

TRABAJO DE GRADO
Opción Pasantía en Investigación

1

Identificación del índice de estado trófico de la Laguna Champayán, México

Corporación Universitaria Remington
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental

Luis Carlos Laguna Álvarez

Tutor: Libia Liliana Julio Galvis.

Pasantía en investigación.

2026

Agradecimientos

Expreso en primera instancia mi más sincero agradecimiento a la profesora Libia Liliana Julio Galvis, por su valiosa orientación, acompañamiento constante y aportes académicos durante el desarrollo de este trabajo de grado. Su compromiso, conocimiento y disposición fueron fundamentales para la culminación exitosa de esta investigación. También agradezco al Dr. Marco y al programa Delfin por brindarme la oportunidad de hacerme partícipe del verano de investigación y por guiar la ejecución del trabajo.

De igual manera, agradezco al profesor Fernando Figueredo Negrete por sus recomendaciones, apoyo y contribuciones, las cuales enriquecieron significativamente este proceso investigativo.

A todos los mencionados, mi reconocimiento por su dedicación y por compartir sus conocimientos, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional.

Tabla de Contenido

Resumen.....	6
Palabras clave.....	7
Problemática abordada.....	8
Objetivos	10
Metodología	11
Resultados	16
Conclusiones	20
Referencias.....	21

Listado de tablas

<i>Tabla 1.</i> Clasificación del Índice de Estado Tráfico.....	15
---	----

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Proceso de excitación y emisión fluorescente de la clorofila a mediante sensores ópticos.	14
<i>Figura 2.</i> Digitalización área de estudio (Laguna Champayán)	16
<i>Figura 3.</i> Puntos de muestreo Laguna Champayán	16
<i>Figura 4.</i> Distribución horizontal de la clorofila - a.....	17
<i>Figura 5.</i> Índice de Estado Trófico para clorofila – a.....	17
<i>Figura 6.</i> Distribución horizontal de la transparencia en metros.....	18
<i>Figura 7.</i> Índice de Estado Trófico para la transparencia.....	18

Resumen

La presente pasantía de investigación tuvo como objetivo evaluar el Índice de Estado Trófico (IET) de la Laguna Champayán, ubicada en Altamira, Tamaulipas, México, para determinar su condición ambiental frente al fenómeno de eutrofización. Este proceso, asociado al incremento excesivo de nutrientes como nitrógeno y fósforo, afecta negativamente la calidad del agua y el equilibrio ecológico de los ecosistemas acuáticos, generando proliferación de algas, disminución del oxígeno disuelto y deterioro de las condiciones físicoquímicas del agua. La metodología empleada se basó en un enfoque exploratorio y descriptivo, considerando 46 puntos de muestreo distribuidos estratégicamente en la laguna, se utilizaron herramientas geoespaciales como Google Earth para la delimitación del área de estudio, así como técnicas de medición *in situ* mediante el disco de Secchi para evaluar la transparencia del agua y una sonda multiparamétrica Hydrolab DS5 para determinar la concentración de clorofila-a. Los datos recolectados fueron procesados mediante software especializado, aplicando el método de Carlson y Havens para el cálculo del IET.

Los resultados evidenciaron que la concentración de clorofila-a presentó valores entre 5.0 $\mu\text{g/l}$ y 13 $\mu\text{g/l}$, mientras que la transparencia del agua osciló entre 0.50 m y 1.0 m. A partir de estos datos, el IET para clorofila-a se ubicó entre 46 y 56, indicando un estado mesoeutrófico, mientras que el IET basado en la transparencia arrojó valores entre 60 y 70, clasificando la laguna como eutrófica. Estos resultados reflejan un sistema con niveles moderados a altos de eutrofización.

En conclusión, la Laguna Champayán presenta deterioro en la calidad del agua debido al enriquecimiento de nutrientes, lo que representa un riesgo para su biodiversidad y su uso como fuente de abastecimiento. Este estudio proporciona información relevante para la gestión ambiental y la toma de decisiones orientadas a la recuperación y conservación del ecosistema.

Palabras clave

Eutrofización, Índice de Estado Trófico, Clorofila-a, Calidad del agua.

