

Artículo Científico / Scientific Article

Determinación del estado trófico de la laguna de Tiscapa, ubicada en el departamento de Managua, Nicaragua

Determination of the trophic state of the Tiscapa lagoon, located in the department of Managua, Nicaragua

José Rubén Medina López¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: ingrubenmedina@gmail.com

Recibido: 31/05/2023

Revisión: 6/06/2023

Aceptado: 28/06/2023

Resumen

La Reserva Natural Laguna de Tiscapa, se ubica en el centro de la ciudad de Managua, a dos kilómetros de la costa del Lago Xolotlán. Este cuerpo de agua ha sido impactado principalmente por acciones antrópicas que iniciaron en 1980 con el ingreso de agua residual doméstica y residuos sólidos (García Espinoza, 2020). Este estudio determinó el estado trófico de la laguna Tiscapa con base en la transparencia, clorofila-a y el fósforo total bajo las metodologías del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) modificado por Aizaki y el modelo del Comité de Eutrofización de Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE) utilizando muestreos de calidad de agua correspondientes a los meses de abril, junio, agosto, octubre y diciembre de 2022. Se simuló el estado futuro de la laguna en 30 años utilizando las ecuaciones de Vollenweider con el índice OCDE permitiendo ver el comportamiento de fósforo total y clorofila-a. Como resultado se obtuvo que la laguna se encuentra en un estado hipereutrófico - eutrófico, lo que se traduce en una alta presencia de nutrientes que afecta el oxígeno disponible en la laguna y la proliferación de algas que afectan la calidad el agua. En la simulación con aportes continuos y no continuos, la laguna se mantiene en un estado hipereutrófico. La simulación del escenario ideal con condiciones naturales reflejó un estado oligotrófico-ultra-oligotrófico. El estudio concluye la necesidad urgente de abordar el exceso de nutrientes y tomar medidas para restaurar y preservar la calidad de este importante recurso hídrico de Nicaragua.

Palabras claves: eutrofización, índice de estado trófico, transparencia, clorofila-a, cuerpo léntico, hipereutrófico.

Abstract

The Tiscapa Lagoon Natural Reserve is situated in the heart of Managua, just two kilometers away from Lake Xolotlán's shoreline. Human activities, notably the introduction of domestic wastewater and solid waste starting in 1980, have primarily impacted this body of water (García Espinoza, 2020). This study evaluated Tiscapa Lagoon's trophic state based on transparency, chlorophyll-a, and total phosphorus, employing methodologies like the Modified Carlson Trophic State Index (TSI) by Aizaki and the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) Eutrophication Committee model. Water quality sampling was conducted in April, June, August, and December of 2022. Additionally, future scenarios for the lagoon were modeled using Vollenweider's equation coupled with the OECD index, providing insight into total phosphorus and chlorophyll-a dynamics. The findings reveal a hyper-eutrophic to eutrophic state in the lagoon, indicating a high nutrient presence impacting dissolved oxygen levels an algal bloom, thus compromising water quality. Both continuous and non-continuous input simulations sustained the lagoon in ah hyper-eutrophic state. Simulation of the ideal scenario, reflective a natural condition, showcase an oligotrophic to ultra-oligotrophic state. The study emphasizes the urgent need to tackle nutrient overload and implement remedial measures to restore and safeguard the quality of this crucial water resource in Nicaragua.

Key words: eutrophication, Trophic State Index, transparency, chlorophyll-a, lytic body, hyper-eutrophic.



© 2023 José R. Medina López.

Agua, Saneamiento & Ambiente, es editada por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Esta obra está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Introducción

En muchos poblados la gestión y manejo de los vertidos y residuos sólidos son variables que diagnostican cómo se deben establecer los lineamientos estratégicos para actuar en beneficio del desarrollo del sistema de limpieza y saneamiento público. Esto en su conjunto, confirman una serie de indicadores que se suman a este análisis, elementos que van desde la salud y la calidad de vida en general de los pobladores y los ecosistemas que se afectan.

La laguna de Tiscapa fue declarada reserva natural mediante el Decreto 42-91 del Gobierno de Nicaragua, publicado en el diario oficial La Gaceta No. 213 el 4 de noviembre de 1991. Luego en abril de 1996, fue declarada mediante el Decreto 6-96 "Parque Histórico Nacional Loma de Tiscapa". Esta laguna tiene una extensión de 32.8 kilómetros cuadrados, una longitud total del cauce principal de 27.76 kilómetros y una longitud total de los tributarios de la cuenca de 83.5 kilómetros (Acuña Sequeira et al., 2019). El área de la cuenca es de 32.8 kilómetros cuadrados, tiene un perímetro 39.18 kilómetros (Acuña Sequeira et al., 2019). El espejo de agua tiene 0.22 kilómetros cuadrados hasta el borde con un perímetro 1.52 kilómetros (Acuña Sequeira et al., 2019). Esta se ubica en las coordenadas latitud 12°8'20.40"N y longitud 86°16'15.78"W. La laguna de Tiscapa ha captado aguas residuales domésticas y residuos sólidos por más de 43 años, los que han venido a afectar su uso, su calidad y su potencial ecosistémico (García Espinoza, 2020).

El presente estudio se realizó con el objetivo de identificar el estado trófico de la laguna analizando los parámetros de transparencia, clorofila-a y fósforo total tomando de referencia el problema histórico y actual de contaminación por agua residual y residuos sólidos que recibe la laguna. Adicionalmente, se simuló el escenario de cero descargas contaminantes hacia la laguna para evidenciar el impacto del comportamiento futuro y actual que se tiene en el cuerpo de agua.

