

Evaluation of the eutrophication level of the Cañoncillo lagoon, La Libertad, Peru.

Danitza del Rocío Quiroz Ñontol¹, Marco Alfredo Sánchez-Peña^{1,2} and Jackelin Estefani Ciriaco Mosqueira³

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú, quiroznontoldanitza@gmail.com

²Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú, marco.sanchez@upn.edu.pe

³Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú, estefani.ciriaco1@gmail.com

Abstract– The present investigation was carried out in the Cañoncillo lagoon located in the district of San Pedro de Lloc, province of Pacasmayo, department of La Libertad. The objective of the research was to evaluate the eutrophication level of the Cañoncillo lagoon. To achieve this objective, five sampling points were identified along the water body, where in situ parameters such as pH, temperature, dissolved oxygen, electrical conductivity and water transparency were measured. In addition, two samples were collected from each point at different depths (1 m and 3 m) using a hydrographic bottle. Nitrates and phosphates were analyzed from each sample by the colorimetric method and chlorophyll-a by the trichromatic method. Two indices were then applied to determine the level of eutrophication of the lagoon: the Nutrient Eutrophication Index (EI) of Karydis et al. and the Trophic State Index (TSI) of Carlson, modified by Toledo et al. The results indicated that the pH of the water at 1 m depth presented values between 7.94 and 8.15, and at 3 m between 7.83 and 8.20; the temperature at 1 m depth between 22.1 and 22.8 °C, while at 3 m the data varied between 22.2 and 23. 2 °C; dissolved oxygen at 1 m depth presented data between 5.45 and 7.63 mg/L and at 3 m between 3.82 and 8.17 mg/L; electrical conductivity at 1 m had values between 393 and 404 µs/cm and at 3 m between 298 and 412 mg/L, nitrate concentration at 1 m depth varied between 0. 39 and 1.40 mg/L and at 3 m between 1.07 and 2.10 mg/L; phosphate concentration at 1 m depth ranged between 0.08 and 0.18 mg/L, and at 3 m between 0.13 and 0.20 mg/L; chlorophyll-a at 1 m depth showed higher concentrations than at 3 m. On the other hand, from the application of the EI, a value of 2.23 was obtained for nitrates and 0.94 for phosphates; while the TSI for transparency was 38.449 and for chlorophyll a 66.77. Finally, it was concluded that the eutrophication level of the Cañoncillo lagoon was oligotrophic based on nitrates, phosphates and transparency; and eutrophic based on chlorophyll-a, thus identifying that the proliferation of aquatic plants is not directly related to the concentration of the nutrients analyzed.

Keywords– Eutrophication, nutrients, chlorophyll-a, transparency, satellite images, Cañoncillo lagoon.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Evaluación del nivel de eutrofización de la laguna Cañoncillo, La Libertad, Perú.

Danitza del Rocío Quiroz Ñontol¹, Marco Alfredo Sánchez-Peña^{1,2} and Jackelin Estefani Ciriaco Mosqueira³

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú, quiroznontoldanitza@gmail.com

²Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú, marco.sanchez@upn.edu.pe

³Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú, estefani.ciriaco1@gmail.com

