</sub>) en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor (Fig. 46) el sitio 5 presentó las concentraciones mayores, con un mínimo de 0.04 mg L<sup>-1</sup> en noviembre y un máximo de 2.2 mg L<sup>-1</sup> en febrero. En el sitio 4 la concentración mínima fue de 0.05 mg L<sup>-1</sup> en noviembre y la máxima fue de 5.85 mg L<sup>-1</sup> en febrero.



**Fig. 46.** Variación temporal de la concentración de amoníaco N-NH<sub>3</sub> en el Lago Mayor.

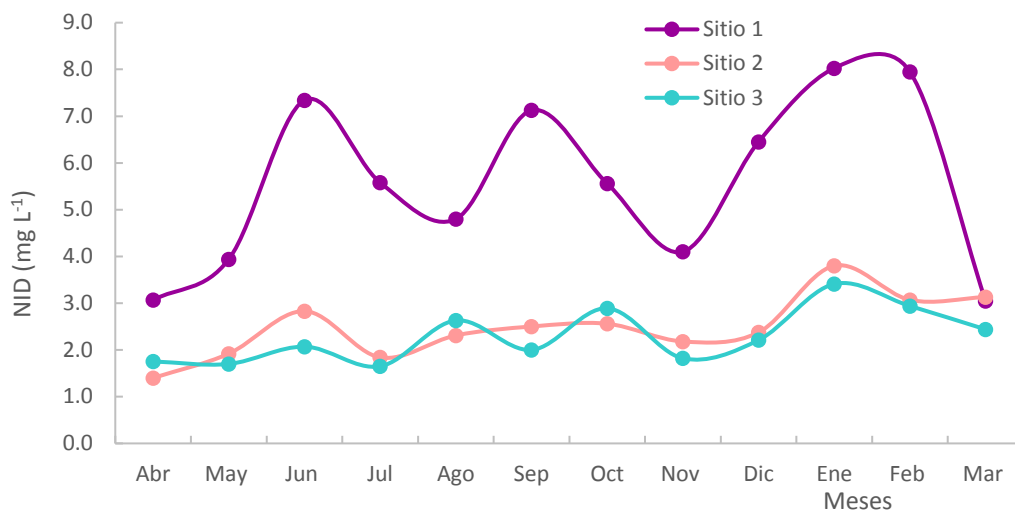
El Lago Menor (Fig. 47) presentó su concentración más baja en el mes de noviembre con  $0.02 \text{ mg L}^{-1}$  y su concentración más elevada en el mes de junio con  $0.53 \text{ mg L}^{-1}$ .



**Fig. 47.** Variación temporal de la concentración amoníaco (N-NH<sub>3</sub>) en el Lago Menor.

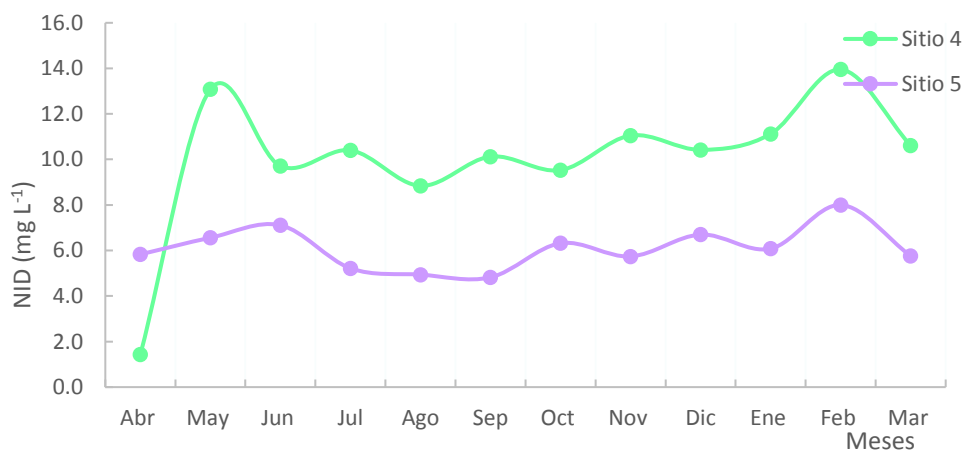
### 8.1.13 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID)

El sitio 1 del Lago Viejo (Fig. 48) presentó concentraciones más elevadas, con valores que fluctuaron entre  $3.1 \text{ mg L}^{-1}$  en marzo y  $8.0 \text{ mg L}^{-1}$  en enero. Los sitios 2 y 3 presentaron un comportamiento similar, con un mínimo de  $1.7 \text{ mg L}^{-1}$  y  $1.4 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. Las concentraciones máximas fueron de  $3.8 \text{ mg L}^{-1}$  y  $3.4 \text{ mg L}^{-1}$ , ambas en enero.



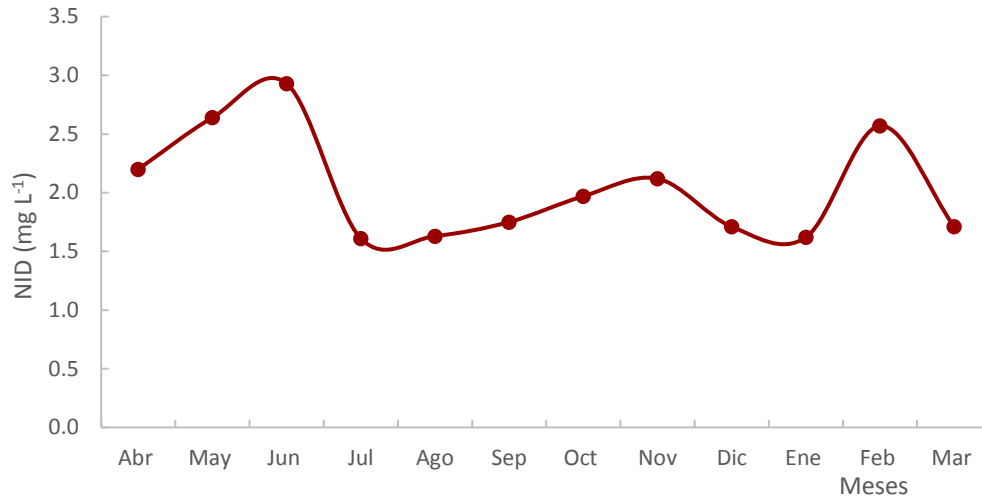
**Fig. 48.** Variación temporal de la concentración de NID en el Lago Viejo.

En el Lago Mayor (Fig. 49) el sitio 4 presentó mayores concentraciones con valores entre 1.4 mg L<sup>-1</sup> (abril) y 14.0 mg L<sup>-1</sup> (febrero). En el sitio 5 los valores se encontraron entre 4.8 mg L<sup>-1</sup> (agosto) y 8.0 mg L<sup>-1</sup> (febrero).