Como antecedentes vinculantes al sitio de estudio se tiene de referencia una propuesta de un plan para la mitigación de la contaminación del espejo de agua de la laguna de Tiscapa realizado por Acuña Sequeira y colaboradores (2019). En dicho plan se buscó revisar el grado de contaminación haciendo un diagnóstico de las condiciones fisicoquímicas del agua, producto de este estudio se determinaron altos grados de

contaminación, lo que conduce a que sus aguas sean de baja calidad a tal punto que los niveles de oxígeno no son lo suficiente para ofrecer vida a las especies (< 5 mg/L) y se tengan altas concentraciones de nitrógeno que fomentan la eutrofización (> 10 mg/L) (Acuña Sequeira et al., 2019).

Castellón Zelaya y colaboradores (2011) realizaron una investigación para determinar las características propias de la laguna Tiscapa en función del suelo, fauna, flora realizando un análisis muy interesante que permite ver como desde el año 1980 se construyeron canales para desviar las aguas residuales hacia la laguna, lo cual ha generado el deterioro que presenta hoy en día.

De acuerdo con el estudio realizado por Espinoza (2022) la laguna de Tiscapa presenta bajos niveles de oxígeno y altas concentraciones de fósforo y nitrógeno.

Estudios similares al presente se han realizado en otros países, como el desarrollado por Argueta Mayorga (2012) quien utilizó la clasificación del grado de eutrofia de la Organización de Cooperación Económica (OCDE) para determinar el estado trófico de la laguna de Ayarza ubicada en la república de Guatemala, utilizando el análisis de transparencia y nitrógeno. En este estudio se determinó el comportamiento mesotrófico de la laguna de Ayarza que responde a las determinaciones de campo realizadas.

En el presente estudio se busca proporcionar información pertinente para validar como el aporte de aguas residuales está afectando la calidad de la laguna de Tiscapa y en su efecto, como el comportamiento de los parámetros analizados justifican que la laguna está en un estado eutrófico. El alcance de este se enfoca en evaluar el impacto que tienen los distintos aportes de contaminantes que ingresan a la laguna para determinar el estado actual del recurso hídrico. El invertir en resguardar este cuerpo de agua, puede representar un gran atractivo con potencial económico y cultural que puede llevar a inversionistas nacionales y extranjeros a considerar un sitio estratégicamente ubicado en el centro urbano de la ciudad donde se puede implementar actividades turísticas, recreativas y educativas. Adicional, el restablecimiento total de este sitio puede proporcionar a las generaciones actuales y futuras un reservorio de agua de gran beneficio para la ciudadanía.

En cuanto a las limitaciones de la investigación es importante mencionar que no se tuvo la disponibilidad de datos históricos de la contaminación de la Laguna Tiscapa para analizar comportamientos extensos de esta. Por otro lado, es importante indicar que para modelar los escenarios futuros del estado de la laguna no se consideraron los aportes de nutrientes por infiltración, escorrentía superficial, y no se tomaron los procesos naturales de eutrofización.

Durante esta investigación fue muy importante la participación de la alcaldía de Managua lo que permitirá dar continuidad a las recomendaciones de esta investigación.

Finalmente, este estudio busca determinar el estado trófico y simular los escenarios de descargas contaminantes continuas y no continuas hacia el cuerpo receptor con el fin de proporcionar una perspectiva del desequilibrio actual del ecosistema y simular el escenario ideal que se debe considerar de referencia para instaurar estrategias de saneamiento.

Materiales y método

Para el desarrollo de la investigación, se aplicó el método científico con un enfoque cuantitativo exploratorio explicativo ya que busca proporcionar las bases sobre la cual puede continuar la investigación a un nivel descriptivo o correlacional, pero también busca evidenciar el efecto que causa en la laguna Tiscapa la descarga o vertido de contaminantes dentro de su cuenca. Adicional, se tiene un enfoque transversal al estudiar el comportamiento de los componentes que afectan al fenómeno en el mismo momento del desarrollo (se registran, analizan e interpretan los datos).

El universo consistió en muestras de agua natural de la laguna de Tiscapa correspondientes a los meses abril, junio, agosto, octubre y diciembre del 2022. Las variables consideradas fueron profundidad, clorofila-a y fósforo total.

Para el desarrollo de la investigación se aceptó la validez de los datos con el cálculo de la desviación estándar para medir la dispersión de estos (>0.5). Como variable independiente se definió la transparencia ya que esta puede influir en la distribución de nutrientes y la luz disponible en el cuerpo de agua, afectando así la concentración de

fósforo total y clorofila-a, y como variables dependientes las concentraciones de fósforo total y clorofila-a.

La investigación consideró un muestreo a conveniencia, para lo cual se definió un punto de muestreo al centro de la laguna Tiscapa, punto en el cual se realizó una estratificación en tres secciones para obtener una muestra de cada sección. El primer estrato se ubicó sobre el nivel de la superficie de la laguna, el segundo estrato se ubicó en el rango de 20 a 25 metros de profundidad sobre la superficie de la laguna y el tercer estrato a una profundidad de 39 a 50 metros de profundidad total.

En este punto de muestreo se realizó la determinación de clorofila-a, transparencia y fósforo total, realizando 5 repeticiones de estas mediciones para cada estrato en fechas seleccionadas al azar.

