

EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LOS LAGOS DEL NEVADO DE TOLUCA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Fátima Goretti García Miranda¹

Verónica Miranda Rosales²

Isaías De la Rosa Gómez³

RESUMEN

El presente trabajo de investigación será desarrollado en los lagos: El Sol y La Luna, de la subzona núcleo "Cráter" del Área de Protección de Flora y Fauna "Nevado de Toluca". El estudio plantea como objetivo mostrar las principales características de los lagos del cráter, con el fin de identificar su estado trófico en las cuatro estacionalidades del año 2018, aplicando el "índice del estado trófico" propuesto por Carlson 1977. Así mismo, se aplicarán los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para mostrar de manera gráfica el comportamiento de los lagos en el periodo seleccionado, ya que, de acuerdo al Instituto Nacional de Antropología e Historia (2009) la transparencia del lago El Sol, ha disminuido, pues a finales de la década de 1970 se podía avistar claramente el fondo del lago a pesar de ser más profundo que La Luna. Por esta razón, es importante identificar el estado de los lagos para obtener el comportamiento y los factores que influyen en ellos. Para identificar las condiciones determinantes, se requiere inspeccionar la dinámica limnológica actual de los lagos mediante el establecimiento de un programa de monitoreo con el reconocimiento de un ciclo anual, el cual será representado cartográficamente mediante las herramientas brindadas por los SIG, para lograrlo, se recolectarán quincenalmente muestras de agua de ambos lagos, se analizarán para obtener la caracterización físico - química de cada lago. Con el análisis de cada una de las variables, será posible representar el estado trófico y variación temporal de cada uno. De igual manera, se

¹ Licenciada en Ciencias Ambientales, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, UAEM, goretti.gm25@gmail.com.

² Dra. en U. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México, UAEM. Calle Matamoros Sur S/N. Col Universidad. C.P: 50150, Toluca, Estado de México, veronicmiranda@yahoo.com.mx.

³ Dr. en C. en Ing. Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca, ITT. Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista. C.P: 52149, Metepec, Estado de México, kivoladelarosa@yahoo.com

identificarán las características naturales y antropogénicas que influyen en el estado de estos, obteniendo un mapa por cada variable considerada durante el periodo 2018. Finalmente se realizará un aporte sobre información ordenada, comparable y de utilidad para el diseño de políticas de gestión de la subzona núcleo.

PALABRAS CLAVE: Eutrofización, SIG, Lagos

Introducción

En México y específicamente en la zona centro se localizan las ciudades con el mayor número de habitantes, teniendo como amenaza la falta de agua para uso humano. Esta población se abastece de agua principalmente de las Sierra Nevada, Sierra de la Cruces, El Chichinautizin y las zonas montañosas que componen el volcán Nevado de Toluca (INAH, 2009).

De acuerdo con un estudio realizado por Franco *et al.* (2009), el Nevado de Toluca no cuenta con una amplia oferta de recursos turísticos. Sin embargo, existe una ruta tradicional de visita con cuatro sitios, los cuales constituyen las principales áreas de concentración para la práctica de actividades recreativo-turísticas: La puerta, El Mapa, el Parque de los Venados y el Cráter; siendo este último el atractivo más reconocido por sus dos lagos (Osorio *et al.*, 2011).

En el interior del cráter del Nevado de Toluca se encuentra el domo de lava conocido como El Ombligo, el cual fue producido inmediatamente después de la última gran erupción del Nevado de Toluca, ocurrida hace 10,500 años. Este domo separa a los dos lagos conocidos como El Sol y La Luna, que se hallan a una elevación de 4200 msnm, siendo los lagos perennes más altos del territorio nacional ocupando el lugar 32 entre los lagos más altos del mundo, la problemática que tienen estos lagos son los visitantes con cifras que alcanzan hasta 8 mil personas al mes en temporada alta, siendo un factor de alteración para el lugar (INAH, 2009).

Por esta razón, la importancia de realizar este estudio en los Lagos del nevado de Toluca reside en que en México sólo existen dos lagos de alta montaña (por arriba de los 3,800 m snm), a altitudes en las que la temperatura media de verano es menor a los 10°C, lo cual los vuelve únicos en su tipo en el caso de México (DOF, 2010).

Entre los problemas ambientales de lagos y embalses, la eutrofización es uno de los más frecuentes. Este fenómeno, se define como un proceso de deterioro de la calidad del recurso, se origina por el enriquecimiento de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo presentes en los ríos y lagos, estos nutrientes son de gran importancia a la cadena alimentaria, mientras que cuando se descargan a altas concentraciones en aguas superficiales y asociadas a las buenas condiciones de luminosidad, provocan el enriquecimiento del medio, fenómeno que se denomina eutrofización (Barreto et al., 2013), condicionando la utilización de los mismos y ejerciendo grandes impactos ecológicos, sanitarios y económicos a escala regional (Ledesma et al., 2013).