Resumen– La presente investigación se realizó en la laguna Cañoncillo ubicada en el distrito de San Pedro de Lloc, provincia de Pacasmayo, departamento de La Libertad. La investigación tuvo como objetivo la evaluación del nivel de eutrofización de la laguna Cañoncillo. Para el cumplimiento de dicho objetivo, se identificaron cinco puntos de muestreo a lo largo del cuerpo de agua, en los cuales se midieron parámetros in situ como pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y transparencia del agua. Sumado a ello, se recolectaron dos muestras de cada punto a diferentes profundidades (1 m y 3 m) empleando una botella hidrográfica. De cada muestra se analizaron nitratos y fosfatos mediante el método colorimétrico y clorofila-a por el método tricromático. Luego de ello, se aplicaron dos índices para la determinación del nivel de eutrofización de la laguna: El índice de Eutrofización por Nutrientes (IE) de Karydis et al. y el índice de Estado Trófico (IET) de Carlson, modificado por Toledo et al. Los resultados indicaron que el pH del agua a profundidad de 1 m presentó valores entre 7.94 y 8.15, y a 3 m entre 7.83 y 8.20; la temperatura con profundidad de 1 m entre 22.1 y 22.8 °C, mientras que a 3 m los datos variaron entre 22.2 y 23.2 °C; el oxígeno disuelto a 1 m de profundidad presentó datos entre 5.45 y 7.63 mg/L y a 3 m entre 3.82 y 8.17 mg/L; la conductividad eléctrica a 1 m tuvo valores entre 393 y 404 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y a 3 m entre 298 y 412 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la concentración de nitratos a un 1 m de profundidad varió entre 0.39 y 1.40 mg/L y a 3 m entre 1.07 y 2.10 mg/L; la concentración de fosfatos a 1 m de profundidad varió entre 0.08 y 0.18 mg/L, y a 3 m entre 0.13 a 0.20 mg/L; la clorofila-a a 1 m de profundidad presentó mayores concentraciones que a 3 m. Por otro lado, a partir de la aplicación del IE, se obtuvo un valor de 2.23 para nitratos y de 0.94 para fosfatos; mientras que el IET para transparencia resultó ser 38.449 y para clorofila-a 66.77. Finalmente se concluyó que el nivel de eutrofización de la laguna Cañoncillo fue Oligotrófico a partir de nitratos, fosfatos y transparencia; y Eutrófico a partir de clorofila-a, identificando de esta manera que la proliferación de plantas acuáticas no está directamente relacionada con la concentración de los nutrientes analizados.

Palabras clave– Eutrofización, nutrientes, clorofila-a, transparencia, imágenes satelitales, laguna Cañoncillo.

I. INTRODUCCIÓN

En el mapa hidrológico mundial, el fenómeno denominado “eutrofización” ha llegado a ser el problema principal que afronta la calidad del agua [1]. La eutrofización es un proceso que representa el estado final de la evolución del nivel trófico de las masas de aguas naturales [2].

Este estado trófico del que se habla, se refiere al nivel de calidad de los cuerpos de agua, y se determina por la cantidad de nutrientes presentes en ellos, principalmente el nitrógeno y el fósforo [3], por ser elementos fundamentales, tanto para las algas, como también para las bacterias, protozoos y otros organismos acuáticos que son componentes de los ecosistemas de agua dulce, pero que en excesivas concentraciones pueden ocasionar graves problemas en la calidad del agua [4].

Sin embargo, a pesar de que ambos nutrientes contribuyen a la eutrofización, la determinación o clasificación que se le atribuye al estado trófico de un cuerpo de agua generalmente se basa en el nutriente limitante, que por lo general es el fósforo [5].

Exactamente, el concepto de nutriente limitante se basa en el hecho de que para que las plantas acuáticas crezcan y se reproduzcan, necesitan ciertos nutrientes en una proporción específica. Si uno de estos nutrientes es escaso en comparación con los demás, se convierte en el nutriente limitante, lo que significa que su disponibilidad limita la cantidad máxima de biomasa vegetal que puede ser producida. Por lo tanto, se considera que el nutriente limitante es el que controla la cantidad máxima de crecimiento de las plantas acuáticas [6].

La eutrofización puede ser ocasionada por procesos naturales que aportan lentamente a los cuerpos de agua material alóctono representado en concentración de nutrientes, de tal manera que los lagos llegan a envejecer de forma gradual, volviéndose de esta manera más productivos en un espacio de tiempo muy prologando que incluso puede tardar miles de años. Además, las causas principales tienen origen antrópico por acelerar la inserción en exceso de nutrientes derivados de actividades humanas y se denomina “eutrofización cultural”; dentro de ellas se pueden distinguir la descarga de aguas residuales urbanas que llegan a presentar en su composición una alta carga de detergentes y residuos orgánicos; las aguas residuales generadas a partir de las actividades agropecuarias, que contienen cantidades elevadas de fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos que comprenden nitratos y fosfatos; y los vertimientos de origen industrial [7, 8].