Los materiales y equipos utilizados en la investigación se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Lista de materiales y equipo utilizado

Descripción
Trabajo de campo
Balsa con motor
GPS (Sistema de posicionamiento global)
Recipiente sumergible para toma de muestras
Disco Secchi
Envases plásticos y de vidrio estériles
Software Google Earth
Trabajo de laboratorio fósforo total
Espectrofotómetro
Digestor de muestras
Centrífuga
Ácidos (perclórico, sulfúrico, ascórbico)
Reactivo de molibdato de amonio
Reactivo reductor (como ácido ascórbico)
Patrones de fósforo
Trabajo de laboratorio clorofila-a
Espectrofotómetro
Solvente (etanol)
Reactivo de tricloruro de aluminio
Pigmento de clorofila-a

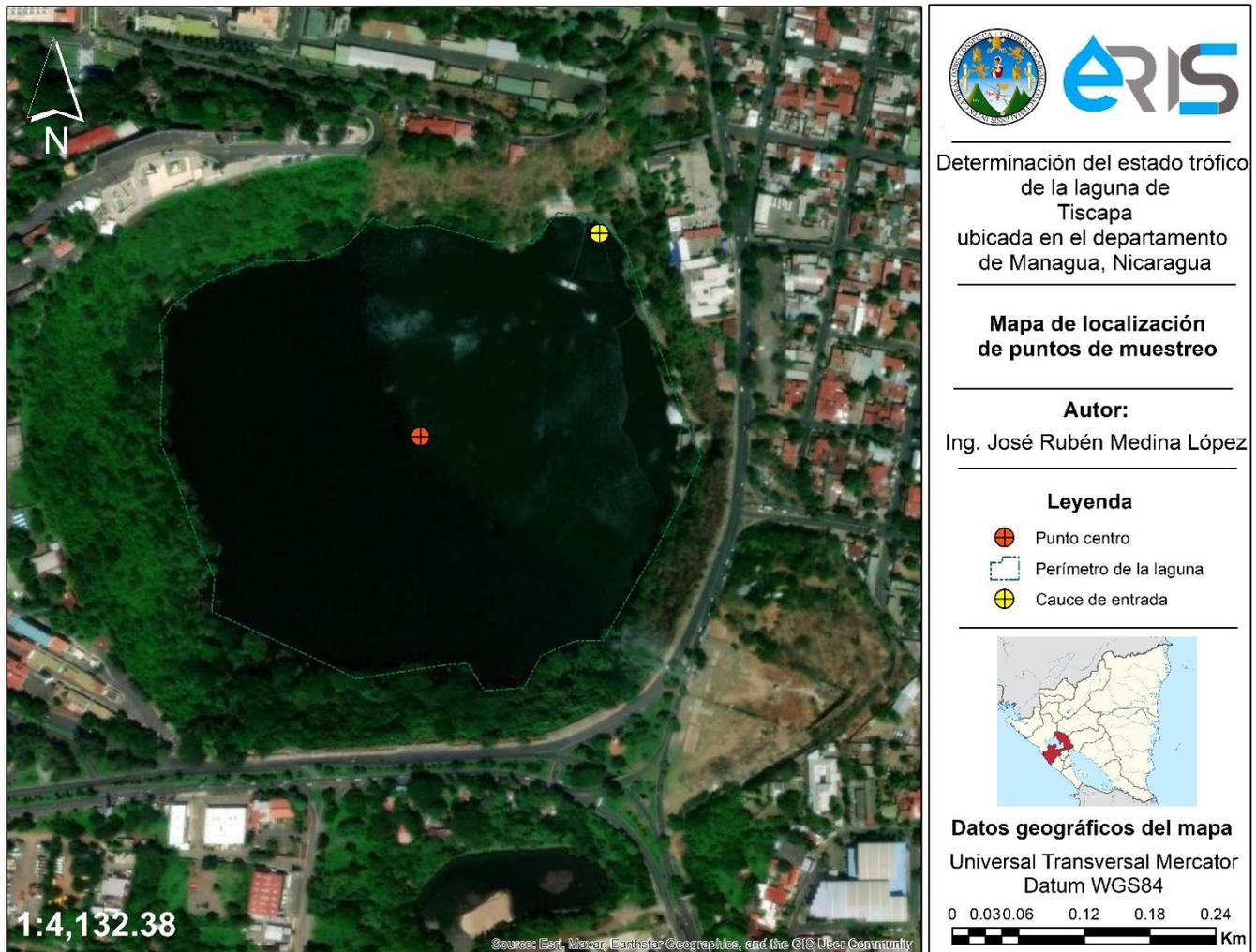
Para definir el punto de muestreo, se procedió a ubicar el cauce de entrada y el centro de la laguna, los cuales se ubican en las coordenadas indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas del punto de muestreo y cauce de entrada a la laguna Tiscapa.

Punto	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
Cauce de entrada	12° 8'28.91"N	86°16'8.55"E
Punto Centro	12° 8'22.07"N	86°16'14.34"E

En la figura No. 1 se muestra el plano con la ubicación del cauce de entrada y el centro de la laguna Tiscapa utilizado como punto de muestreo del presente estudio.

Figura 1. Localización del cauce de entrada y punto de muestreo utilizado en la laguna Tiscapa.



Durante el desarrollo de la investigación se realizó el ajuste de las profundidades a las cuales se tomaron las muestras, con el objetivo de compensar el aumento de altura provocado por crecidas que se presentaron en los meses de junio a agosto.

Las muestras captadas al centro de la laguna se almacenaron en recipientes estériles donde luego de ser

llenados, se almacenaron en un contenedor con hielo para preservar sus condiciones.

En la tabla 3 se muestran las ecuaciones del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) modificadas por Aizaki (1981) utilizadas para establecer el estado trófico de la laguna Tiscapa utilizando los parámetros de fósforo total (Pt) en miligramos por litro,

transparencia – Claridad del agua (D_s) en metros y la clorofila a en miligramos por litro.

Tabla 3. Fórmulas para estimar el estado trófico utilizadas en el estudio.

Parámetros de eutrofización	Aizaki (1981)
Fósforo total (P_t) (mg/L)	$TSI_{P_t} = 10 * (2.46 + \frac{6.68 - 1.15 \ln(P_t)}{\ln(2.5)})$
Claridad del agua (D_s) (m)	$TSI_{D_s} = 10 * (2.46 + \frac{3.76 - 1.57 \ln(D_s)}{\ln(2.5)})$
Clorofila a ($Clorfa$) (mg/m ³)	$TSI_{Clorfa} = 10 * (2.46 + \frac{\ln(Clorfa)}{\ln(2.5)})$

Fuente: Carlson (1977).