Entre las alteraciones que ocurren en la calidad de las aguas se destaca el proceso de eutrofización (Batista et al., 2014), la cual, es un fenómeno natural al que tienden los lagos durante su evolución, sin embargo, hoy en día el ritmo se ve acelerado por intervención humana (descarga de nutrientes, aumento de erosión), la cual se define como eutrofización cultural (Martino, 1989), esta, ocurre de forma acelerada con un aumento desordenado de la producción de biomasa fitoplanctónica, provocando un desequilibrio ecológico (Bem, Borba y Azevedo, 2013).

Entre los males causados por la eutrofización se destacan la proliferación acelerada de macrófitas acuáticas y algas que pueden producir sustancias tóxicas nocivas para la salud. (Barreto et al., 2013). Las proliferaciones de algas nocivas y las aguas turbias se han convertido

en una vista común en muchas partes del mundo, la biodiversidad acuática está disminuyendo y la hipoxia¹ y las zonas muertas en zonas costeras y lagos se han expandido rápidamente en las últimas décadas (Withers et al., 2014).

Smith & Schindler (2009), destacaron a la eutrofización como el mayor problema de la actualidad en cuerpos de agua superficiales, considerada como uno de los ejemplos más visibles de los cambios ocasionados por el hombre a la biosfera. Los autores afirman que la eutrofización es la condición que favorece el desarrollo de floraciones de cianobacterias y microalgas, secundada por las condiciones de luz, temperatura y pH convenientes (Barreto et al., 2013).

Sin embargo, el impacto de la eutrofización puede diferir en cuerpos de agua más pequeños, como estanques y pequeños lagos, que generalmente apoyan niveles naturalmente altos de nutrientes en las tierras bajas (Rosset et al., 2014).

Los ecosistemas de agua dulce, estuarios y marinos han sido degradados, pero las aguas dulces son particularmente vulnerables porque están siendo explotadas. Las señales de la eutrofización varían en diferentes tipos de cuerpos de agua, pero es el crecimiento excesivo de malezas acuáticas y fitoplancton (aguas turbias), floraciones de algas dañinas (tóxicas) y efectos en las poblaciones de peces que causan mayor preocupación pública (Withers et al., 2014).

Es por esto que la ciencia busca explorar enfoques "constructivistas" más inclusivos que, en el caso del manejo de la eutrofización, puedan involucrar a una comunidad amplia para entender mejor los temas, ayudar en la recolección de datos, compartir evidencia, identificar prioridades y desarrollar soluciones integradas (Jarvie et al., 2013).

Derivado de esto, es de suma importancia conocer el comportamiento del estado trófico en los lagos del nevado de Toluca, identificando los factores naturales y antropogénicos que influyen en ellos, apoyándose en nuevas tecnologías como son los Sistemas de Información Geográfica, los cuales serán de apoyo para lograr representar de manera gráfica el comportamiento a lo largo del periodo establecido y así poder tener de manera gráfica información que facilite identificar el comportamiento de los lagos con diferentes variables naturales y antropogénicas.

¹ **Hipoxia:** concentraciones bajas de oxígeno (IIEH, 2015).

Aspectos generales

1. Cráter del Nevado de Toluca

A pesar de que el nevado de Toluca no presenta actividad volcánica perceptible, desde siempre ha llamado la atención, tanto de personas en general como de científicos. La morfología del cráter es muy compleja y es el resultado de la gran cantidad de erupciones y de eventos tectónicos que han modelado su fisonomía. En el cráter resalta la presencia de varios picos; el más alto de éstos se conoce como Pico El Fraile, que es un remanente de un domo de lava parcialmente destruido por las mismas erupciones del Nevado. El cráter actual es de forma alargada en dirección este-oeste, con dimensiones de 2 x 1.5 km; está abierto hacia el este y tiene forma de herradura (ver imagen 1).

Imagen 1. Fotografía del cráter tomada desde el pico del fraile.



Fuente. Boneta, sf; citado en INAH, 2009.

1.1 Lagos del Nevado de Toluca

Dentro del cráter del Nevado de Toluca se encuentran los lagos denominados: El Sol y La Luna, los cuales son considerados lagos astáticos, lo que significa que cambia su forma a lo largo del año y de un año a otro, debido al balance entre la precipitación y la evaporación. No existe un registro continuo de la fluctuación del nivel de los lagos; sin embargo, Velázquez de León, tesorero del Estado de México, calculó que la profundidad del lago El Sol era de entre 10 y 14 m en 1835, valor no muy alejado de los 11- 12 m registrados en 2007 y ligeramente inferior al máximo medido, de 15 m, registrado en 1980. Ambos son lagos de alta montaña o alpinos, ya que se localizan por encima del límite de crecimiento arbóreo. Esta demarcación depende principalmente de las condiciones climáticas presentes en cada región (como lo es la temperatura y humedad), más que de una altitud en particular. Las aguas de estos dos lagos

son frías; las temperaturas más elevadas ($\approx 11^{\circ}\text{C}$) se dan en la época cálida de lluvias, y las más bajas en el seco invierno ($\approx 4^{\circ}\text{C}$) (Alcocer, 1980; citado en INAH, 2009).