Problemática abordada

La eutrofización es considerada un proceso mayormente de origen antropogénico que repercute de manera negativa en la calidad de los cuerpos hidrológicos, específicamente lagos, ríos y embalses, y se ha convertido en un grave problema ambiental en las zonas urbanas y las cuencas hidrográficas de los países en desarrollo de todo el mundo (Rada, 2005; Ayele & Atlabachew, 2021). Este evento se presenta cuando existe un incremento de manera excesiva en la concentración de nutrientes, como lo son el nitrógeno (Ferreira et al., 2011) y el fosforo siendo este uno de los más representativos a nivel global (Aubriot et al., 2017), principalmente pueden encontrarse de manera natural en los ecosistemas marinos y terrestres, no obstante las actividades antrópicas han hecho que estos minerales y nutrientes excedan sus niveles normales dentro de un sistema acuático, actividades como la agricultura intensiva, vertimientos de aguas residuales (Moreno, 2018) y el uso masivos de fertilizantes (Ansari et al., 2011) son algunas de ellas. Este aumento de nutrientes posibilita la existencia de organismos vivos como el fitoplancton que en entornos óptimos pueden proliferar significativamente (Sathyendranath, 2014); esto hace que la cantidad de oxígeno presente en el agua disminuya, lo que implica la defunción de muchos organismos vivos en el ecosistema eutrofizado. Por su parte, la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) se ve afectada, imposibilitando las funciones de organismos como las bacterias capaces de degradar materia orgánica residual, disminuyendo la calidad del agua relacionada con características como el color, olor, sabor, pH, conductividad, entre otros aspectos (Pranta et al., 2023).

El Parque Laguna Champayán, ubicado en Altamira, Tamaulipas, México, es un área natural protegida que alberga una fuente de agua superficial de gran valor ecológico y recreativo, abastecido por el río Tamesí, este parque no solo sirve como un refugio para diversas especies de flora y fauna, sino que también es un importante destino para actividades recreativas y ecoturismo, así como también para el abastecimiento de agua potable para uso municipal e industrial. Sin embargo, la laguna dentro del parque ha comenzado a experimentar signos de eutrofización, que está provocando serios problemas ambientales y afectación del equilibrio ecológico del área (Ansari et al., 2011), por ello es importante evaluar el estado trófico de la laguna, brindando información necesaria para argumentar y planificar acciones para el mejoramiento del sistema lagunar, así mismo mejorar las condiciones del agua en sentido de potabilización para consumo humano y uso industrial.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el Índice de Estado Trófico de la Laguna Champayán, Tamaulipas-México, a partir de parámetros como la clorofila-a y la transparencia del agua.

Objetivos específicos

- Establecer el área de estudio mediante herramientas geoespaciales, con el fin de delimitar la base cartográfica del análisis.
- Calcular el Índice de Estado Trófico para la clorofila-a y la transparencia del agua, a partir de su distribución horizontal.
- Definir la condición trófica del sistema lagunar a través del método Carlson.

Metodología

Descripción de la unidad de análisis

Puntos de monitoreo georreferenciados seleccionados en la extensión de la Laguna Champayán que comprende el Parque Laguna Champayán, ubicado en Altamira, Tamaulipas, México.

Variables

Las variables de la unidad de análisis se relacionan a continuación:

Independientes

- Concentración de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)
- Transparencia del agua (m), medida con disco Secchi

Dependientes

- Índice de Estado Trófico (IET)

Población y muestra

La población corresponde a Laguna Champayán, área que comprende el Parque Laguna Champayán, Altamira, Tamaulipas, México. La muestra comprende los 46 puntos de muestreo georreferenciados dentro del área de estudio.

Nivel de investigación

La investigación tuvo un alcance descriptivo con complemento correlacional, dado que el objetivo del estudio consiste en determinar el IET en la zona de estudio seleccionada y analizar la relación entre clorofila-a y transparencia del agua.

Diseño de la investigación

Digitalización: A través de Google Earth se delimita la zona de estudio digitalizando la ribera e islotes de la macrófita emergente, denominada localmente como tule o conocida científicamente como (*Typha domingensis*).