En la mitad del siglo XX, se evidenció que el desarrollo de las actividades antropogénicas estaba agilizando el proceso de eutrofización. Se logró identificar que dicho problema había empezado a ocurrir mucho antes de lo que se había imaginado incluso en los lagos aledaños a zonas donde se llevaban a cabo actividades humanas, por lo que el problema era significativamente más grande [9].

II. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

La investigación se desarrolló en la laguna Cañoncillo, ubicada dentro del Bosque Seco El Cañoncillo, en el distrito de San José, provincia de Pacasmayo, departamento de La Libertad, en la zona norte del Perú (Fig. 1).

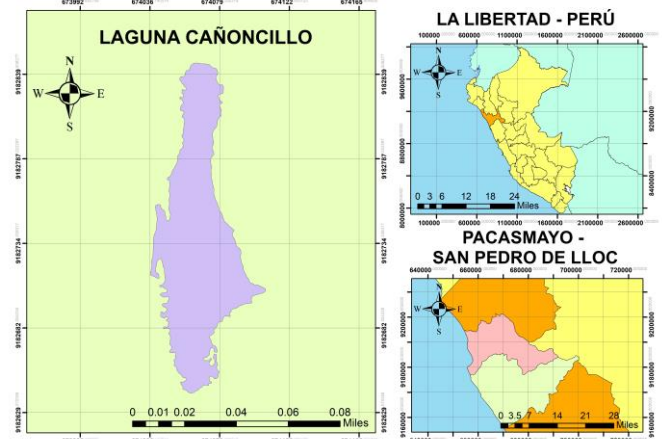


Fig.1 Mapa de ubicación del área de estudio

B. Procedimiento

Definir los puntos de muestreo de forma estratégica es un paso fundamental para lograr obtener resultados representativos de la calidad del agua de una laguna. En este caso se seleccionaron cinco puntos de muestreo para posteriormente adquirir información relacionada con la variabilidad espacial de los parámetros analizados, lo que posibilitará realizar algunas deducciones sobre el estado general de la laguna Cañoncillo. Cada punto fue identificado y georreferenciado en coordenadas UTM con el método del GPS (TABLA I).

TABLA I
COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Punto de muestreo	Coordenada X	Coordenada Y
PM-1	0674067	9182653
PM-2	0674062	9182663
PM-3	0674102	9182702
PM-4	0674072	9182740
PM-5	0674070	9182791

En los cinco puntos se analizaron los parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica de manera in situ mediante el uso de un multiparámetro portátil HACH - HQ40d-Multi. Este tipo de

El problema se manifiesta con las proliferaciones de especies vegetales acuáticas oportunistas, que están adaptadas a estas nuevas condiciones ambientales del medio acuático afectado y buscan sustituir a las especies presentes inicialmente, induciendo cambios en la estructura y funcionamiento de todas las comunidades, como las de fitoplancton, zooplancton, fauna bentónica, peces, etc. Las floraciones llegan a representar grandes cantidades de biomasa que al descomponerse por la acción que ejercen las bacterias dan como resultado la disminución del oxígeno del agua provocando condiciones de hipoxia o anoxia, o en algunos casos se pueden generar emisiones tóxicas de CO₂, H₂ y CH₄ [10]. En ocasiones estas proliferaciones pueden ser tóxicas y nocivas; a pesar de ello, se está volviendo cada vez más frecuente en los ecosistemas de agua dulce a nivel mundial [11].

Las respuestas generadas por tal perturbación son inicialmente detectables a nivel fisiológico/bioquímico de un individuo, luego a niveles conductuales o morfológicos y finalmente a nivel de las poblaciones y comunidades. Entonces, los efectos más notables de la eutrofización son: las floraciones vegetales, la pérdida de biodiversidad y la anoxia, que pueden provocar la muerte masiva de organismos acuáticos [10].