La clasificación del TSI utilizada en este estudio para determinar el estado de eutrofización de la laguna Tiscapa, es el siguiente:

- Oligotrófico (TSI < 30)
- Mesotrófico (30 < TSI < 60)
- Eutrófico (60 < TSI < 90)
- Hipereutrófico (90 < TSI < 100)

En la tabla 4 se presenta la clasificación del estado trófico de cuerpos de agua según el comité de Eutrofización de la Organización de Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE), esta clasificación está basada en los valores que alcanzan las variables clorofilas-a, profundidad en función de la transparencia por medio del disco Secchi y Fósforo total (Janus & Vollenweider, 1981).

Tabla 3. Clasificación de OCDE para grados tróficos en cuerpos de agua.

Categoría trófica	Pt (mg/L)	Transparencia (m)	Clorofila (mg/L)
Ultra oligotrófico	< 0.004	> 6.0	< 0.001
Oligotrófico	< 0.010	6.0 – 3.1	0.008 – 0.0025
Mesotrófico	0.010 + 0.035	3.1 – 1.5	0.0025 – 0.008
Eutrófico	0.035 – 0.100	1.5 - 0.7	0.008 – 0.025
Hipereutrófico	> 0.100	> 0.7	> 0.025

Fuente: Janus y Vollenweider (1981).

Durante la investigación se plantearon tres escenarios, siendo estos:

- Escenario con aportes discontinuos de carga contaminante.
- Escenario con aportes continuos de carga contaminante.
- Escenario sin incorporación de carga contaminante.

La ecuación implementada en el estudio para determinar la concentración media corregida de entrada de fósforo total en la laguna es la ecuación 1 mostrada a continuación.

$$X = \frac{P_{in}}{(1 + \sqrt{t_w})} \quad (1)$$

Donde:

X: concentración media corregida de entrada de fósforo total.

P_{in} : concentración media anual de entrada de fósforo total en miligramos por metro cúbico (mg/m³).

t_w : tiempo medio de residencia de agua en la laguna por año.

La ecuación No. 2 permite determinar la concentración media de clorofila (Chl_{prom}) en la laguna en miligramos por metro cúbico, utilizando la concentración media corregida de entrada de fósforo.

$$Chl_{prom} = 0.37X^{0.79} \quad (2)$$

La ecuación 3, fue utilizada para determinar la concentración máxima de clorofila ($Chl_{máx}$) en la laguna en miligramos por metro cúbico, en función de la concentración media corregida de entrada de fósforo.

$$Chl_{máx} = 0.74X^{0.89} \quad (3)$$

La ecuación 4 se utilizó para determinar la tasa de producción primaria (PP) en la laguna [gC/m^2 año].

$$PP = 22.9X^{0.6} \quad (4)$$

La selección de la metodología TSI y OCDE para evaluar el estado trófico de la laguna se justifica por su aplicabilidad práctica, la disponibilidad de datos comparables con otros estudios que usan estos métodos, su aceptación normativa y su base científica.

Resultados

Los resultados de las mediciones se anotaron en hojas de cálculo, en donde se realizaron diferentes operaciones para determinar promedios, desviación estándar y gráficas. En las tablas de la 5 a la 9 se muestran los resultados de la concentración de clorofila-a, fósforo total y transparencia-claridad del agua medidos en centro de la laguna Tiscapa para el punto 1 de muestreo que corresponde al nivel de la superficie de la laguna, asimismo se muestra la clasificación trófica de estos resultados utilizando el TSI.

Tabla 5. Resultados de mediciones realizadas en abril del 2022, en el estrato a nivel de superficie de la laguna (punto 1).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	74.54	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	101.63	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	64.00	Eutrófico

Tabla 6. Resultados de mediciones realizadas en junio del 2022, en el estrato a nivel de superficie de la laguna (punto 1).

Clorofila	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Fósforo total	mg/m ³	64.85	Eutrófico
Disco Secchi	mg/m ³	103.40	Hipereutrófico
	m	75.88	Eutrófico

Tabla 7. Resultados de mediciones realizadas en agosto del 2022, en el estrato a nivel de superficie de la laguna (punto 1).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	67.17	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	103.34	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	74.39	Eutrófico

Tabla 8. Resultados de mediciones realizadas en octubre del 2022, en el estrato a nivel de superficie de la laguna (punto 1).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	76.23	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	106.15	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	62.51	Mesotrófico

Tabla 9. Resultados de mediciones realizadas en diciembre del 2022, en el estrato a nivel de superficie de la laguna (punto 1).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	43.16	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	107.52	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	62.51	Eutrófico

En las tablas de la 10 a la 14 se presentan los resultados de la concentración de clorofila-a, fósforo total y transparencia-claridad del agua, medidos a una profundidad de 20 a 25 metros de la laguna, correspondiendo al punto 2 de muestreo, asimismo se muestra la clasificación trófica de estos resultados utilizando el TSI.

Tabla 10. Resultados de mediciones realizadas en abril del 2022, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad de la laguna (punto 2).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	54.22	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	101.45	Hipeuertrófico
Disco Secchi	m	64.00	Eutrófico

Tabla 11. Resultados de mediciones realizadas en junio del 2022, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad de la laguna (punto 2).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	45.53	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	98.98	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	64.00	Eutrófico

Tabla 12. Resultados de mediciones realizadas en agosto del 2022, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad de la laguna (punto 2).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	40.87	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	103.40	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	74.39	Eutrófico

Tabla 13. Resultados de mediciones realizadas en octubre del 2022, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad de la laguna (punto 2).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	43.45	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	105.17	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	62.51	Eutrófico

Tabla 14. Resultados de mediciones realizadas en diciembre del 2022, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad de la laguna (punto 2).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	29.92	Oligotrófico
Fósforo total	mg/m ³	106.71	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	62.51	Eutrófico

En las tablas de la 15 a la 19 se presentan los resultados de la concentración de clorofila-a, fósforo total y transparencia-claridad del agua, medidos a una profundidad de 39 a 50 metros de la laguna, correspondiendo al punto 3 de muestreo, asimismo se muestra la clasificación trófica de estos resultados utilizando el TSI.