Imagen 2. Aspecto del cráter con sus lagos: izquierda, lago La Luna; a un costado, en color blanquisco, un cuerpo de agua temporal que se denomina La Estrellita; a la derecha, de mayor tamaño, El Sol (Michael Calderwood citado en INAH, 2009).



Una problemática presente en el Lago El Sol, es que en sus aguas se encuentra la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), dicha especie fue introducida, la cual, podría acelerar el cambio en sus condiciones naturales.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de los lagos El Sol y La Luna

Parámetro	El Sol	La Luna
Longitud máxima (m)	795 NNE-SSW	227 WSW-ENE
Ancho máximo (m)	482	209
Volumen (m ³)	1,436,100	129,865
Área superficial (m ²)	237,321	31,083
Perímetro (km)	3.68	0.67
Profundidad máxima (m)	15	10
Profundidad media (m)	6	5
Fuente. (Alcocer, 1980; citado en INAH, 2009)		

El color de los cuerpos acuáticos depende de las sustancias disueltas en el agua, así como de las partículas suspendidas en ella. La luz es absorbida diferencialmente –unos colores más que otros– por estas sustancias; los lagos más transparentes son azules, mientras que los turbios

son verdes o cafés. De acuerdo con la Escala de Forel-Ule, el color del Lago El Sol varía de azul-verde a azul (V a VIII), según la época del año; y el de La Luna predomina el azul (IV a V) (INAH, 2009).

2. Índice del Estado trófico

Propuesto en 1977, ha sido uno de los primeros índices propuestos para sistemas lacustres; el cual con base en la utilización del Disco de Secchi se obtiene la transparencia del agua a través de la columna de agua del lago. Esta transparencia determina el nivel de refracción de la luz a través de la turbidez y el color que presenta el volumen de agua, por efecto de descargas de sólidos (suspendidos, volátiles o sedimentables) o por la formación de sistemas coloidales o soluciones complejas (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015).

Con el fin de evaluar la eutrofización, además del monitoreo de las concentraciones de nutrientes y de biomasa, se han desarrollado diversos índices que relacionan el estado de eutrofización con las concentraciones de esos elementos (Bem, Borba y Azevedo, 2013), como el “Índice del estado trófico” propuesto por Carlson (1977), el cual considera que el índice ideal es aquel que preserva las ventajas de ser multidimensional y conserva la simplicidad del unidimensional (Moreno-Arbeláez and Ramírez-Restrepo, 2010).

El índice del estado trófico puede ser una herramienta valiosa para la gestión de los lagos, pero también es una herramienta científica válida para investigaciones en las que es necesario un estándar objetivo del estado trófico (Carlson, 1977).

El índice de estado trófico de Carlson se calcula con las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones del Índice de estado trófico:

$$IETDS = 10 \left(6 - \frac{\ln(DS)}{\ln(2)} \right)$$

IETDS: Índice de estado trófico de Carlson Disco Secchi.

$$IETCl. "a" = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln(Cl. "a")}{\ln(2)} \right)$$

IETCl. "a": Índice de estado trófico de Carlson clorofila "a"

$$IET Promedio = \frac{IETDS + IET Cl. "a"}{2}$$

IET Promedio: Índice de estado Trófico de Carlson promedio.

Cada uno de los valores resultantes de la aplicación de las ecuaciones varía en una escala de cero a cien (ver tabla 2) (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015).

Tabla 2. Criterios de aplicación del IET	
Valor	Categoría Trófica
<30	Ultraoligotrófico
30-44	Oligotrófico
44-54	Mesotrófico
54-74	Eutrófico
>74	Hipereutrófico
Fuente. (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015)	

3. Eutrofización

De acuerdo con Margalef (1974), en los ecosistemas acuáticos, particularmente en los lagos de agua dulce, se observa un componente secular de la sucesión. En donde el sistema va cambiando lentamente, a través de los ciclos anuales, como resultado de la interacción entre el lago y los ecosistemas terrestres circundantes, intensificada por la acción del hombre. Este fenómeno es conocido como eutrofización (Martino, 1989).

La eutrofización es reconocida como uno de los problemas de calidad del agua de mayor importancia en la actualidad. Un factor revelador de estos problemas endémicos de la sociedad

es el enriquecimiento de las aguas interiores y costeras con los aportes antropógenos de nitrógeno (N) y fósforo (P) (Withers et al., 2014).