Durante la última década, este fenómeno ha llegado a ser un problema de ámbito social más complejo que abarca gran cantidad de diferentes intereses que van desde los ecológicos hasta intereses políticos y económicos, por lo que abordar este tema requiere de la cooperación y colaboración de múltiples partes interesadas, incluidos los gobiernos, la industria, los agricultores, los grupos de defensa del medio ambiente y las comunidades locales [12].

El problema de la eutrofización puede ser reducido llevando a cabo acciones para regular las fuentes de donde provienen los nutrientes, disminuyendo el empleo de fertilizantes, implementando prácticas adecuadas de manejo del suelo, aplicando modelos matemáticos, poniendo en práctica la fitorremediación, entre otras medidas. Además, la conciencia pública sobre la eutrofización puede desempeñar un papel importante en la prevención de la eutrofización de los cuerpos de agua [1], ya que este es un problema que debe ser abordado a escala de los territorios en cuestión, ya que cada situación es única y requiere una solución específica. Para abordar la eutrofización de manera efectiva, es esencial involucrar a todas las partes interesadas y trabajar en equipo para implementar soluciones sostenibles y a largo plazo.

A partir de lo mencionado anteriormente, el presente artículo tiene como objetivo la evaluación del nivel de eutrofización del estado trófico de la laguna Cañoncillo mediante los índices propuestos por Carlson, modificado por Toledo et al. [13] y el por Karydis et al. [14] Además, también se analizarán imágenes satelitales del área de estudio en relación a la pérdida del área del cuerpo de agua a través del tiempo.

instrumento es muy útil para la medición de múltiples parámetros in situ, lo que permite obtener información más precisa y detallada de la calidad del agua en cada punto de muestreo. También se determinó la transparencia del agua a partir del método del Disco Secchi, propuesto en el Protocolo de Transparencia del Agua por Global Learning and Observation to Benefit the Environment [15]

Sumado a ello, se extrajeron muestras de la columna de agua a dos profundidades distintas (1 m y 3 m) haciendo uso de una botella hidrográfica Van Dorn - Wildco de una capacidad de 3.2 L, en base a lo propuesto en el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales [16].

En el laboratorio, las muestras de agua se analizaron por triplicado para determinar las concentraciones de nitratos y fosfatos utilizando el método colorimétrico, que involucra la reacción química de los iones que se encuentran en la muestra de agua, a partir de los reactivos denominados NitraVer 5 (para nitratos) y PhosVer 3 (para fosfatos). También se midió la concentración de clorofila-a utilizando el método tricromático, el cual está basado en la absorción de la luz que se lleva a cabo por el tipo de clorofila presente en la muestra analizada, para luego ser cuantificada con un espectrofotómetro Hach DR 3900.

La determinación del nivel de eutrofización a partir de los datos cuantitativos obtenidos de las concentraciones de nutrientes se estableció a través de la aplicación del Índice de Eutrofización por Nutrientes (IE) de Karydis et al. [14], quien indica la aplicación de la Ecuación (1).

$$I_E = \frac{C}{C - LogX} + LogA \quad (1)$$

Los rangos de clasificación que propone son los siguientes: Oligotrófico = $I_E < 3$; Mesotrófico = $3 \leq I_E \leq 5$; y Eutrófico = $I_E > 5$.

Por otro lado, uno de los índices más utilizados es el Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson, que se calcula a partir de la concentración de clorofila-a y la transparencia del agua. Para la investigación se seleccionó este índice, pero modificado por Toledo et al. [13] por ser una de las últimas modificaciones que se llevaron a cabo. Para ello se aplicaron las Ecuaciones (2) y (3) según cada parámetro.

$$IET_{Clorfa} = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.695 \times \ln(Clorf a)}{\ln 2} \right) \quad (2)$$

$$IET_{DS} = 10 \left(6 - \frac{0.64 + \ln(DS)}{\ln 2} \right) \quad (3)$$

Los rangos de clasificación para este índice son los siguientes: Oligotrófico = $IET < 44$; Mesotrófico = $44 < IET < 54$; y Eutrófico = $IET > 54$.