Muestreo: identificar puntos de muestreo representativos a lo largo de la laguna, considerando áreas de alta actividad humana, zonas naturales y posibles fuentes de contaminación realizando dos fases de muestreo. Durante la toma de muestra se deben garantizar en la medida de lo posible las condiciones de seguridad y accesibilidad.

Recolección de datos: para la captura de datos se realizaron dos fases que se aplicarán en cada punto de muestreo, las cuales están sometidas a las bases y parámetros establecidos en el método de índice de estado trófico de Carlson (Carlson & Havens, 2005) .

Fases de muestreo:

Fase 1. En cada uno de los puntos de muestreo se determinó la transparencia del agua mediante un disco Secchi bicromático (dos cuadrantes blancos y dos negros), siguiendo el procedimiento estandarizado ampliamente utilizado en estudios limnológicos y de calidad del agua (Lee et al., 2015; Donini & Piccolroaz, 2025). El disco, sujeto a una cuerda graduada, fue sumergido verticalmente hasta la profundidad en la que dejó de ser visible para el observador, registrándose dicha distancia desde la superficie del agua. Posteriormente, el disco fue ascendido lentamente hasta el punto en que volvió a ser perceptible, registrándose nuevamente la profundidad. La profundidad Secchi se obtuvo como el promedio de ambas mediciones, procedimiento que reduce la variabilidad asociada

a la percepción visual del observador y constituye la forma convencional de determinar la transparencia del agua (Lee et al., 2015).

Fase 2. En los diferentes puntos de muestreo se introdujo una sonda con sensores para medir la calidad del agua, extrayendo y utilizando las mediciones de clorofila-a. La sonda multiparamétrica para la calidad del agua incluye sensores acreditados en una plataforma de multiparámetros tanto para la medición puntual y de perfiles, así como el monitoreo continuo de datos sin vigilancia (Hach Company, 2006).

Parámetros medidos por la sonda multiparamétrica: temperatura, conductividad, profundidad/nivel, pH, ORP, oxígeno disuelto (LDO), oxígeno disuelto (célula Clark), turbidez, clorofila a, algas azul-verde, rodamina WT, amonio, nitrato, cloruro, concentración total de gases (TDG), luz ambiental.

El funcionamiento de los sensores consiste en emisión de luz azul (430 nm), esta impacta en las moléculas que contienen clorofila – a, al recibir esta luz azul ocurre un proceso de excitación de los electrones de la molécula, es decir, hay un aumento o incremento de la energía en ellos, una vez esta luz deja de ser emitida los electrones intentan volver su estado base, por tanto, la energía adsorbida es liberada en forma de luz roja entre 660 – 710 nm, la cual es captada o recibida por el filtro sensor, esta fluorescencia es directamente proporcional a la cantidad de Clorofila – a, lo que traduce, si hay concentración de Clorofila – a, es igual a fitoplancton, por lo tanto hay procesos de eutrofización. A continuación, la representación visual del funcionamiento y respuesta ocurridas en el proceso (Sathyendranath, 2014):

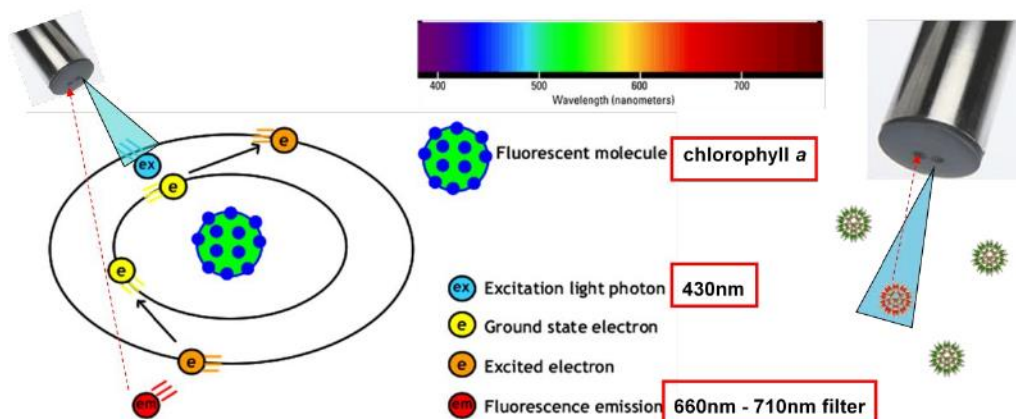


Figura 1. Proceso de excitación y emisión fluorescente de la clorofila a mediante sensores ópticos.