De acuerdo con diferentes autores, existe un grupo de características morfométricas (profundidad, margen de la cuenca, entre otras), químicas (oxígeno hipolimnético y nutrientes) y biológicas (productividad, biomasa, especies indicadoras) que permiten evaluar los efectos de las variaciones en los estados tróficos (Moreno-Arbeláez y Ramírez-Restrepo, 2010).

Actualmente, la eutrofización es reconocida como uno de los problemas más importantes referentes a la calidad del agua, convirtiéndola en una extensa amenaza para numerosos lagos en todo el mundo (Janssen et al., 2017).



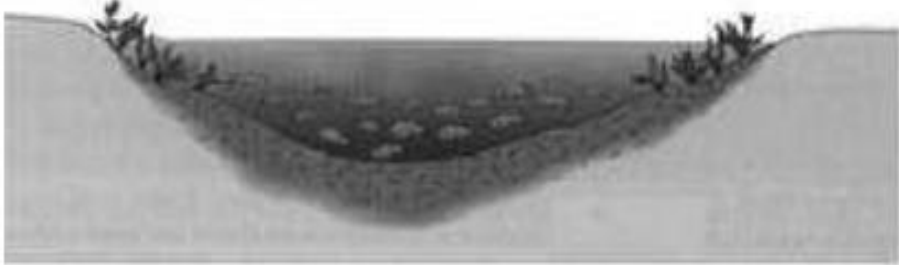
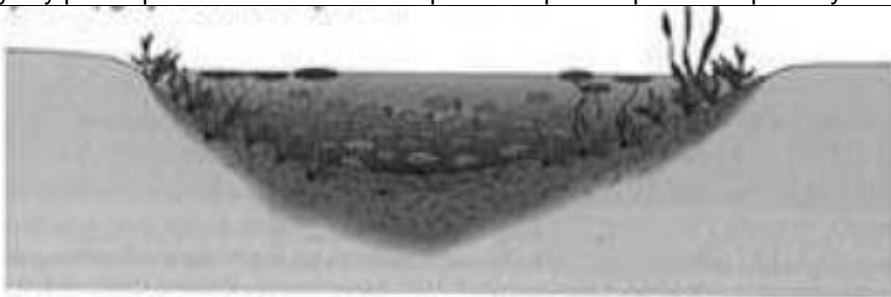
4. Eutrofización, problema actual en lagos

Conocer la calidad del agua disponible es fundamental para la gestión de los recursos hídricos, para ello, se hace necesario el monitoreo sistemático, que resulta en series temporales de datos que permiten evaluar la evolución de la calidad del cuerpo acuático y conocer las tendencias de su variación (Barreto et al., 2013).

Los lagos son la principal fuente de agua dulce continental, y la eutrofización de estos se está convirtiendo en un problema ambiental cada vez más grave. El proceso de degradación de los cuerpos hídricos se vuelve un problema cada vez más frecuente, lo que viene despertando el interés de varios investigadores (Batista et al., 2014).

En los últimos años, el control de la eutrofización de los lagos se ha convertido en una tarea urgente en el campo de la protección de los recursos hídricos y la gestión de la seguridad del agua. En estas circunstancias, el control eficaz de la eutrofización requiere la evaluación

razonable de los niveles de eutrofización del lago y la identificación de los factores limitantes primarios (Wu y Wang, 2012).

Tabla 3. Criterios para definir los cuatro estados tróficos	
	
<p>Oligotrófico: Bajo nivel de productividad biológica. Agua Clara, algunas plantas acuáticas, escasos peces, flora y fauna.</p>	
	
<p>Mesotrófico: Moderado nivel de productividad, claridad de agua y plantas acuáticas.</p>	
	
<p>Eutrófico: Alto nivel de productividad, claridad de agua y buena cantidad de plantas acuáticas o poca claridad de agua y pocas plantas acuáticas. Gran potencial para soportar los peces y vida silvestre.</p>	
	
<p>Hipereutrófico: altísimos niveles de productividad biológica, muy pobre claridad del agua y abundancia de plantas acuáticas y potencial para soportar peces y vida silvestre.</p>	
<p>Fuente. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia, (Paola, Franco y Quintero, 2010).</p>	

5. Sistemas de información Geográfica

En la actualidad, existen herramientas computacionales que apoyan a la realización de estudios sobre el manejo de los recursos naturales; entre estas herramientas, destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales, permiten analizar la variabilidad espacial y temporal sobre estudios de esta naturaleza. De esta manera, los SIG son una herramienta en estudios hidrológicos – limnológicos, pues permiten, almacenar, analizar y visualizar datos e información, así como analizar el comportamiento en dimensiones espaciales y temporales (Quiroz Londoño *et al.*, 2009).