**Fig. 49.** Variación temporal de la concentración de NID en el Lago Mayor.

En el Lago Menor (Fig. 50) los valores de NID se registraron entre 1.6 mg L<sup>-1</sup> en noviembre y 2.9 mg L<sup>-1</sup> en junio.



**Fig. 50.** Variación temporal de la concentración de NID en el Lago Menor.

En la tabla 9 se presentan los valores de los nutrientes registrados para cada estación de los tres lagos.

**Tabla 10.** Concentraciones de nutrientes registradas en los tres lagos de Chapultepec (renglón superior = valores mínimo y máximo, renglón inferior = promedio  $\pm$  desviación estándar).

Lago	Sitio	PSR (mg L <sup>-1</sup> )	P-Total (mg L <sup>-1</sup> )	N-Total (mg L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	NID (mg L <sup>-1</sup> )
Lago Viejo	1	0.1 - 0.4 0.3 $\pm$ 0.1	0.3 - 0.8 0.5 $\pm$ 0.1	6.4 - 15.2 10.9 $\pm$ 2.7	2.4 - 6.7 3.7 $\pm$ 1.2	0.1 - 0.3 0.3 $\pm$ 0.1	0.2 - 4.0 1.6 $\pm$ 1.5	3.1 - 8.0 5.6 $\pm$ 1.8
	2	0.03 - 0.2 0.1 $\pm$ 0.0	0.2 - 0.5 0.3 $\pm$ 0.1	5.3 - 12.1 8.1 $\pm$ 2.1	1.3 - 3.4 2.3 $\pm$ 0.6	0.004 - 0.2 0.1 $\pm$ 0.1	0.1 - 0.3 0.2 $\pm$ 0.1	1.4 - 3.8 2.5 $\pm$ 0.7
	3	0.07 - 0.2 0.1 $\pm$ 0.0	0.2 - 1.5 0.4 $\pm$ 0.3	4.8 - 11.6 8.2 $\pm$ 1.9	1.3 - 3.2 2.1 $\pm$ 0.6	0.003 - 0.3 0.1 $\pm$ 0.1	0.02 - 0.5 0.2 $\pm$ 0.1	1.7 - 3.4 2.3 $\pm$ 0.6
Lago Mayor	4	0.1 - 0.6 0.4 $\pm$ 0.1	0.3 - 1.2 0.6 $\pm$ 0.2	10.5 - 19.3 15.3 $\pm$ 2.5	1.3 - 10.4 8.1 $\pm$ 2.4	0.004 - 2.4 0.6 $\pm$ 0.6	0.05 - 5.9 1.3 $\pm$ 1.8	1.4 - 14.0 10 $\pm$ 3.1
	5	0.02 - 0.4 0.1 $\pm$ 0.1	0.3 - 0.6 0.4 $\pm$ 0.1	9.4 - 24.8 14.2 $\pm$ 4.2	4.1 - 6.7 5.2 $\pm$ 0.7	0.3 - 1.4 0.5 $\pm$ 0.3	0.04 - 2.2 0.3 $\pm$ 0.6	4.8 - 8.0 6.1 $\pm$ 0.9
Lago Menor	6	0.03 - 0.2 0.1 $\pm$ 0.0	0.2 - 0.8 0.5 $\pm$ 0.2	8.4 - 20 14 $\pm$ 3.6	1.4 - 2.4 1.8 $\pm$ 0.3	0.003 - 0.3 0.1 $\pm$ 0.1	0.02 - 0.5 0.2 $\pm$ 0.1	1.6 - 2.9 2.0 $\pm$ 0.5

## 8.2 Análisis estadístico de los parámetros físico-químicos

**a) Lago Viejo:** para la T°, P-Total y N-Total no existieron diferencias significativas en ninguno de los sitios (1, 2 y 3). En cuanto a los valores de OD y % Sat OD sólo se encontraron diferencias significativas en el mes de febrero entre los tres sitios (1, 2 y 3). El pH sí presentó diferencias significativas en los meses de enero y febrero entre el sitio 1 y 2; y en enero, febrero y marzo entre el sitio 1 y 3. En cuanto a la K<sub>25</sub> se encontraron diferencias significativas entre los meses de abril, mayo, agosto, noviembre, enero y febrero en los sitios 1 y 2, y mayo, agosto, noviembre, enero y febrero entre los sitios 1 y 3. Para el PRS, NID y N-NH<sub>3</sub> se encontraron diferencias significativas entre los sitios 1 y 2, y 1 y 3. Por último, para el N-NO<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub> se encontraron diferencias significativas entre el sitio 1 con 3, también para el último se encontraron diferencias entre 3 con 2.

**b) Lago Mayor:** para la T° y P-Total, N-Total, N-NO<sub>2</sub> y N-NH<sub>3</sub> no se encontraron diferencias significativas entre ninguno de los dos sitios (4 y 5); para OD se encontraron diferencias significativas en los meses de noviembre, febrero y marzo en los dos sitios, para el % Sat OD se encontró diferencias en febrero y marzo, para el pH se registraron diferencias en los meses de abril, mayo, junio, septiembre, noviembre, enero y febrero entre los dos sitios y para K<sub>25</sub> en los meses de agosto, febrero y marzo. Para el PRS, NID y N-NO<sub>3</sub> si se encontraron diferencias significativas entre los sitios 4 y 5.

## 8.3 Clorofila-a (Clor-a)

Las concentraciones de Clor-a fueron altas en todos los lagos (Tabla 10). En el Lago Viejo la Clor-a fluctuó entre 143 y 596 µg L<sup>-1</sup>, con un promedio general de 389 ± 107 µg L<sup>-1</sup>. En el Lago Mayor las concentraciones variaron entre 109 y 773 µg L<sup>-1</sup>, con un promedio general de 311 ± 132 µg L<sup>-1</sup>. Y en el Lago Menor se registraron las concentraciones más elevadas, las cuales fluctuaron entre 206 y 943 µg L<sup>-1</sup>, con un promedio de 469 ± 194 µg L<sup>-1</sup>.

**Tabla 11.** Concentraciones de clorofila a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los tres lagos de Chapultepec. (Mín = valor mínimo, Max = máximo, Prom = promedio y d.e.= desviación estándar).