Tabla 15. Resultados de mediciones realizadas en abril del 2022, en el estrato de 39 a 50 metros de profundidad de la laguna (punto 3).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	38.43	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	103.08	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	75.88	Eutrófico

Tabla 16. Resultados de mediciones realizadas en junio del 2022, en el estrato de 39 a 50 metros de profundidad de la laguna (punto 3).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	34.01	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	95.62	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	75.88	Eutrófico

Tabla 17. Resultados de mediciones realizadas en agosto del 2022, en el estrato de 39 a 50 metros de profundidad de la laguna (punto 3).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	37.48	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	95.32	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	74.39	Eutrófico

Tabla 18. Resultados de mediciones realizadas en octubre del 2022, en el estrato de 39 a 50 metros de profundidad de la laguna (punto 3).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	41.57	Eutrófico
Fósforo total	mg/m ³	105.40	Hipereutrófico
Disco Secchi	m	62.51	Eutrófico

Tabla 19. Resultados de mediciones realizadas en diciembre del 2022, en el estrato de 39 a 50 metros de profundidad de la laguna (punto 3).

Parámetro medido	Unidad de medida	Resultado obtenido	Estado Trófico
Clorofila	mg/m ³	34.01	Mesotrófico
Fósforo total	mg/m ³	21.46	Oligotrófico
Disco Secchi	m	26.59	Oligotrófico

En las tablas de la 20 a la 22 se presentan los resultados de la concentración de clorofila-a, fósforo total y transparencia-claridad del agua mínimo y máximo utilizados para determinar su clasificación trófica según la metodología de la OCDE.

Tabla 20. Clasificación trófica según OCDE para estrato sobre la superficie de la laguna (punto 1)

Dato	Fósforo total (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.500	> 0.100	Hipereutrófico
Máximos	0.720	> 0.100	Hipereutrófico
Dato	Transparencia (m)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.550	< 0.700	Hipereutrófico
Máximos	1.200	1.500 - 0.700	Eutrófico
Dato	Clorofila (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.040	0.025 - 0.075	Eutrófico
Máximos	0.113	> 0.075	Hipereutrófico

Tabla 21. Clasificación trófica según OCDE para estrato de 20 a 25 metros de profundidad (punto 2)

Dato	Fósforo total (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.540	> 0.100	Hipereutrófico
Máximos	0.730	> 0.100	Hipereutrófico
Dato	Transparencia (m)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.550	< 0.700	Hipereutrófico
Máximos	1.200	1.500 - 0.700	Eutrófico
Dato	Clorofila (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.004	< 0.008	Oligotrófico
Máximos	0.015	0.008 - 0.028	Mesotrófico

Tabla 22. Clasificación trófica según OCDE para estrato de 39 a 50 metros de profundidad (punto 3)

Dato	Fósforo total (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.530	> 0.100	Hipereutrófico
Máximos	1.190	> 0.100	Hipereutrófico
Dato	Transparencia (m)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.550	< 0.700	Hipereutrófico
Máximos	1.200	1.500 - 0.700	Eutrófico
Dato	Clorofila (mg/L)	OCDE	Grado trófico
Mínimos	0.002	< 0.008	Oligotrófico
Máximos	0.005	< 0.008	Oligotrófico

Utilizando el modelo experimental de la OCDE se pudo realizar estimaciones controladas que permiten observar el comportamiento de diferentes variables y analizar su efecto en el tiempo. Con este modelo se pudo apreciar el comportamiento de la producción anual de fósforo total y clorofila-a en función de los aportes continuos y no continuos de contaminantes con su carga actual, así como su comportamiento sin ingreso de carga contaminante. Estos escenarios fueron aplicados a las características propias de la laguna Tiscapa. Los resultados de esta simulación se muestran en las tablas 23 a 25 mostradas a continuación.

Tabla 23. Escenario del comportamiento de la producción de fósforo y clorofila-a con carga contaminante actual aplicada de forma discontinua.

Clorofila media (mg/m3)	Clorofila máxima (mg/m3)	Fósforo (mg/m3)	Tiempo ponderado (años)
550	2775	10370	1
376	1808	6409	5
308	1445	4983	10
272	1256	4256	15
249	1133	3790	20
231	1044	3457	25
218	975	3202	30

Tabla 24. Escenario del comportamiento de la producción de fósforo y clorofila-a con carga contaminante actual aplicada de forma continua.

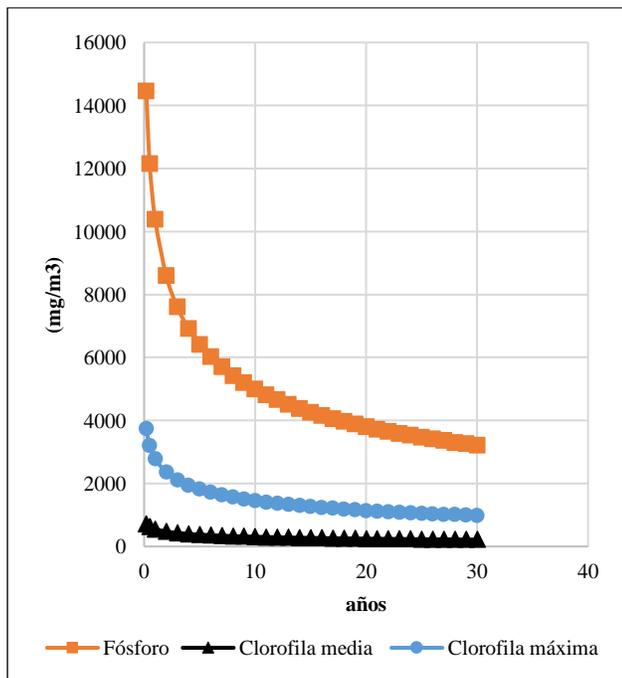
Clorofila media (mg/m3)	Clorofila máxima (mg/m3)	Fósforo (mg/m3)	Tiempo ponderado (años)
1311	7378	31110	1
1177	6535	27149	5
1128	6229	25723	10
1103	6072	24996	15
1087	5971	24530	20
1075	5899	24197	25
1066	5844	23942	30