Actualmente, el proceso para determinar el estado trófico de los lagos ha tenido cambios significativos, pues en nuestros días el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han permitido la evaluación y representación del estado, a través de nuevas tecnologías. El método estudia la distribución espacial de las condiciones de eutrofia en ambientes lacustres, existe una escala de 0-100 para indicar diferentes estados tróficos en el entorno lacustre. Esta técnica se aplica para la elaboración de mapas temáticos de cada variable, las cuales, sintetizan la información de los mapas en un mapa final e ilustran la distribución espacial de las condiciones de eutrofización del área de estudio (Moreno Franco, Quintero Manzano y Lopez Cuevas, 2010).

6. Métodos

6.1 Ubicación del área de estudio

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca se localiza en el Estado de México, y comprende el volcán denominado Xinantécatl o Nevado de Toluca, el cual ocupa el cuarto lugar entre las cumbres más altas del país con una elevación de 4,680 metros sobre el nivel del mar, la cual comprende en su totalidad los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco, Calimaya,

Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec en el Estado de México, con una superficie de 53,590-67-86.28 hectáreas.

El estudio será llevado a cabo específicamente en la Subzona núcleo "Cráter", la cual cuenta con un área total de 1941.392 ha (ver ilustración 2).

Dentro de esta subzona, se encuentran los lagos: El Sol (con un área de 23.7 ha; profundidad máxima 15 metros) y La Luna (con un área de 3.1 ha. y profundidad máxima 10 metros)(Cuna et al., 2015). Dentro de esta subzona se incluyen superficies en estado de conservación, dentro de las cuales se puede realizar la colecta científica y actividades turísticas de bajo impacto ambiental. Asimismo, corresponde a sitios arqueológicos de investigación del INAH (DOF, 2010).