Lago	Sitio	Mín - Máx	Prom. $\pm$ d.e.
Lago Viejo	1	143 - 565	336 $\pm$ 105
	2	208 - 596	418 $\pm$ 104
	3	213 - 556	412 $\pm$ 94
Lago Mayor	4	109 - 773	295 $\pm$ 147
	5	175 - 647	328 $\pm$ 115
Lago Menor	6	206 - 943	469 $\pm$ 194

#### 8.4 Índice de estado trófico

Según los criterios de la OECD (1982) y del Sistema de Clasificación de Estado Trófico de Lagos Cálidos Tropicales (CEPIS, 2001), concentraciones superiores a  $100 \mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  corresponden a un estado hipertrófico, tal y como sucede en los lagos de Chapultepec. Esto, además, se confirma con el índice de Carlson (1977) (Tablas 11, 12 y 13).



**Tabla 12.** Clasificación del estado trófico del Lago Viejo de Chapultepec con base en la profundidad del disco de Secchi ( $Z_{Ds}$ ), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a). (IET= Índice del estado Trófico, Clas= clasificación).

Muestreo	Sitio 1						Sitio 2						Sitio 3					
	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	IET (Clor-a)	Clas	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	Clor-a	Clas	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	IET (Clor-a)	Clas
Abr-2015	81	Eutrófico	90	Eutrófico	88	Eutrófico	87	Eutrófico	79	Eutrófico	84	Eutrófico	89	Eutrófico	109	Hipereutrófico	84	Eutrófico
May-2015	81	Eutrófico	93	Hipereutrófico	91	Hipereutrófico	103	Hipereutrófico	86	Eutrófico	93	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	84	Eutrófico	91	Hipereutrófico
Jun-2015	80	Eutrófico	91	Hipereutrófico	83	Eutrófico	87	Eutrófico	87	Eutrófico	88	Eutrófico	93	Eutrófico	85	Eutrófico	89	Eutrófico
Jun-2015	96	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	91	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	86	Eutrófico	91	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	85	Eutrófico	92	Hipereutrófico
Ago-2015	93	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	89	Eutrófico	93	Hipereutrófico	88	Eutrófico	91	Hipereutrófico	103	Hipereutrófico	87	Eutrófico	90	Eutrófico
Ago-2015	96	Hipereutrófico	100	Hipereutrófico	86	Eutrófico	111	Hipereutrófico	95	Hipereutrófico	91	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	90	Eutrófico	91	Hipereutrófico
Oct-2015	87	Eutrófico	88	Eutrófico	85	Eutrófico	93	Hipereutrófico	86	Eutrófico	88	Eutrófico	93	Hipereutrófico	83	Eutrófico	87	Eutrófico
Nov-2015	93	Hipereutrófico	96	Hipereutrófico	88	Eutrófico	93	Hipereutrófico	89	Eutrófico	90	Eutrófico	93	Hipereutrófico	89	Eutrófico	91	Hipereutrófico
Nov-2015	93	Hipereutrófico	96	Hipereutrófico	89	Eutrófico	93	Hipereutrófico	89	Eutrófico	91	Hipereutrófico	96	Hipereutrófico	89	Eutrófico	92	Hipereutrófico
Ene-2016	83	Eutrófico	94	Hipereutrófico	89	Eutrófico	93	Hipereutrófico	90	Eutrófico	91	Hipereutrófico	96	Hipereutrófico	91	Hipereutrófico	91	Hipereutrófico
Feb-2016	73	Eutrófico	95	Hipereutrófico	80	Eutrófico	87	Eutrófico	90	Eutrófico	90	Eutrófico	89	Eutrófico	90	Eutrófico	90	Eutrófico
Mar-2016	80	Eutrófico	96	Hipereutrófico	87	Eutrófico	93	Hipereutrófico	90	Eutrófico	92	Hipereutrófico	93	Hipereutrófico	88	Eutrófico	88	Eutrófico

\* ■ = Eutrófico, ■ = Hipereutrófico.

**Tabla 13.** Clasificación del estado trófico del Lago Mayor con base en la profundidad del disco de Secchi ( $Z_{Ds}$ ), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a). IET= Índice del estado Trófico, Clas.= clasificación.

Muestreo	Sitio 4						Sitio 5					
	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	IET (Clor-a)	Clas	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	IET (Clor-a)	Clas
Abr-2015	80	■	98	■	82	■	89	■	92	■	87	■
May-2015	77	■	100	■	83	■	93	■	95	■	89	■
Jun-2015	77	■	100	■	78	■	87	■	95	■	84	■
Jun-2015	77	■	97	■	79	■	96	■	92	■	89	■
Ago-2015	80	■	95	■	87	■	93	■	85	■	87	■
Ago-2015	83	■	95	■	81	■	93	■	92	■	85	■
Oct-2015	77	■	107	■	84	■	89	■	85	■	82	■
Nov-2015	76	■	92	■	87	■	81	■	92	■	85	■
Nov-2015	77	■	93	■	88	■	81	■	84	■	91	■
Ene-2016	78	■	95	■	89	■	78	■	88	■	86	■
Feb-2016	73	■	95	■	87	■	77	■	88	■	87	■
Mar-2016	77	■	85	■	94	■	81	■	92	■	83	■

\*■ = Eutrófico, ■ = Hipereutrófico.

**Tabla 14.** Clasificación del estado trófico del Lago Menor con base en la profundidad del Disco de Secchi ( $Z_{Ds}$ ), fósforo total (P-Total) y clorofila (Clor-a). IET= Índice del estado Trófico, Clas= clasificación.

Muestreo	Sitio 6					
	IET ( $Z_{Ds}$ )	Clas	IET (P-Total)	Clas	IET (Clor-a)	Clas
Abr-2015	96	■	91	■	86	■
May-2015	101	■	94	■	89	■
Jun-2015	103	■	92	■	90	■
Jun-2015	87	■	85	■	90	■
Ago-2015	96	■	88	■	86	■
Ago-2015	89	■	95	■	85	■
Oct-2015	96	■	82	■	85	■
Nov-2015	103	■	92	■	94	■
Nov-2015	106	■	94	■	93	■
Ene-2016	111	■	95	■	94	■
Feb-2016	111	■	98	■	95	■
Mar-2016	116	■	101	■	96	■

\* ■ = Eutrófico, ■ = Hipereutrófico.

## 8.5 Indicadores de contaminación: DQO, DBO<sub>5</sub> Y SST

### 8.5.1 Lago Viejo

Los indicadores de contaminación se presentan en las Tablas 14, 15 y 16. En el Lago Viejo y de acuerdo a los niveles de DQO (11.8 y 165 mg L<sup>-1</sup>) el lago se clasifica desde “aceptable” (8 % del año) hasta “contaminada” (entre el 92 % y el 100 % del año). En tanto los valores de DBO<sub>5</sub> (entre 11.1 y 44.7 mg L<sup>-1</sup>) se encontraron desde “aceptable” (83% en el sitio 1 y 92% en el sitio 2) hasta “contaminada” (sitio 1 con 17%, sitio 2 con 8% y sitio 3 con 100% en el año). Por último, los SST (entre 17 y 98 mg L<sup>-1</sup>) clasifican al lago con aguas desde “buena

calidad” (el sitio 1 con 100%, el 2 con 58% y el 3 con 67% en el año) hasta “aceptable” (el sitio 2 con 42 % y el sitio 3 con 33 % en el año).