Procesamiento de datos

Los datos capturados se procesaron en programas de cómputo (Matlab, Octave) para la elaboración de gráficas con base en los indicadores del método de Carlson (Carlson & Havens, 2005).

Indicadores (ecuaciones)

$$\text{IET (PS)} = 60 - 14.41 \ln(\text{Profundidad disco Secchi en (m)}) \quad (1)$$

$$\text{IET (Clo)} = 9.81 \ln(\text{Concentración de clorofila - a en } \mu\text{g/l}) + 30.6 \quad (2)$$

Análisis de datos

Las gráficas procesadas fueron sometidas a un análisis en el cual se identificó el estado trófico de la laguna Champayán (oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, hipertrófico) según el siguiente índice de Carlson (Carlson & Havens, 2005),

Tabla 1. Clasificación del Índice de Estado Trófico

Criterio IET	CLO ($\mu\text{g/L}$)	PS (M)	Estado trófico
0 - 40	< 2.6	4-8	Oligotrófico
40 - 50	2.6 –7.3	2-4	Mesotrófico
50 - 70	7.3 - 56	0.5 - 2	Eutrófico
> 70	> 56	< 0.5	Hipertrófico

Fuente: Tomado de Carlson & Havens,2005

Resultados

A continuación, se muestra la digitalización de la Laguna Champayán, donde se representa el contorno de la ribera en color negro y la ubicación de varios islotes en color verde (Figura 2). El gráfico está georreferenciado con coordenadas de latitud y longitud, lo que permite ubicar espacialmente la laguna.

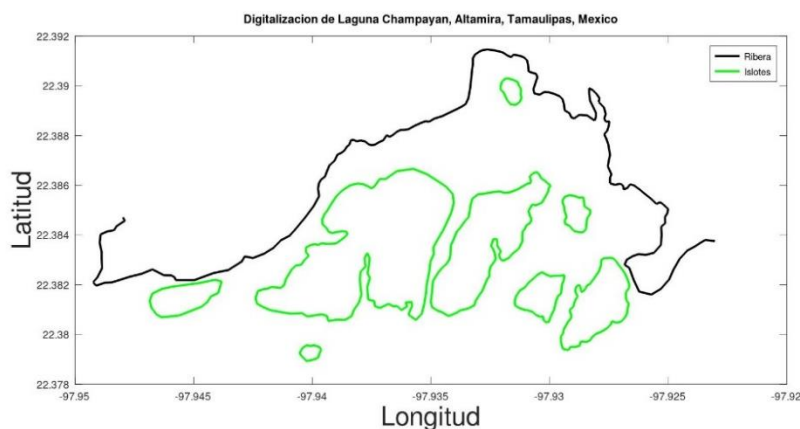


Figura 2. Digitalización área de estudio (Laguna Champayán)

En la Figura 3 se identifican los puntos de muestreo, de color rosa, dentro del área de estudio de la Laguna Champayán, estos puntos están distribuidos estratégicamente a lo largo del cuerpo de agua, permitiendo cubrir diferentes zonas de la laguna.