Tabla 25. . Escenario del comportamiento de la producción de fósforo y clorofila-a sin ingreso de carga contaminante.

Clorofila media (mg/m ³)	Clorofila máxima (mg/m ³)	Fósforo (mg/m ³)	Tiempo ponderado (años)
1.32	3.10	5.00	1
0.90	2.02	3.09	5
0.74	1.61	2.40	10
0.65	1.40	2.05	15
0.60	1.27	1.83	20
0.55	1.17	1.67	25
0.52	1.09	1.54	30

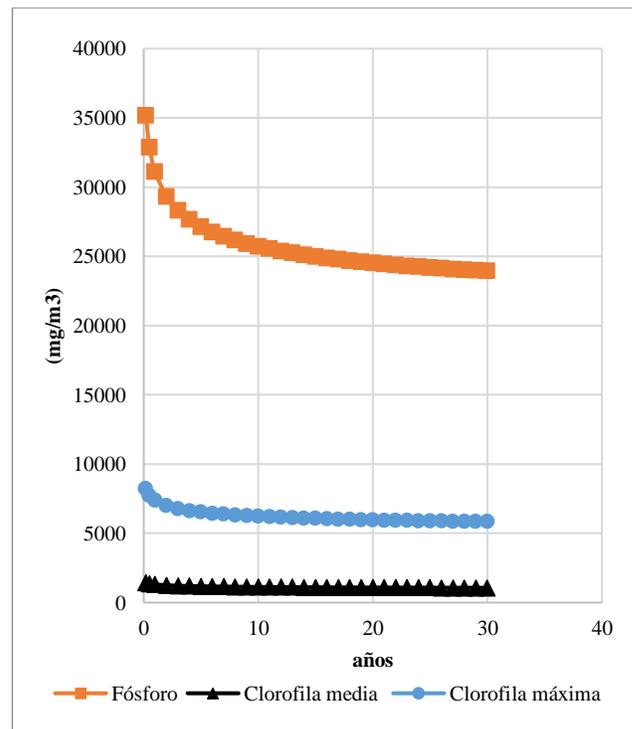
En la figura 2 se representa el comportamiento de la producción de fósforo y clorofila-a según la modelación de la OCDE para un horizonte de treinta años con la carga contaminante actual sin aportes continuos. Se puede observar en esta figura que la producción de fósforo total llegaría a alcanzar un valor de 3,202 mg/m³. En cuanto a clorofila-a se obtendría una producción media de 218 mg/m³ y producción máxima de 975 mg/m³.

Figura 2. Simulación de la producción de fósforo y clorofila-a en la laguna Tiscap con carga contaminante actual con aportes discontinuos.



En la figura 3 se puede observar la simulación de la producción de fósforo total y clorofila-a al aplicar la carga contaminante actual de forma continua para un período de 30 años utilizando la metodología de la OCDE. El comportamiento del fósforo total muestra que en 30 años tendría una producción de 23,942 mg/m³, y la clorofila-a una producción media de 1,066 mg/m³ y producción máxima de 5,844 mg/m³.

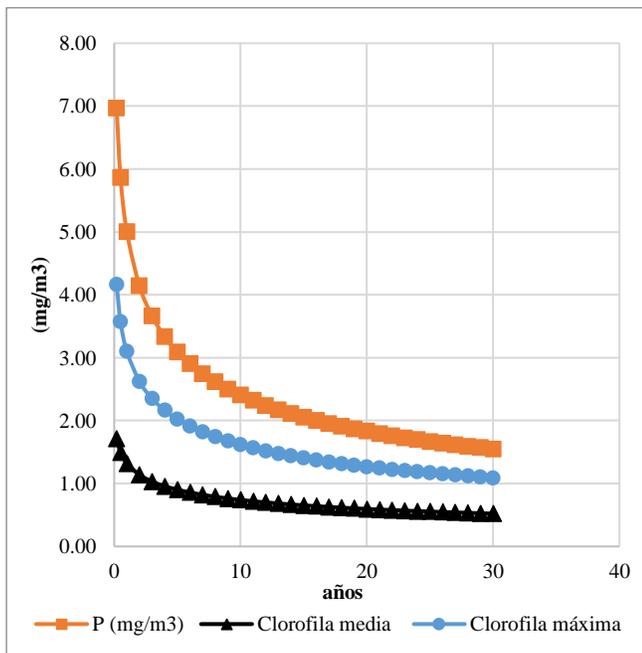
Figura 3. Simulación de la producción de fósforo y clorofila-a en la laguna Tiscap con carga contaminante actual aplicada de forma continua.



En la figura 4 se muestra el escenario en el cual se deja de ingresar carga contaminante a la laguna, siendo este el escenario de recuperación de la laguna al retirar este tipo de efecto adverso y permitiendo que esta realice sus funciones biológicas de forma natural.

En esta figura 4 se puede apreciar que la producción de fósforo total en treinta años sería de 1.54 mg/m³. La clorofila-a promedio en este período de tiempo tendría una concentración de 0.52 mg/m³, mientras que la clorofila-a máxima tendría una producción de 1.09 mg/m³.