**Tabla 15.** Clasificación del Lago Viejo por cada sitio de estudio de acuerdo a las concentraciones de DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $\text{DBO}_5$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y SST ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

Fecha	Indicador	Sitio 1		Sitio 2		Sitio 3	
		Resultado	Clasificación	Resultado	Clasificación	Resultado	Clasificación
05-may-15	DQO	101	Contaminada	130	Contaminada	130	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	19.9	Aceptable	14.5	Aceptable	14.5	Aceptable
	SST	27	Buena calidad	53	Buena calidad	63	Buena calidad
02-jun-15	DQO	80	Contaminada	100	Contaminada	124	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	15.7	Aceptable	23.5	Aceptable	13.2	Aceptable
	SST	35	Buena calidad	68	Buena calidad	60	Buena calidad
30-jun-15	DQO	73	Contaminada	94	Contaminada	99	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	13.6	Aceptable	14.3	Aceptable	12.7	Aceptable
	SST	52	Buena calidad	55	Buena calidad	70	Buena calidad
04-ago-15	DQO	96	Contaminada	114	Contaminada	135	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	15.3	Aceptable	12.9	Aceptable	11.8	Aceptable
	SST	63	Buena calidad	78	Aceptable	85	Aceptable
31-ago-15	DQO	118	Contaminada	165	Contaminada	156	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	32	Contaminada	13.3	Aceptable	15.4	Aceptable
	SST	45	Buena calidad	80	Aceptable	77	Aceptable
05-oct-15	DQO	40	Aceptable	50	Contaminada	130	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	15.5	Aceptable	19.2	Aceptable	18.5	Aceptable
	SST	72	Buena calidad	42	Buena calidad	60	Buena calidad
03-nov-15	DQO	98	Contaminada	111	Contaminada	112	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	17.4	Aceptable	14.5	Aceptable	12.8	Aceptable
	SST	63	Buena calidad	98	Aceptable	83	Aceptable
30-nov-15	DQO	96	Contaminada	121	Contaminada	144	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	21.5	Aceptable	15.1	Aceptable	15.4	Aceptable
	SST	63	Buena calidad	80	Aceptable	92	Aceptable
11-ene	DQO	95	Contaminada	131	Contaminada	139	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	12.6	Aceptable	18.3	Aceptable	21.9	Aceptable
	SST	35	Buena calidad	54	Buena calidad	70	Buena calidad
08-feb-16	DQO	48	Contaminada	116	Contaminada	121	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	16.3	Aceptable	25.2	Aceptable	27.6	Aceptable
	SST	17	Buena calidad	60	Buena calidad	59	Buena calidad

15-mar-16	DQO	87	Contaminada	141	Contaminada	122	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	34.3	Contaminada	44.7	Contaminada	26.4	Aceptable
	SST	45	Buena calidad	98	Aceptable	55	Buena calidad
11-abr-16	DQO	50	Contaminada	68	Contaminada	52	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	11.9	Aceptable	11.1	Aceptable	12.5	Aceptable
	SST	23	Buena calidad	38	Buena calidad	45	Buena calidad

### 8.5.2 Lago Mayor

En el Lago Mayor (Tabla 15), los niveles de DQO se registraron entre 24 y 126 mg L<sup>-1</sup>, es decir, se puede clasificar desde “aceptable” (8% del año) a “contaminada” (92% del año) y los valores de la DBO<sub>5</sub> se encontraron entre 9.1 y 34.9 mg L<sup>-1</sup>, clasificando al Lago Mayor como “aceptable” (entre el 83 % y el 100 % del año) hasta “contaminada” (17% del año).

En cuanto a los SST se registraron entre 20 y 88 mg L<sup>-1</sup>, es decir, de “excelente” (17%), “buena calidad” (entre el 67 % en el sitio 5 y el 83 % en el sitio 4) y “aceptable” (33% del año).

**Tabla 16.** Clasificación del Lago Mayor por cada sitio de estudio de acuerdo a las concentraciones de DQO (mg L<sup>-1</sup>), DBO<sub>5</sub> (mg L<sup>-1</sup>) y SST (mg L<sup>-1</sup>).

Fecha	Indicador	Sitio 4		Sitio 5	
		Resultado	Clasificación	Resultado	Clasificación
05-may-15	DQO	160	Contaminada	144	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	16	Aceptable	18.8	Aceptable
	SST	25	Excelente	68	Buena calidad
02-jun-15	DQO	70	Contaminada	120	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	12.2	Aceptable	13.2	Aceptable
	SST	35	Buena calidad	62	Buena calidad
30-jun-15	DQO	24	Aceptable	80	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	9.1	Aceptable	9.8	Aceptable
	SST	20	Excelente	77	Aceptable
04-ago-15	DQO	84	Contaminada	89	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	12.1	Aceptable	11.5	Aceptable
	SST	53	Buena calidad	70	Buena calidad
31-ago-15	DQO	93	Contaminada	126	Contaminada

	DBO <sub>5</sub>	33	Contaminada	10.2	Aceptable
	SST	40	Buena calidad	88	Aceptable
05-oct-15	DQO	50	Contaminada	85	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	24.5	Aceptable	21.5	Aceptable
	SST	58	Buena calidad	50	Buena calidad
03-nov-15	DQO	64	Contaminada	68.5	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	14.1	Aceptable	15.3	Aceptable
	SST	31	Buena calidad	43	Buena calidad
30-nov-15	DQO	62.5	Contaminada	64	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	21.2	Aceptable	18.9	Aceptable
	SST	39	Buena calidad	44	Buena calidad
11-ene	DQO	68	Contaminada	73.5	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	14.4	Aceptable	17.7	Aceptable
	SST	29	Buena calidad	23	Aceptable
08-feb-16	DQO	63	Contaminada	27	Aceptable
	DBO <sub>5</sub>	34.9	Contaminada	22.6	Aceptable
	SST	32	Buena calidad	22	Aceptable
15-mar-16	DQO	109	Contaminada	70	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	29.1	Aceptable	15.2	Aceptable
	SST	45	Buena calidad	43	Buena calidad
11-abr-16	DQO	74	Contaminada	80	Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	10.6	Aceptable	14.9	Aceptable
	SST	43	Buena calidad	38	Buena calidad

### 8.5.3 Lago Menor

En el Lago Menor (Tabla 16) los niveles de DQO se registraron entre 161 y 697 mg L<sup>-1</sup>, es decir, se puede clasificar desde “contaminada” (el 50% del año) a “fuertemente contaminada” (50 % en el año) y los de DBO<sub>5</sub> se encontraron entre 8.8 y 45.8 mg L<sup>-1</sup>, clasificando a las aguas del Lago Menor desde “aceptable” (75 % del año) hasta “contaminada” (25 % del año).