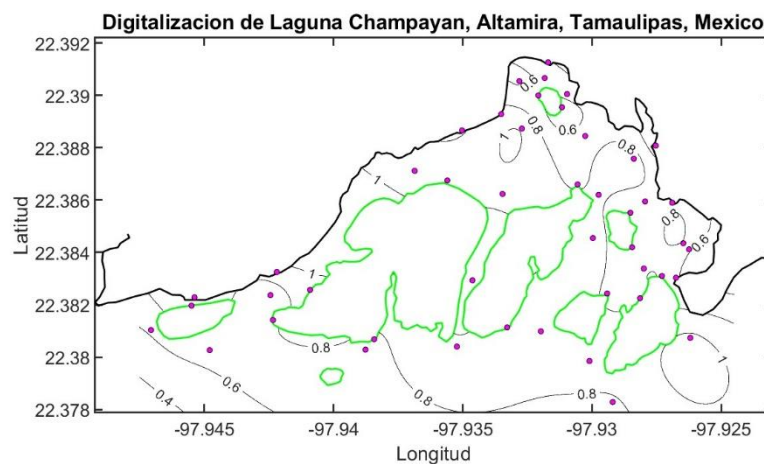


Figura 3. Puntos de muestreo Laguna Champayán

La distribución horizontal de la clorofila – a en la laguna Champayán que tiene valores que van desde 5 $\mu\text{g/l}$ hasta su valor máximo de distribución de 13 $\mu\text{g/l}$ obtenidos a través de la sonda multiparámetro (Figura 4).

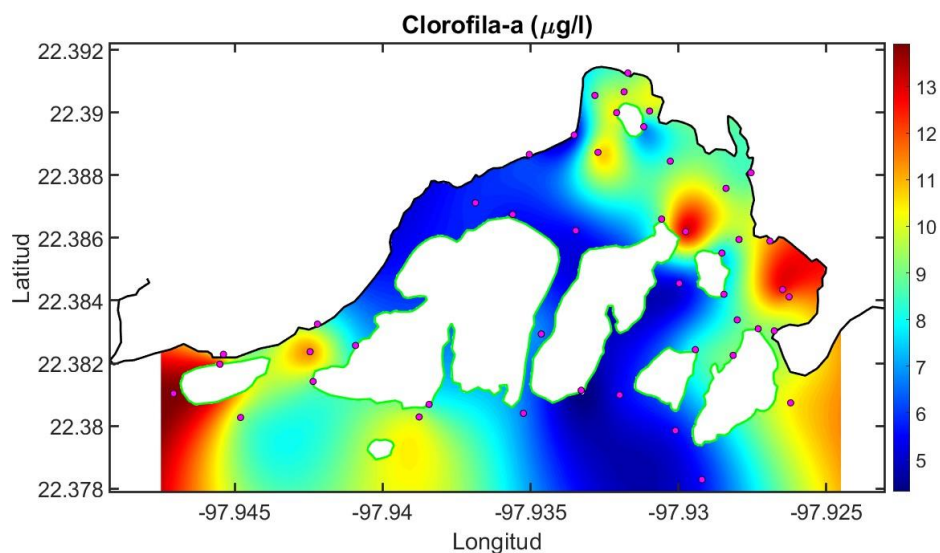


Figura 4. Distribución horizontal de la clorofila - a

En la Figura 5 se evidencia el IET obtenido en la laguna, gracias a los cálculos realizados con el método de Robert E. Carlson y Karl E. Havens. Para el cálculo de la distribución horizontal o concentración de la clorofila-a en $\mu\text{g/l}$ se empleó la ecuación 2.

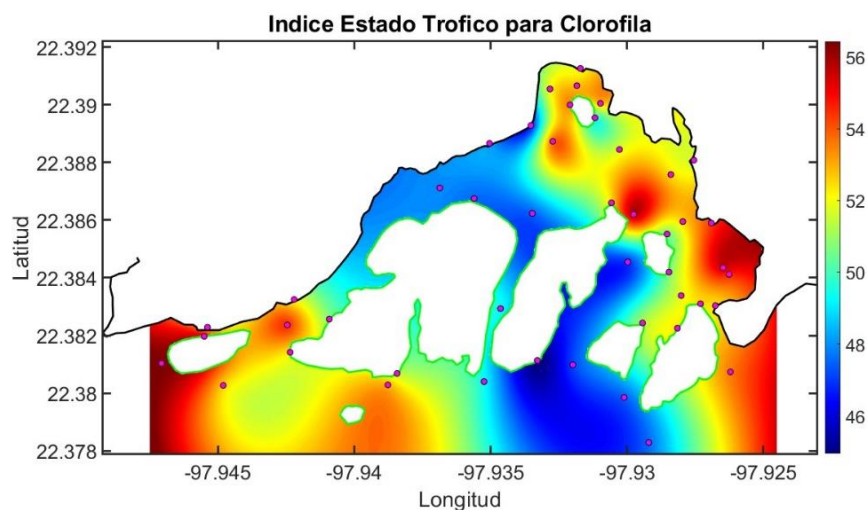


Figura 5. Índice de Estado Trófico para clorofila – a

La figura 6 representa la distribución horizontal de la transparencia en metros, promediada de los datos obtenidos con el disco de Secchi que van desde 0.5 m a 1 m.