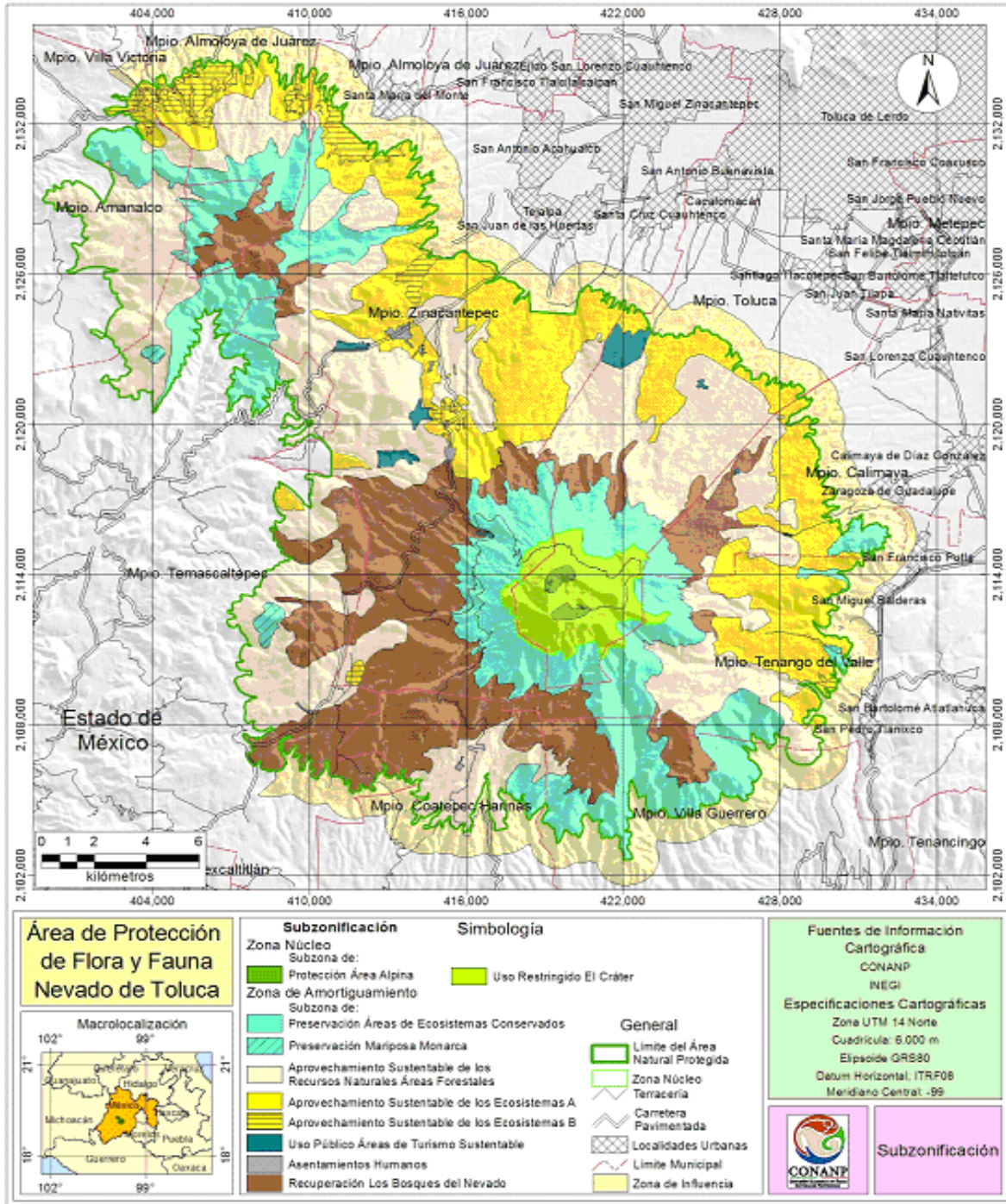


Ilustración 2. Ubicación y subzonificación del área de protección de flora y fauna nevado de Toluca, (DOF, 2010).

6.2 Ubicación de los puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo de los Lagos El Sol y La Luna, se establecerán mediante es un mapa batimétrico a nivel de 3 profundidades (Cruz-Pizarro et al., 2003) en el perfil vertical:

- Superficie ($Z = 0.1 \text{ m}$)
- Medio ($Z = Z \text{ max}/2$)
- Fondo ($Z = Z \text{ max}$)

Con base en las profundidades se marcarán los puntos mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en los lagos, con el fin de contar con puntos fijos de muestreo durante el año seleccionado, los cuales comprenderán diferentes fechas de muestreo, pero obtenidas del mismo lugar.

La periodicidad del muestreo “in situ” será cada quince días, durante las estaciones primavera, verano, otoño e invierno del año 2018. Los días en los que se pretende obtener las muestras, serán entre semana, pues es cuando existe una menor presencia de visitantes que los fines de semana, puesto que se han llevado a cabo trabajos de restauración donde se ha tratado de concientizar a los visitantes del cuidado, por esto es importante no intervenir negativamente en este proceso.

6.3 Parámetros fisicoquímicos cuantificables en la determinación del estado trófico

6.3.1 Clorofila “a”

De acuerdo con (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015), para determinar el parámetro de la clorofila “a” será necesario utilizar en método espectrofotométrico. El cual sugiere realizar la extracción del pigmento, utilizando como solvente acetona al 90%. Para el cálculo de esta variable es necesario seguir con la siguiente ecuación:

$$\text{Clorofila "a"} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\{26,7 \cdot (665A_d - 665A_a) \cdot V_1\}}{V_2 \cdot L_c}$$

Donde:

665Ad: Lectura de absorbancia a 665nm antes de la acidificación.

665Aa: lectura de absorbancia a 665nm después de la acidificación

V1: volumen de acetona utilizado en la extracción en litros.

V2: Volumen de muestra filtrado en litros.

Lc: Longitud de la celda espectrofotométrica en centímetros.

6.3.2 Transparencia de la columna de agua

La transparencia se medirá con el disco Secchi, que es un dispositivo de 20 a 30 centímetros de diámetro, dividido en cuartos, que se pintan de blanco y negro alternativamente para mejorar el contraste.

El procedimiento que se llevará a cabo es: introducir el disco en el agua dejándolo caer hasta que se pierda de vista y cuando esto suceda se marcará la profundidad. Posteriormente será necesario sumergirlo nuevamente a mayor profundidad que la anterior, hasta que este ya no sea visible, para luego regresarlo a la superficie, mientras esto sucede se deberá hacer el registro en el momento en que el disco sea visible de nuevo. Finalmente será necesario promediar la medida de las dos profundidades para obtener la transparencia medida por el disco Secchi (López Martínez y Madroñero Palacios, 2015).

6.4 Índice del Estado Trófico

El Índice del Estado Trófico (TSI) tiene como finalidad clasificar cuerpos de agua en diferentes estados tróficos, de forma confiable, este índice ha sido uno de los más ampliamente utilizados para la clasificación de lagos y reservorios (Batista et al., 2014).

Con el propósito de evaluar la variación temporal del estado trófico de los Lagos del Nevado de Toluca, es necesario realizar muestreos quincenales entre enero y diciembre del año 2018.

6.4.1 Índice de Carlson o índice de estado trófico (TSI)

Este índice utiliza como variables, la profundidad de visión del disco de Secchi (TSI_{D_s}) y las concentraciones superficiales de Fósforo Total (TSI_{P_t}) y clorofila a ($TSI_{Clorof a}$). Este índice sujeta el estado trófico de un lago a un valor (en una escala de 0 a 100) (ver tabla 4).

Si un cuerpo de agua no presenta ningún estrés antropogénico, el índice reportará un valor bajo, lo que significa que el ecosistema tiene pocos nutrientes, sedimentos o contaminantes de diferente tipo (Eraso y Galo, 2017).