Por último, los SST se registraron entre 95 y 177 mg L<sup>-1</sup>, es decir, desde “aceptable” (el 50% del año) hasta “contaminada” (50% del año).

**Tabla 17.** Clasificación del Lago Menor de acuerdo a las concentraciones de DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $\text{DBO}_5$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y SST ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

Fecha	Indicador	Sitio 6	
		Resultado	Clasificación
05-may-15	DQO	276	Fuertemente Contaminada
	$\text{DBO}_5$	27.7	Aceptable
	SST	132	Aceptable
02-jun-15	DQO	188	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	17	Aceptable
	SST	117	Aceptable
30-jun-15	DQO	153	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	13.5	Aceptable
	SST	100	Aceptable
04-ago-15	DQO	161	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	19.2	Aceptable
	SST	118	Aceptable
31-ago-15	DQO	191	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	17.9	Aceptable
	SST	95	Aceptable
05-oct-15	DQO	200	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	29.7	Aceptable
	SST	107	Aceptable
03-nov-15	DQO	165	Contaminada
	$\text{DBO}_5$	8.8	Aceptable
	SST	158	Contaminada
30-nov-15	DQO	246	Fuertemente Contaminada
	$\text{DBO}_5$	20.6	Aceptable
	SST	174	Contaminada
11-ene	DQO	331	Fuertemente Contaminada
	$\text{DBO}_5$	42.1	Contaminada
	SST	177	Contaminada
08-feb-16	DQO	507	Fuertemente Contaminada
	$\text{DBO}_5$	33.7	Contaminada
	SST	165	Contaminada
15-mar-16	DQO	697	Fuertemente Contaminada
	$\text{DBO}_5$	45.8	Contaminada

	SST	320	Contaminada
11-abr-16	DQO	480	Fuertemente Contaminada
	DBO <sub>5</sub>	26.8	Aceptable
	SST	153	Contaminada

En resumen, los lagos presentaron la siguiente condición: Lago Viejo 40% aceptable, 34% contaminado y 26% de buena calidad; el Lago Mayor 39% aceptable, 33% contaminado, 25% de buena calidad y 3% excelente, y para el Lago Menor 42% aceptable, 39% contaminado y 19 % fuertemente contaminado.



## 9. Discusión

Los lagos de Chapultepec son someros con una profundidad que nunca excedió los 1.2 m. Este tipo de lagos han sido descritos como polimícticos, esto es, con circulación frecuente o continua (Wetzel, 2001); en este caso serían polimícticos cálidos continuos (Lewis, 1983), esto es, con mezcla diaria. Los tres lagos mostraron temperaturas, en general, elevadas (11.7 a 26.7 °C). González (1995) reportó valores de temperatura menores en los tres lagos: 14-19°C en el Lago Viejo, 15-21°C en el Lago Mayor y 14-19°C en el lago Menor. Comparando estos valores con los del presente estudio se puede estimar un aumento de temperatura del agua de 5.7°C en su máximo en los últimos 22 años.

De acuerdo a Hutchinson (1957), estos lagos se clasifican como tropicales ya que su intervalo de temperatura se encuentra entre 20 y 30°C. Otros cuerpos de agua que presentan características similares son, por ejemplo, el Lago Tezozomoc con valores entre 14.1 – 22.8°C (Oliva *et al.*, 2008) y el Lago de Xochimilco con valores entre 14 y 21°C (Quiroz *et al.*, 2008).

La visibilidad del disco de Secchi fue reducida en todos los lagos lo que los identifica en un estado de eutrofización con tendencia a la hipereutrofización. Esto está en estrecha relación con las grandes cantidades de fitoplancton presente, lo cual causa turbidez biogénica elevada que impide el paso de la luz (Wetzel, 2001).

Los valores de  $K_{25}$  registrados en el presente estudio (330 a 669  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) son mayores en comparación con lo reportado por González (1995), donde en un periodo anual el Lago Viejo varió de 132 a 302  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , el Lago Mayor de 170 a 332  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y para el Lago Menor de 170 a 297  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . De acuerdo a Margalef (1983) la conductividad del agua en este estudio presentó valores moderados ya que son valores por debajo de 600  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Los valores de pH han aumentado en el tiempo. González (1995) reporta para el Lago Viejo valores de pH de 7.8 a 10, para el Lago Mayor de 7 a 12.3 y para el lago Menor de 6.9 a 12.7. Sin embargo, son comparables con los obtenidos por Oliva *et al.* (2008) para el Lago Tezozomoc (6.6 – 10.3).

Las concentraciones de OD y porcentaje de saturación de OD son mayores a lo reportado previamente por González (1995), para el Lago Viejo y el Lago Mayor, ya que obtuvo valores de OD y porcentaje de saturación de 4.7 mg L<sup>-1</sup> a >15 mg L<sup>-1</sup> (límite superior de detección) y 62% a 200% en el Lago Viejo y de 8.8 mg L<sup>-1</sup> a >15 mg L<sup>-1</sup> y 131% a >200% en el Lago Mayor. Los valores de OD altos en la superficie se asocian a la actividad fotosintética intensa, en tanto que los valores bajos en el fondo, se pueden asociar a la degradación de la materia orgánica (Wetzel, 2001).

Con respecto a los nutrientes estos lagos presentan altas concentraciones, lo que ha sido descrito por diferentes autores para otros lagos urbanos. Por ejemplo, en el lago Tezozomoc, clasificado como hipertrófico, Oliva *et al.* (2008) obtuvieron concentraciones de N-NH<sub>3</sub> (0.2 y 5.0 mg L<sup>-1</sup>) similares a los lagos en estudio (0.02 – 5.9 mg L<sup>-1</sup>). Por otro lado, las concentraciones de N-NO<sub>2</sub> (0 y 0.16 mg L<sup>-1</sup>) y N-NO<sub>3</sub> (0 y 5.9 mg L<sup>-1</sup>) son menores, en comparación con el presente estudio (N-NO<sub>2</sub> entre 0.004 y 2.4 mg L<sup>-1</sup>; N-NO<sub>3</sub> (entre 1.3 y 10.4 mg L<sup>-1</sup>). En cuanto a las concentraciones de PSR (0.4 y 6.48 mg L<sup>-1</sup>) Tezozomoc presenta valores altos, en comparación con Chapultepec (0.02 y 0.6 mg L<sup>-1</sup>).