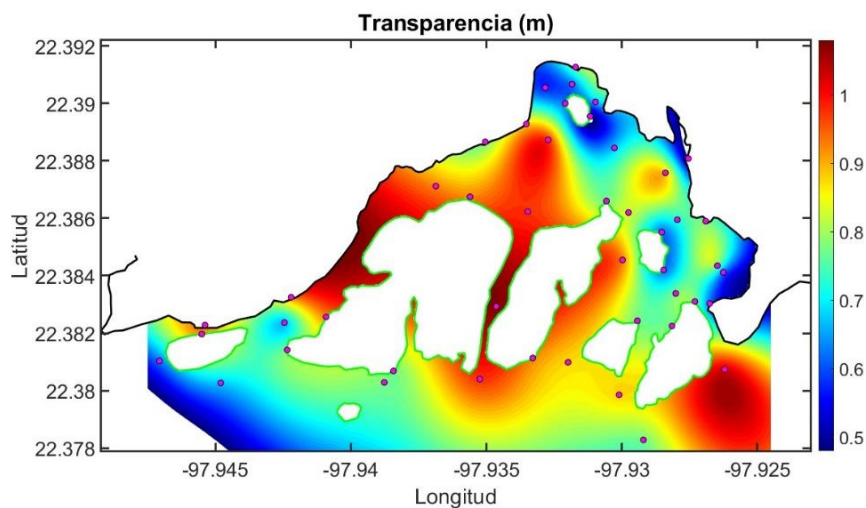


Figura 6. Distribución horizontal de la transparencia en metros

Por su parte, en la Figura 7 se evidencia el resultado del índice de estado trófico para la transparencia en metros, estos son cálculos realizados a través del método de Robert E. Carlson & Karl E (Ecuación 1).

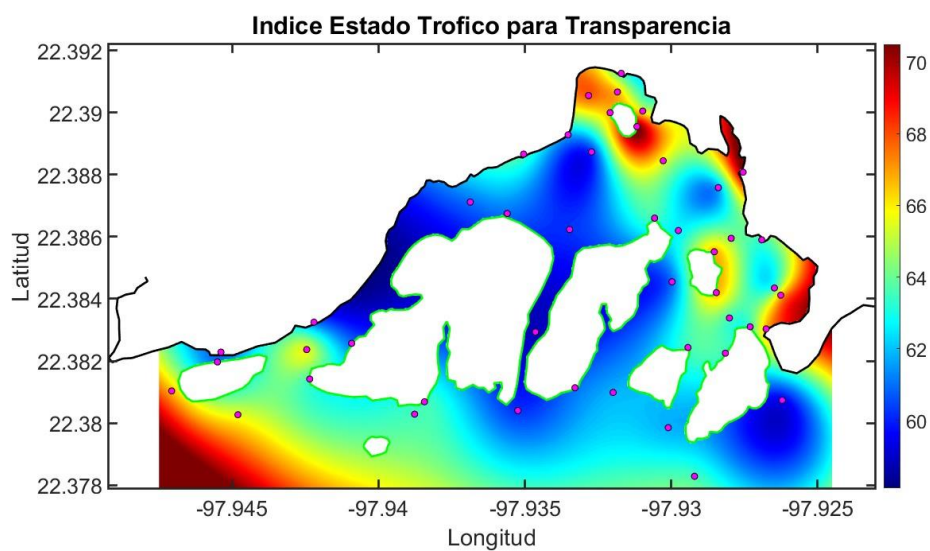


Figura 7. Índice de Estado Trófico para la transparencia

Definición del índice de estado trófico de la laguna Champayán.