Finalmente, se recolectaron imágenes satelitales utilizando el software Google Earth Pro desde antes del año 2003 hasta el año 2021, enfocando los hallazgos únicamente en los años en que se observaron modificaciones considerables en el tamaño de la laguna. En total se seleccionaron 9 imágenes, de las que se determinaron las áreas y perímetros del espejo de agua.

III. RESULTADOS

A. Resultados de los parámetros fisicoquímicos

El pH del agua medido a una profundidad de 1 m presentó valores en el rango de 7.94 a 8.15, de los cuales, el menor valor correspondió a PM-5 y el mayor a PM-1. Mientras que, los resultados obtenidos a 3 m, oscilaron entre 7.83 y 8.20, correspondientes a PM-5 y PM-4 respectivamente. Los puntos de muestreo mostraron valores más elevados a 1 m de profundidad, en comparación a los obtenidos a 3 m, a excepción de los puntos PM-2 y PM-4. Además, los resultados con valores más bajos se identificaron en PM-5 en ambas profundidades (Fig. 2).

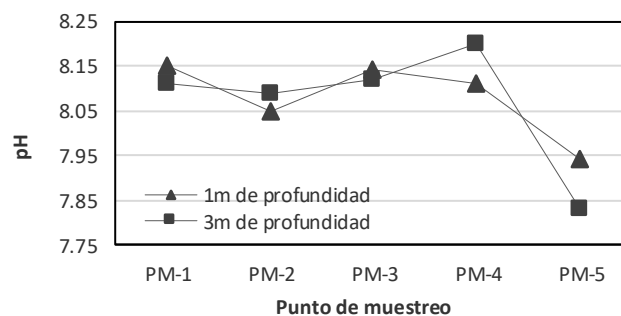


Fig.2 Variación del pH del agua entre las dos profundidades de muestreo

La temperatura del agua obtenida a la profundidad de 1 m presentó valores que oscilaron entre 22.1 y 22.8 °C, el menor valor correspondió al punto PM-4 y el mayor a PM-3. Mientras que, los resultados obtenidos a 3 m variaron entre 22.2 y 23.2 °C, valores correspondientes a los puntos PM-5 y PM-3 respectivamente. En general, los puntos de muestreo mostraron valores más elevados a 3 m de profundidad, en comparación a los obtenidos a 1 m. En el caso de los puntos PM-1 y PM-5, los resultados obtenidos fueron los mismos en ambas profundidades. Además, el punto PM-3 presentó los valores más elevados en ambas profundidades (Fig. 3).

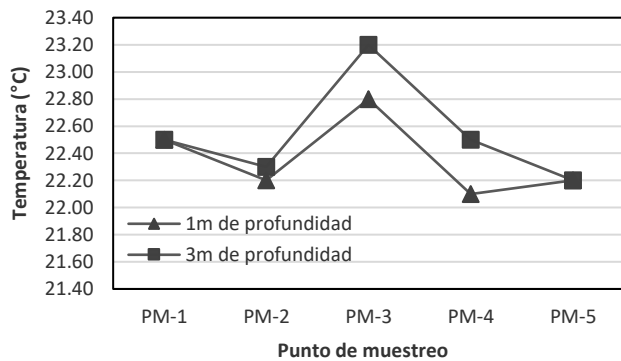


Fig.3 Variación de la temperatura del agua entre las dos profundidades de muestreo

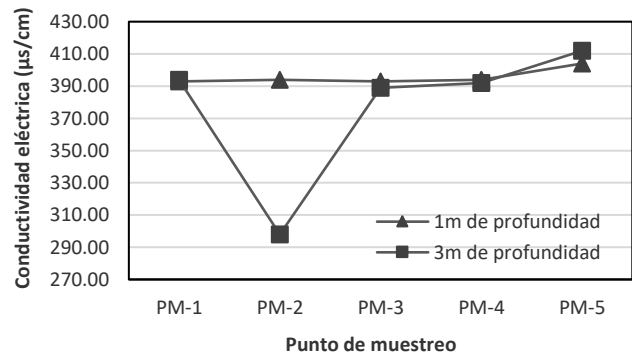


Fig. 5 Variación la conductividad eléctrica del agua entre las dos profundidades de muestreo