Tabla 4. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua				
Estado de eutrofia	TSI	D_s (m)	P_t (mg/m ³)	Clorf α (mg/m ³)
Oligotrófico (TSI < 30)	0	64	0.75	0.04
	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
Mesotrófico (30 < TSI < 60)	40	4	12	2.6
	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
Eutrófico (60 < TSI < 90)	70	0.5	96	56
	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
Hipereutrófico (90 < TSI < 100)	100	0.06	768	1183
Relación del parámetro de eutrofización.		$\frac{TSI_{D_s}}{2}$	2 x TSI_{P_t}	$\sqrt{7.8 TSI_{Clorof \alpha}}$
Fuente. (Moreno Franco, Quintero Manzano y Lopez Cuevas, 2010)				

6.5 Sistemas de información Geográfica (SIG)

El uso de los SIG, es una herramienta que permite la determinación de la geometría de un sistema acuático, modelación de la variación de recarga en tiempo, compilación de los principales parámetros limnológicos y creación de modelos digitales de Terreno (MDT's), entre otros (Quiroz Londoño *et al.*, 2009).

Para el presente estudio el SIG utilizado para la representación cartográfica de las variables de medición y del estado trófico será la herramienta ArcMap, la cual pertenece al software ArcGis, esta herramienta permitirá capturar los datos obtenidos en la toma de muestras de los lagos, con el fin de crear una base de datos, que permita mostrar el comportamiento de cada una de las variables seleccionadas en el periodo establecido.

Una vez obtenida la base de datos y el comportamiento de cada una de las variables, la herramienta determinará la distribución espacial mediante el método de interpolación, utilizando la distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas en inglés). En la cual se interpolarán los valores totales de fósforo total (TSIPt), profundidad del Disco de Secchi (TSIDs) y la concentración de clorofila a (TSIclorf a) para obtener el estado trófico en cada uno de los lagos, por las estaciones del año 2018.

Resultados

Los resultados a obtener en la realización del estudio será una base de datos que contenga información sobre el comportamiento de cada una de las variables medidas en el periodo 2018, la cual será representada cartográficamente, con el fin de mostrar el estado trófico de los lagos del Nevado de Toluca, así como su comportamiento en diferentes temporalidades del año.

De igual manera se obtendrán diferentes tipos de mapas, tanto para la realización del análisis del estado trófico, como mapas que muestren gráficamente los resultados de cada lago en la temporalidad seleccionada.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las mediciones se obtendrá el índice del estado trófico de cada uno de los lagos y se podrá definir si este estado cambia de manera significativa o se mantiene por periodos cortos, estos resultados serán representados para primavera, verano, otoño e invierno respectivamente, con el fin de comparar el comportamiento de cada estación y poder identificar las variables que influyen en este comportamiento, esto será llevado a cabo para ambos lagos.

De igual manera se realizará un análisis entre las características naturales que se presentan en la zona, como son precipitación y temperatura, con el fin de determinar si estas influyen de manera significativa en ambos lagos, o se debe en su mayoría a la actividad antropogénica de la zona, identificando si existe correlación entre cada una de estas variables.

Finalmente se realizará un aporte en cuanto al comportamiento de los lagos, así como su estado actual, con el fin de diseñar políticas de gestión de acuerdo a las condiciones reales de los lagos y la zona núcleo del Nevado de Toluca, con el fin de tomar medidas preventivas para evitar el deterioro de la subzona núcleo del Área de Protección de Flora y Fauna, involucrando a la sociedad que visita las áreas y a los integrantes inmersos en ellas.

Conclusión

Llevar a cabo un estudio acerca del estado trófico en los lagos del nevado de Toluca es relevante ya que se aportarán datos sobre el estado actual de los lagos, así como representaciones graficas de cómo se comportan en diferentes épocas del año.

Es de suma importancia evaluar el estado trófico de los lagos del Nevado de Toluca, ya que identificando este es posible determinar si los procesos naturales influyen en el cambio, o si los factores antropogénicos son los que llevan a cabo un cambio acelerado del estado trófico de los lagos.

De igual manera, contar con bases de datos que muestren los valores de cada una de las variables del estado trófico, servirá como referencia para posteriores análisis e investigaciones en cuanto a los lagos.

Con los resultados será posible atender al objetivo cultural del Área de Protección de Flora y Fauna, donde se hace referencia a la difusión de acciones de conservación propiciando la participación activa de las comunidades aledañas que generen la valoración de los servicios ambientales, mediante la identidad, difusión y educación para la conservación de la biodiversidad que contiene.

Estudiar los lagos del Nevado de Toluca y obtener el estado actual de éstos, es de suma importancia ya que desde tiempos atrás han sido considerados de gran valor, tanto cultural como natural y su preservación debe ser considerada como algo de relevancia para el Área de Protección de Flora y Fauna “Nevado de Toluca”.