En Xochimilco, Benítez *et al.* (2014) obtuvieron concentraciones de N-NO<sub>3</sub> entre 0.073 a 0.108 mg L<sup>-1</sup>, de N-NO<sub>2</sub> entre 0.004 a 0.009 mg L<sup>-1</sup> y de P-Total entre 4.1 a 7.4 mg L<sup>-1</sup>. Comparando estos valores con los obtenidos en este trabajo, se observa que las concentraciones de los nutrientes entre estos 3 lagos son similares, lo que se puede atribuir a las aguas tratadas que alimentan a los lagos. El Lago Tezozomoc es alimentado por la planta de tratamiento “El Rosario” (Sánchez *et al.*, 2007) y el Lago de Xochimilco es alimentado por las plantas de tratamiento del cerro de la Estrella y de San Luis Tlaxialtemalco (Márquez, 2007). Sin embargo, los Lagos de Chapultepec presentaron concentraciones más elevadas de nitrógeno, en comparación con Tezozomoc y Xochimilco, que presentan concentraciones más elevadas de fósforo.

Comparando los valores obtenidos en este trabajo con estudios realizados anteriormente en estos lagos (p.e. Alcocer, 1988; Flores, 1991), se observa que las concentraciones de nitrógeno han aumentado, en tanto que las concentraciones de fósforo han disminuido.

**Tabla 17.** Comparación entre valores de parámetros físico-químicos del presente trabajo con lagos urbanos.

<b>Autores</b>	<b>González, 1995</b>	<b>Oliva et al., 2008</b>	<b>Benítez et al., 2014</b>	<b>Alcocer, 1988</b>	<b>El presente trabajo</b>
<b>Lagos</b>	Lagos de Chapultepec	Tezozomoc	Xochimilco	Lago Viejo de Chapultepec	Lagos de Chapultepec
<b>Parámetro</b>					
<b>Temperatura (°C)</b>	14 - 21	14.1 - 22.8	21.8 - 20.6	-	11.7 - 26.7
<b>OD (mg L<sup>-1</sup>)</b>	4.7 - >15	0.1 - 18.6	4.25 - 7.05	-	0.5 - 24.67
<b>% Sat OD</b>	62 - >200	-	-	-	7.1 - 313.2
<b>pH</b>	6.9 - 12.7	6.6 - 10.3	8.6 - 9	-	7.23 - 11.01
<b>K<sub>25</sub> (μS cm<sup>-1</sup>)</b>	132 - 332	750 - 1106	-	-	330 - 669
<b>PRS (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	0.4 - 6.48	-	0.09 - 2.25	0.02 - 0.6
<b>P-Total (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	4.1 - 7.4	0.6 - 2.30	0.2 - 1.5
<b>N-NO<sub>3</sub> (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	0 - 5.9	0.073 - 0.108	<.01 - 7.71	1.3 - 10.4
<b>N-NO<sub>2</sub> (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	0 - 0.16	0.004 - 0.009	-	0.003 - 2.4
<b>N-NH<sub>3</sub> (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	0.2 - 5	-	0.03 - 4.45	0.02 - 5.9
<b>NID (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	1.4 - 14
<b>N-Total (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	4.8 - 24.8

Según los criterios de la OECD (1982) y el Sistema de Clasificación del Estado Trófico de Lagos Cálidos Tropicales (CEPIS, 2001), los lagos hipertróficos son aquellos con concentraciones de Clor-a superiores a 100 μg L<sup>-1</sup>. Asimismo, de acuerdo al Índice de Carlson (1977), los lagos de Chapultepec se ubican en estado eutrófico-hipereutrófico puesto que los distintos valores del índice fueron próximos a 100 (ver Tabla 4). Teniendo en cuenta los valores reportados previamente por Alcocer (1988), es evidente que los lagos se encuentran en estado hipertrófico desde hace casi tres décadas. Igualmente, estas elevadas concentraciones de Clor-a se asemejan a las reportadas por Morlán (2010) para el Lago Tezozomoc. Por todo lo anterior, el agua de los tres lagos de Chapultepec se clasifica, en general, como de “mala calidad”.

La NOM 001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma tiene como objetivo proteger la calidad del agua y posibilitar su uso. La NOM 003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las agua residuales

tratadas que se usen en servicio al público. Esta norma tiene como objetivo proteger el medio ambiente y la salud de la población. Ambas normas son generales y específicamente se refieren a valores de diversos parámetros que debe cumplir el agua que ingresa o que es aportada al cuerpo receptor. La Ley Federal de Derechos aplicable en materia de aguas nacionales establece también valores máximos permisibles de contaminantes que ingresen a un sistema acuático. Sin embargo ninguna de las tres se refiere a las características propias de los cuerpos acuáticos mismos.

En este trabajo se evaluaron parámetros físico-químicos del agua de los lagos, es decir, del sistema receptor y aunque las NOMs y la LFD no son estrictamente aplicables en este sentido, al realizar dicha evaluación se puede observar que los tres lagos se encuentran fuera de los límites permisibles en algunas de las variables consideradas tal y como se menciona a continuación.

En el caso de los SST, la NOM-001 y LFD (para límites máximos de contaminantes básicos), establecen  $40 \text{ mg L}^{-1}$  como máximo permisible, registrándose que en el Lago Viejo el sitio 1 estuvo un 58% del año sobre este límite, el sitio 2 un 91% y el sitio 3 el 100% del tiempo. El Lago Mayor (sitio 4) un 33% y 75% (sitio 5) y el Lago Menor un 100% del año también se encontraron sobre este límite establecido. Para la NOM-003-SEMARNAT-1997 el Lago Viejo y el Lago Menor estuvieron el 100% del año sobre los límites permisibles ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) y el Lago Mayor estuvo un 91% (sitio 4) y 100% (sitio 5) del año con valores sobre los límites permitidos.

Para los  $\text{DBO}_5$ , de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1997 y a la LFD, el sitio 3 del Lago Viejo y el sitio 5 del Lago Mayor son los únicos sitios que sí cumplen con los  $\text{DBO}_5$  todo el año. En los otros sitios, en el Lago Viejo el sitio 1 estuvo un 16% del año con valores sobre el límite permisible ( $30 \text{ mg L}^{-1}$ ) y el sitio 2 un 8 % sobre el límite. En el Lago Mayor el sitio 4 estuvo un 16% del año bajo la misma situación y el Lago Menor un 25% del año. En la NOM-003-SEMARNAT el Lago Viejo estuvo el 25 % del año con valores sobre el límite permisible ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) en los tres sitios, el Lago Mayor con el 41% del año en el sitio 4 y con el 16% en el sitio 5, el Lago Menor con el 58% del año.