Figura 4. Simulación de la producción de fósforo y clorofila-a en la laguna Tiscapa sin aplicar carga contaminante actual.



Discusión de resultados

Luego de aplicar las metodologías del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) modificado por Aizaki y el modelo del Comité de Eutrofización de Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE) utilizando la transparencia, clorofila-a y fósforo total medidos durante el año 2022 en la laguna Tiscapa se pudo identificar que ambas metodologías ubican la condición trófica de la laguna en estado hipereutrófico a eutrófico, siendo este resultado efecto de los aportes de agua residual que presenta concentraciones de nutrientes que catalizan el crecimiento de algas que contribuyen a la eutrofización de la laguna.

Los valores de transparencia obtenidos durante el estudio presentan un valor promedio de 0.86 m con una desviación estándar de 0.45 m. Este valor promedio ubica la laguna Tiscapa aplicando el modelo de la OCDE en condiciones hipereutrófica-eutrófica, condición que están limitando la penetración de la luz solar y afectando paulatinamente a los organismos fotosintéticos y a los ecosistemas acuáticos en general.

Es importante observar como este valor promedio muestra una diferencia significativa con estudios de otros cuerpos de agua, tal y como el estudio de Argueta (2012) quien obtuvo una transparencia promedio en la laguna de Ayarza de Guatemala de 4 metros, ubicando esta laguna en una condición mesotrófica, resaltando esto el deterioro que presenta la laguna de Tiscapa al compararla con la laguna de Ayarza.

Al analizar el comportamiento de la concentración de fósforo total en la laguna Tiscapa se obtuvo a nivel de la superficie (punto 1) una concentración promedio de fósforo total de 0.62 miligramos por litro con una desviación estándar de 0.15 miligramos por litro. En el estrato 2 ubicado en el rango de 20 a 25 metros (punto 2) la concentración promedio de fósforo total fue de 0.63 miligramos por litro con una desviación estándar de 0.13 miligramos por litro. Con estos dos valores promedio obtenidos (punto 1 y punto 2) se puede apreciar que no existe una variación significativa de la concentración de fósforo total desde la superficie de la laguna hasta una profundidad de 25 metros.

La concentración de fósforo total promedio obtenida en el estrato 3 ubicado en el rango de 39 a 50 metros (punto 3) fue de 0.94 miligramos por litro con una desviación estándar de 0.46 miligramos por litro, evidenciando un incremento en la concentración de fósforo en la laguna Tiscapa en el rango de profundidad de los 25 a los 50 metros. El comportamiento de la concentración de fósforo total en la laguna Tiscapa evidencia como el ingreso de aguas residuales están aportando al crecimiento de algas visibles en la laguna y que su presencia va a ir reduciendo las cantidades de oxígeno disponibles y afectará el equilibrio del ecosistema.

La medición de la concentración de clorofila-a en el agua es un indicador comúnmente utilizado para evaluar la productividad primaria y la biomasa de algas en un ecosistema acuático. Una mayor concentración de clorofila-a generalmente está asociada con una mayor abundancia de algas y plantas acuáticas. Esta abundancia compromete la transparencia, el acceso limitado de luz y en consecuencia catalizar el proceso de eutrofización.

Los valores promedio obtenidos en la superficie (punto 1) indican un comportamiento hipereutrófico con una concentración de 0.075 miligramos por litro y

una desviación estándar de 0.05 miligramos por litro, en el estrato-intermedio (punto 2) se muestra un comportamiento oligotrófico con una concentración de clorofila-a promedio de 0.007 miligramos por litro y desviación estándar de 0.008 miligramos por litro. Finalmente, el estrato 3 de 39 a 50 metros (punto 3) presentó al igual que el estrato intermedio una condición oligotrófica con una concentración promedio de clorofila-a de 0.004 miligramos por litro y desviación estándar de 0.001 miligramos por litro.

Al simular escenarios de la contaminación actual y futuro de la laguna Tiscapa bajo la implementación de las ecuaciones de Vollenweider se comprobó el comportamiento del fósforo total y la clorofila-a en el tiempo y como con base a su concentración proyectada, se identificó el estado trófico de la laguna utilizando la clasificación OCDE.

Los principales hallazgos revelan que la laguna Tiscapa se encuentra en un estado hipereutrífico-eutrífico caracterizado por un exceso de nutrientes. Además, en la simulación del comportamiento de la laguna durante un período de 30 años se observaron cambios significativos únicamente cuando no existen aportes de contaminación a la laguna.

Al analizar el comportamiento de la simulación del modelo OCDE para la producción de fósforo total mostrado en la figura 2 en el escenario donde se aplica la carga contaminante actual de forma discontinua puede apreciarse un crecimiento exponencial de algas y posterior abatimiento de oxígeno debido a la descomposición de estas cuando mueren. En esta misma figura se puede apreciar que el comportamiento de la producción de clorofila-a presenta condiciones negativas para el cuerpo de agua en la que detendría la actividad biológica en un período de 30 años.

Analizando la simulación mostrada en la figura 2, el aporte actual de fósforo en combinación con temperaturas altas y generación de clorofila-a, muestra que existe una estimulación al crecimiento de algas, haciendo que la curva logarítmica de la figura 2 evidencie que el cuerpo de agua se encuentra en estado hipereutrífico bajo el modelo OCDE. Este comportamiento con el aporte de clorofila, asemejan condiciones propicias para el crecimiento de algas que perjudican la actividad productiva del ecosistema.

Al observar el comportamiento del fósforo total y clorofila-a mostrado en la figura 3 (con carga contaminante aplicada continuamente), se aprecia que la laguna Tiscapa presentaría una eutrofización compleja de erradicar en el momento que se decida intervenir para su saneamiento, provocada principalmente por la proliferación de microalgas y plantas acuáticas como las cianobacterias. Bajo este escenario, la laguna se ubicaría en un estado hipereutrífico.