REFERENCIAS

- INAH** (2009) *Las Aguas Celestiales. Nevado de Toluca. Instituto Nacional de Antropología e Historia*. México.
- Barreto, L. V. et al.** (2013) 'Eutrofização Em Rios Brasileiros', *Enciclopédia Biósfera, Centro Científico Conhecer*, 9(16), pp. 2165–2179.
- Batista, A. A. et al.** (2014) 'Sazonalidade e variação espacial do índice de estado trófico do açude Orós , Ceará , Brasil', *Revista Agro@mbiente On-line*, 8(1), pp. 39–48. doi: 10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1362.
- Bem, C., Borba, M. y Azevedo, J.** (2013) 'Avaliação do estado trófico de um lago urbano raso', *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 10(1), pp. 41–50. doi: 10.21168/rega.v10n1.p41-50.
- Cruz-Pizarro, L. et al.** (2003) 'Estudios de diagnóstico y viabilidad en el control de la eutrofización de las lagunas de la Albufera de Adra', *Limnetica*, 22(1–2), pp. 135–154.
- Cuna, E. et al.** (2015) 'Historia Ambiental De Un Lago Alpino En El Centro De México (1230-2010)', *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 18(2), pp. 97–106. doi: 10.1016/j.recqb.2015.09.001.
- Eraso, R. J. M. y Galo, M. de L. B. T.** (2017) 'Evaluación espacio-temporal del estado trófico de un lago de grandes dimensiones usando imágenes MOD09GA', *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Universidad Militar Nueva Granada, 27(1), pp. 27–42. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91149521002> (Accessed: 25 May 2017).
- Janssen, A. B. G. et al.** (2017) 'Spatial identification of critical nutrient loads of large shallow lakes : Implications for Lake Taihu (China)', *Water Research*. Elsevier Ltd, 119, pp. 276–287. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.045.
- Jarvie, H. P. et al.** (2013) 'Phosphorus Mitigation to Control River Eutrophication: Murky Waters, Inconvenient Truths, and "Postnormal" Science', *Journal of Environmental Quality*, 304, pp. 295–304. doi: 10.2134/jeq2012.0085.

Ledesma, C. et al. (2013) 'Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina)', *Revista Ciencia Agronomica*, 44(3), pp. 419–425. doi: 10.1590/S1806-66902013000300002.

López Martínez, M. L. y Madroñero Palacios, S. M. (2015) 'Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de la cocha.', *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25–2, pp. 21–42.

Martino, P. (1989) 'Curso básico sobre Eutrofización', p. 73.

Moreno-Arbeláez, D. P. y Ramírez-Restrepo, J. J. (2010) 'Variación temporal de la condición trófica del lago del Parque Norte, Medellín (Antioquia), Colombia', *Actualidades Biológicas*, 32(92), pp. 75–87.

Moreno Franco, D., Quintero Manzano, J. y Lopez Cuevas, A. (2010) 'Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia', *ContactoS* 78, pp. 25–33.

Osorio, M. et al. (2011) 'El visitante del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. Análisis del comportamiento en un área natural protegida.', *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 76(100), pp. 56–70.

Paola, D., Franco, M. y Quintero, J. (2010) 'Métodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia', pp. 25–33.

Quiroz Londoño, O. M. et al. (2009) 'Los sistemas de Información Geográfica como herramienta en los estudios limnológicos. Caso de aplicación en un lago somero en ambiente de llanura, Provincia de Buenos Aires, Argentina.', *Gestión y Ambiente*. Medellín, 12, pp. 73–86.

Rosset, V. et al. (2014) 'Is eutrophication really a major impairment for small waterbody biodiversity?', *Journal of Applied Ecology*, 51(2), pp. 415–425. doi: 10.1111/1365-2664.12201.

Withers, P. J. A. et al. (2014) 'Agriculture and eutrophication: Where do we go from here?', *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), pp. 5853–5875. doi: 10.3390/su6095853.

Wu, F. F. y Wang, X. (2012) 'Eutrophication Evaluation Based on Set Pair Analysis of Baiyangdian Lake, North China', *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), pp. 1030–1036.

doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.096.

CEPANAF, 2017, “Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, *Comisión Estatal de Parques Naturales y de Fauna*, [En línea]. México, disponible en: http://cepanaf.edomex.gob.mx/parque_nevado_toluca [Accesado, junio de 2017]

DOF, (2010), “Resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, *Diario Oficial de la Federación*, [En línea]. México, disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/RESUMEN_NEVADO_TOLUCA.pdf [Accesado, junio de 2017].

IIEH, (2012), “Las zonas muertas, eutrofización e hipoxia”, Instituto de Investigación sobre Evolución Humana A.C, [En línea]. Disponible en: <http://ieeh.org/noticias-y-opiniones/noticias/noticias/las-zonas-muertas-eutrofizacion-e-hipoxia>. [accesado, julio de 2017].