De acuerdo a la LFD en materia de calidad de agua, el fósforo total es el parámetro que menos cumple con los límites máximos permisibles en los dos tipos de uso, ya que estuvo 100% del año sobre el límite permisible en todos los sitios ( $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  para uso público y  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$  en protección de vida acuática). El pH estuvo 100% del año sobre el límite permisible (6.5-8.5) en los sitios

2 y 3 del Lago Viejo, sitio 5 del Lago Mayor y el sitio 6 del Lago Menor, para el sitio 1 del Lago Viejo estuvo 83% del año y para el sitio 4 del Lago Mayor estuvo 66% del año sobre el límite en el uso de protección a la vida acuática, mientras que para el uso público, el pH estuvo 100% sobre el límite permisible (6.0-9.0) en los sitios 2 y 3 del Lago Viejo y sitio 6 del Lago Menor, para el sitio 1 del lago viejo estuvo un 50% del año, el sitio 4 un 16% del año y el sitio 5 un 91% del año.

Para los SST, de acuerdo a la LFD en materia de calidad de agua para uso público, el Lago Viejo estuvo 41% en el sitio 1, 83% en el sitio 2 y 100% en el sitio 3 del año sobre los límites permisibles ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ), el Lago Mayor estuvo un 16% en el sitio 4 y 41% del año en el sitio 5 y el Lago Menor estuvo 100% del año. En el caso de protección a la vida acuática, para el sitio 2 y 3 del Lago Viejo estuvieron 100% del año sobre el límite permisible ( $30 \text{ mg L}^{-1}$ ), al igual que el sitio 6 del Lago Menor, el Lago Mayor estuvo un 75% del año en el sitio 4 y 84% en el sitio 5, el sitio 1 del Lago Viejo estuvo 75% del año sobre los límites permisibles. En el caso de los nitratos y nitritos en uso al público, para el primero, el sitio 2 y 3 del Lago Viejo y el sitio 6 del Lago Menor si cumplieron con el límite en todo el año, sin embargo, el sitio 1 del lago viejo estuvo 8% del año sobre los límites permisibles ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ ) y en el Lago Mayor el sitio 4 estuvo 91% del año y el sitio 5 estuvo 66% del año. Los nitritos, para el Lago Viejo estuvo 100% del año en el sitio 1, 66% del año en el sitio 2 y 34% del año en el sitio 3 sobre el límite permisible ( $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ), el Lago Mayor estuvo 91% en el sitio 4 y 100% del año en el sitio 5, el Lago viejo estuvo 34% del año sobre los límites.

De acuerdo con las tablas del ICA (CONAGUA, 2003), los tres lagos se encontraron “contaminados”, presentando una contaminación orgánica. Basándose en la DQO, el lago más afectado es el Lago Menor, ya que alcanzó niveles de “fuertemente contaminado”. De

acuerdo a los valores de la DBO<sub>5</sub>, el estado en los tres lagos alcanzó la categoría de “contaminado”.

Habiendo establecido que las NOMS y la LFD no se refieren específicamente a las características del cuerpo de agua receptor, se utilizó, además, el “Acuerdo CE-CCA-001/89” por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad de aguas para calificar a los cuerpos de agua como aptos para su uso, como fuente de abastecimiento de agua potable en actividades recreativas o para la protección de la vida acuática. Este acuerdo, si bien entrega valores de diversos parámetros, estos son considerados para uso recreativo de contacto primario, siendo los lagos de Chapultepec de contacto secundario. Además no evalúa los parámetros investigados en este trabajo, excepto nitrógeno amoniacal (0.06 mg L<sup>-1</sup>) y OD (5 mg L<sup>-1</sup>), valores que también son excedidos por estos lagos.

Si se comparan estos valores con los reportados por Alcocer (1988), se observan cambios que se han presentado a través del tiempo. Sin embargo, es importante aclarar que desde aquel entonces, los Lagos de Chapultepec no cumplían con los parámetros de calidad de agua requeridos.

## **10. Conclusiones**

1. Los diversos parámetros físico-químicos registrados en los tres lagos de Chapultepec, como una elevada concentración de OD, sobresaturación superficial, elevado pH, reducida visibilidad del disco Secchi, elevada concentración de nutrientes y elevadas concentraciones de clorofila-a, los caracterizan como lagos hipereutróficos.
2. El Índice de Estado Trófico evidencia que los lagos de Chapultepec se encuentran en un estado que va de eutrófico a hipereutrófico.
3. Durante todo el periodo de muestreo, el lago más afectado fue el Lago Menor ya que de acuerdo a la Ley Federal de Derechos, a las NOMs y al ICA presentó fuerte contaminación.
4. Con base en la LFD en los límites máximos de contaminantes básicos, la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, las concentraciones de DBO y SST

sobrepasan los valores en las seis estaciones de muestreo, con excepción el sitio 3 y 5 para la DBO<sub>5</sub> de la NOM-001 y la LFD, por lo tanto, el incumplimiento de los dos parámetros hace que el agua no sea apta para el uso público.

5. El agua de los Lagos de Chapultepec superan los límites máximos permisibles establecidos en las NOMs, en la LFD y en el Acuerdo CE-CCA-001/89 para el uso recreativo al que están destinados.

## **11. Recomendaciones**

1. El grado de contaminación de los lagos de Chapultepec es preocupante, ya que afecta de forma negativa al ecosistema, al igual que a su función recreativa al emanar olores desagradables y presentar un aspecto no placentero. Se recomienda rehabilitar el lago y esto puede lograrse complementando el sistema de tratamiento de aguas a terciario para remover el alto contenido de nutrientes.

2. Debido a que las NOMs establecen valores de contaminantes en las descargas de agua que se vierten en los cuerpos acuáticos y no en los cuerpos acuáticos mismos, se recomienda el desarrollo de normas específicas para los cuerpos receptores con base en el uso que se pretende darles.