En la figura 4 se puede apreciar que al retirar la carga contaminante que ingresa actualmente a la laguna, esta presenta un entorno controlado de crecimiento de algas y plantas acuáticas, mismas que se convierten en la comida y hábitat de peces, moluscos y organismos más pequeños que se desarrollarían en el agua. En cuanto a la clorofila-a promedio en este escenario, se puede apreciar que esta posibilitaría la transformación de energía lumínica en energía química y favorecer a la estabilidad del ecosistema.

En el escenario mostrado en la figura 4, la laguna Tiscapa se encontraría en estado oligotrófico tomando de referencia el índice OCDE con ciertas características ultra oligotróficas. Este escenario representaría una laguna deficitaria en nutrientes vegetales y con una gran abundancia de oxígeno en disolución, sin estratificación marcada. Se tendría baja producción de algas, y consecuentemente aguas claras con una muy buena calidad de agua, siendo esta adecuada para el desarrollo de peces y macroinvertebrados

Conclusiones

En este estudio aplicando las metodologías del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) modificado por Aizaki y el modelo del Comité de Eutrofización de Cooperación Económica y Desarrollo (OCDE), simulando el comportamiento del fósforo total, transparencia y clorofila-a, se puede concluir que la laguna Tiscapa se encuentra en estado hipereutrífico debido al ingreso de las cargas contaminantes que actualmente se vierten en este cuerpo de agua.

La superficie de la laguna Tiscapa presenta condiciones eutróficas, en el estrato de 20 a 25 metros de profundidad (punto 2 de muestreo) se identificaron igualmente condiciones eutróficas. En el estrato de 39 a 50 metros se identificaron escenarios mesotróficos-

oligotróficos. Es importante resaltar que, de continuar estos aportes de carga contaminantes, estas condiciones identificadas en este estudio pueden empeorar.

Al simular el escenario de cero descargas contaminantes con las ecuaciones de Vollenweider y clasificación de estado trófico OCDE se identificó que la laguna llega a un estado oligotrófico – mesotrófico, esto sería eliminando el ingreso de aguas residuales, lo que evidencia una notable mejoría, con lo que se demuestra la importancia de iniciar acciones tendientes a reducir el ingreso de aguas residuales a la laguna Tiscapa.

Una de las principales limitaciones de esta investigación fue el acceso limitado a datos históricos y a largo plazo sobre la calidad del agua de la laguna, lo que afectó la capacidad de evaluar la eutrofización a lo largo de un período más extenso y de realizar análisis comparativos significativos.

Como resultado de esta investigación se recomienda llevar a cabo investigaciones a largo plazo que abarquen varias décadas de análisis de datos para evaluar con mayor precisión la dinámica de la eutrofización en la laguna. Esto permitirá una comprensión más profunda de las tendencias y patrones de su comportamiento.

Por otro lado, se considera importante fomentar la colaboración entre científicos de diferentes disciplinas, como la hidrología, la ecología y la química ambiental, para abordar la eutrofización desde múltiples perspectivas y obtener una imagen más completa de los factores involucrados.

Agradecimientos

A la Alcaldía de Managua por prestar el acceso al sitio y registros históricos para llevar a cabo la determinación del estado trófico de la Laguna de Tiscapa, así como al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por el apoyo dado durante la ejecución de esta investigación.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos del autor y del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD).

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Medina López, J.R. (2023). Determinación del estado trófico de la laguna de Tiscapa, ubicada en el departamento de Managua, Nicaragua. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(1), Artículo e 1588. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1588>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: J.R.M.L.

Declaración de disponibilidad de datos del estudio.

- 1) Imágenes fueron descargadas de <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

Referencias

- Acuña Sequeira, C.N., Vega Torrez, V.A., Marchena Castañeda, J.M. (2019). *Propuesta de un plan para la mitigación de la contaminación del espejo de agua de la laguna de Tiscapa en el departamento de Managua en el período de abril a julio del 2019*. [Tesis de licenciatura, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/12897/1/12897.pdf>
- Argueta Mayorga, D. S. (2012). Determinación del estado trófico de la laguna de Ayarza, ubicada en el departamento de Santa Rosa, República de Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 7(1), 41-46. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v7i1.1473>
- Carlson, R. E (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Castellón Zelaya, M.F., Briceño, E.O, & Pérez Moreno, M.S. (2011). *Caracterización general y estado actual del manejo de la microcuenca de la laguna de Tiscapa*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Tecnología de la Construcción, trabajo presentado en el VI Congreso Nacional de

Ingeniería Civil “La Ingeniería Civil Transformando Nicaragua”. Recuperado el 15 de abril de 2023, de <https://mariocastellon.wordpress.com/2012/10/17/microucenca-laguna-de-tiscapa/>

García Espinoza, M. (2020). Estudio sobre el impacto ambiental antrópico en la laguna de Tiscapa, Managua. *Revista Nicaragüense de Antropología*, 8(1), 91-104. <https://revistashumanidadescj.unan.edu.ni/index.php/Raiices/article/view/699/1010>

García Espinoza, M. (2022). *Análisis de la calidad de las aguas de la laguna de Tiscapa, Managua*. Asociación Educación para el Desarrollo Intipachamama. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <https://jubileosuramericas.net/wp-content/uploads/2022/01/EL-SANEAMIENTO-EN-LAS-LAGUNAS-DE-MANAGUA.pdf>

Janus, L.L & Vollenweider, R. (1981). *The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Summary Report - Canadian Contribution*. National Water Research Institute, Ontario, Canada. Recuperado el 25 de marzo de 2023, de https://publications.gc.ca/collections/collection_eccc/En36-502-131-eng.pdf