El IET para la clorofila – a, mostró valores entre 46 y 56, el IET para la transparencia (m) arrojó valores entre 60 y 70, valores que se analizan según lo establecido por Robert E. Carlson & Karl E en su tabla de clasificación del índice de estado trófico. Se define que el IET para la clorofila-a se encuentra en un estado trófico combinado mesoeutrófico, es decir, la laguna se encuentra en niveles medios y altos de eutrofización, mientras que el IET para la transparencia se encuentra en un estado trófico eutrófico, indicando niveles altos de eutrofización.

Conclusiones

El análisis del Índice de Estado Trófico (IET) en la Laguna Champayán permitió definir que el sistema lagunar presenta condiciones medias y altas de eutrofización

El Índice de Estado Trófico (IET) para la clorofila-a demostró que la laguna se encuentra en un estado combinado de eutrofización, lo que indica la presencia de microorganismos fotosintéticos.

Al obtenerse un valor de IET para la transparencia mayor que el IET para la clorofila-a, permite sugerir que la contaminación por eutrofización se debe en gran medida a material suspendido en la zona de estudio.

Los resultados obtenidos revelan el riesgo para el funcionamiento correcto del ecosistema acuático, así como un impacto negativo para la comunidad, sectores económicos locales y las industrias presentes.

Finalmente, la aplicación de métodos como el uso del disco de Secchi, sondas multiparamétricas y herramientas geoespaciales permite obtener información confiable y determinante para definir el estado actual de la laguna, lo que demuestra la importancia de integrar diferentes técnicas para el monitoreo ambiental.

Referencias

- Aubriot, L., Delbene, L., Haakonsson, S., Somma, A., Hirsch, F., & Bonilla, S. (2017). Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: Influencia de la intensificación productiva y perspectivas. *INNOTECH*, 14, 7–16.
<https://doi.org/10.26461/14.04>
- Ansari, A. A., Singh Gill, S., Lanza, G. R., & Rast, W. (Eds.). (2011). *Eutrophication: Causes, consequences and control*. Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8>
- Ayele, H. S., & Atlabachew, M. (2021). Review of characterization, factors, impacts, and solutions of Lake eutrophication: Lesson for lake Tana, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14233-14252.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-12081-4>
- Carlson, R. E., & Havens, K. E. (2005). Simple Graphical Methods for the Interpretation of Relationships Between Trophic State Variables. *Lake and Reservoir Management*. <https://doi.org/10.1080/07438140509354418>
- CEMIE-Océano A. C. (2020). *CEMIE-Océano A. C.* <https://www.cemieoceano.mx/>
- Donini, G., & Piccolroaz, S. (2025). DISCO: A low-cost device-instrumented Secchi disk for water clarity observations. *Limnology and Oceanography: Methods*, 23, 346–361. <https://doi.org/10.1002/lom3.10684>
- Ferreira, J. G., Andersen, J. H., Borja, A., Bricker, S. B., Camp, J., Cardoso Da Silva, M., Garcés, E., Heiskanen, A.-S., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hoepffner, N., & Claussen, U. (2011). Overview of

- eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(2), 117-131. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.03.014>
- Hach Company. (2006). Hydrolab DS5X, DS5, and MS5 water quality multiprobes: User manual (Edition 3, Cat. No. 003078HY). Hach Company.
https://s.campbellsci.com/documents/ca/manuals/series_5_man.pdf
- Lee, Z., Shang, S., Hu, C., Du, K., Weidemann, A., Hou, W., Lin, J., & He, M. (2015). Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing of Environment*, 169, 139–149.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.002>
- Ramos Moreno, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 10(2), 172–192. <https://doi.org/10.22335/rlct.v10i2.461>
- Pranta, A. D., Rahaman, Md. T., Ahmed, Md. S., & Arefin Rafi, Md. S. (2023). Navigating Eutrophication in Aquatic Environments: Understanding Impacts and Unveiling Solutions for Effective Wastewater Management. *Research in Ecology*, 5(3), 11-18. <https://doi.org/10.30564/re.v5i3.5908>
- Fontúrbel Rada, F. (2016). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1-2), Pág. 135-141. <https://doi.org/10.21704/rea.v4i1-2.308>
- Sathyendranath, S. (Ed.). (2014). Phytoplankton functional types from space (Reports and Monographs of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 15).

International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG). https://ioccg.org/wp-content/uploads/2018/09/ioccg_report_15_2014.pdf