## 12. Referencias

- Abarca F. 2010. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/libros/533/tecnicas.pdf>.
- Alcocer J., Lugo A., Vilaclara G., Sánchez M. y M. Chávez. 2007. Los lagos de Chapultepec, Ciudad de México. Las aguas interiores de México: conceptos y casos, AGT Editor, S.A. Pp: 115-124.
- Alcocer J. 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del lago Viejo de Chapultepec. Contam. Ambient. 4: 43-56.
- APHA (American Public Health Association). 2012. American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA. Washington. 1,496 p.
- Arar E. J., y G. B. Collins. 1977. Method 445.0: In vitro determination of chlorophyll *a* and pheophytin *a* in marine and freshwater algae by fluorescence. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory.
- Benítez M., Zamora M., Castellanos M., Garza G., Contreras R. y J. Flores. 2014. Determinación de la biomasa de una comunidad zooplanctónica, en el canal Nacional de Cuemanco, Xochimilco. Revista Digital E-Bios. Universidad Autónoma Metropolitana. 14 p.
- Bolívar C. 2013. Chapultepec: Paseo de fin de siglo, una experiencia decimonónica. México D.F. Tesis de maestría, Universidad Iberoamericana. 115 p.
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS 1981-1990.
- Chapra S. C. 1997. Surface Water quality modeling. McGraw-Hill Companies. 276-283 p.
- Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography 22:361-369.



- CONAGUA. 2003. Indicadores de calidad de agua. <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=63&n3=98&n4=98>
- CONAGUA. 2009. Semblanza histórica del agua en México. México D.F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 82 p.
- Cruz M. y M. Martínez. 1999. Respuesta fotosíntesis-irradiación del nanoplancton de dos ecosistemas urbanos. *Rev. Biol. Trop.* 47(1): 37-42.
- Déniz F. 2010. Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub> y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa. Tesis doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Departamento de ingeniería eléctrica. 190 p.
- Del Valle I. 2011. Cervantes de Salazar y las fundaciones en falso de la ciudad de México. *Literatura Mexicana XXII* 1: 31-56.
- DGN (Dirección General de Normas). 2015. <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/catalogo-mexicano-de-normas>.
- Espinoza V., Collado J., Morales J. y J. Hernández. 2012. El gran reto del agua en la Ciudad de México, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, México D.F. 191 p.
- Flores M. 1991. Contribución al conocimiento de la ictiofauna de los tres lagos de Chapultepec, México D.F. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. 79 p.
- García J., Hinojosa-Huerta O., Zamora F., Mc Intyre C., Cheong H., Shanahan S., Zhou X., Ramírez J., Glenn E. y L. López. 2009. Ciénega de Santa Clara: programa integral de monitoreo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México; Calidad del agua; 13-15.
- García-Rodríguez J., Molina-Astudillo F., Miranda-Espinoza E., Soriano-Salazar M. y M. Díaz-Vargas. 2014. Variación fitoplanctónica en un lago urbano del municipio de Cuernavaca, Morelos, México. *Acta Universitaria* 25(1): 3-11.
- González M. 1995. Estudio de la variación espacial y temporal de los ciliados planctónicos de los lagos de Chapultepec, D.F. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. 53 p.

- Guzmán M. 1989. La macro fauna béntica y su relación con la dinámica físico-química de los lagos de Chapultepec (época de lluvias), Bosque de Chapultepec, México, D.F. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, 66 p.
- HACH Company. 1993. Manual de análisis de agua. Loveland, Colorado, EEUU. 220 p.
- Hutchinson, G. E. 1957. A Treatise on Limnology. Geography, Physics and Chemistry of Lakes. Vol. 1. John Wiley and Sons, Nueva York. 1015 p.
- Jiménez B. 2011. Suministro y desalojo del agua de la ciudad de México: de los Aztecas al siglo XXI. Revista digital universitaria. 12(10): 1-17.
- Lewis Jr., W.M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. Can. Jour. Fish. Aquat. Sci. 40: 1779-1787.
- Mancini M., Crichigno S., Ortiz M. y J. Haro. 2012. Lagos urbanos: importancia, dinamismo y multiplicidad de uso. El caso del lago Villa Dalcar (Córdoba, Argentina). Instituto de Limnología. Biología acuática 27:175-189.
- Margalef R. 1983. Limnología, Barcelona, Ediciones Omega. 1010 p.
- Márquez A. 2007. Situación actual del recurso hidrológico de la cuenca de Xochimilco. Revista Las aguas interiores de México: conceptos y casos. Pp: 98-112.
- Mazzeo N., Clemente J., García-Rodríguez F., Gorga J., Kruk C., Larrea D., Meerhoff M., Quintans F., Rodríguez-Gallego L. y F. Scasso. 2002. Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. En Perfil Ambiental del Uruguay, Editorial Nordan, pp: 36-56.
- Moreno D., Quintero J. y A. López. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Instituto de Ciencias y Tecnología. 9 p.
- Morlán, M. J. 2010. Producción primaria del fitoplancton en un lago hipertrófico durante la época de sequía, México. Tesis para obtener el título de biólogo, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM, México. 61 p.
- Muro G. 1994. Contribución al conocimiento de la distribución y abundancia de los cladóceros en los tres lagos de Chapultepec, México, D.F. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. 80 p.
- Novotny, V., y H. Olem. 1994. Water Quality: prevention, identification, and management of diffuse pollution. John Wiley & Sons, New York, NY.

- OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development). 1982. Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. Paris.
- Oliva M., Rodríguez R. A., Lugo A. y R. Sánchez. 2008. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. *Hidrobiológica* 18: 1-13.
- Peña P. 1989. Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato. Comisión Nacional del Agua. 166 p.
- Quiroz F. A., Miranda A. M. G. y H. A. Lot. 2008. Estudio comparativo de algunas variables fisicoquímicas del agua en canales secundarios de Xochimilco con y sin *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach. *Polibotánica*, 25; 127-133.
- Sánchez M., Oliva M., Castillo J. y A. Lugo. 2007. Lago Urbano del parque Tezozómoc, Distrito Federal. *Revista Las aguas interiores de México: conceptos y casos*. Pp: 126-139.
- SEMARNAT. 2007. Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, 1ra edición, CNA, México.
- Smith V. H. y S. J. Bennett. 1999. Nitrogen: phosphorous supply ratios and phytoplankton community structure in lakes. *Archiv Fur Hydrobiologie* 146:37-53.
- Seoáñez M., Ladaria P., Bellas E., Campos A., Berrocal M. y P. Seoáñez. 2001. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Ediciones mundi-prensa. Madrid, España. 395 p.
- Tovar L. y S. Alcántara. 2002. Los jardines en el siglo XX, el viejo Bosque de Chapultepec. *Arqueología Mexicana*. 10 (57): 56-61.
- Vallentyne J. 1974. The algal bowl: Lakes and man. Environment Canada, Vancouver. 186 p.
- Valderrama J. C. 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry* 10: 109-122 p.
- Wetzel R. 2001. *Limnology; lake and river Ecosystems*, Londres, Academic Press, 1006 p.
- Wetzel R. y Likens. 2000. *Limnological Analyses*. Springer, New York.