El oxígeno disuelto del agua medido a una profundidad de 1 m presentó valores en el rango de 5.45 a 7.63 mg/L, siendo el menor valor correspondiente a PM-5 y el mayor a PM-3. Mientras que, los resultados a 3 m de profundidad oscilaron entre 3.82 y 8.17 mg/L, correspondientes a PM-5 y PM-4 respectivamente. Los puntos de muestreo mostraron valores más elevados a 3 m de profundidad, en comparación a los obtenidos a 1 m, a excepción de PM-3 y PM-5. Además, en el punto PM-5 se obtuvieron los valores más bajos en ambas profundidades (Fig. 4).

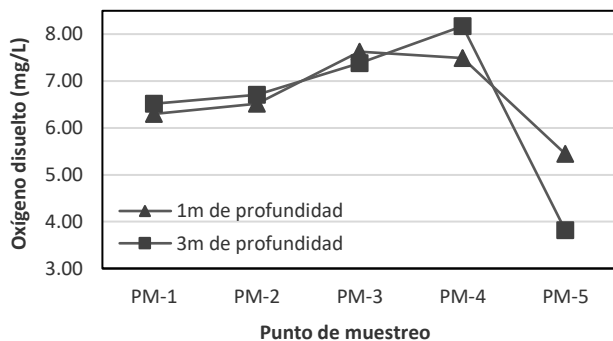


Fig.4 Variación del oxígeno disuelto del agua entre las dos profundidades de muestreo

La conductividad eléctrica medida a una profundidad de 1 m presentó valores que oscilaron entre 393 y 404 µs/cm, el menor fue correspondiente a los puntos PM-1 y PM-3, y el mayor a PM-5. Mientras que, los resultados a 3 m variaron entre 298 y 412 mg/L, valores correspondientes a los puntos PM-2 y PM-5 respectivamente. Los puntos de muestreo mostraron valores más elevados a 1 m de profundidad, en comparación a los obtenidos a 3 m, a excepción de PM-1 y PM-5. Además, en el punto PM-5 resultaron los valores más elevados en ambas profundidades (Fig. 5).

B. Resultados de la concentración de nitratos y fosfatos

Las concentraciones de nitratos identificadas en los cinco puntos de muestreo a una profundidad de 1 m variaron entre los valores de 0.39 mg/L en PM-1 y 1.40 mg/L en PM-2 y PM-5 (el valor obtenido se repitió en ambos puntos). Mientras que, las concentraciones de este nutriente a una profundidad de 3 m, oscilaron entre 1.07 y 2.10 mg/L, valores correspondientes a los puntos PM-2 y PM-3 respectivamente. Por otro lado, se identificó que los resultados del muestreo a 3 m de profundidad fueron superiores en todos los puntos en comparación a los del muestreo realizado a 1 m de profundidad, a excepción de PM-2, donde sucedió lo contrario (Fig. 6).

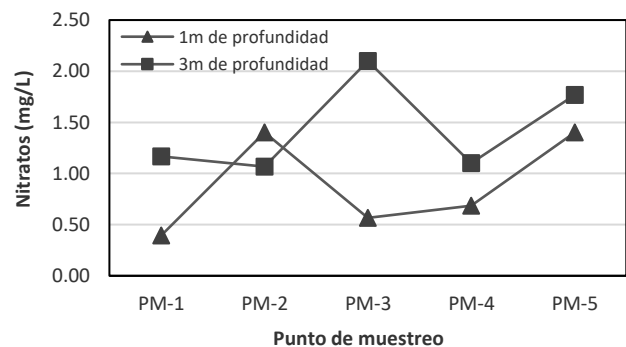


Fig. 6 Variación de la concentración de nitratos en el agua entre las dos profundidades de muestreo

Las concentraciones de fosfatos medidas a 1 m de profundidad en los cinco puntos de muestreo oscilaron entre los valores de 0.08 y 0.18 mg/L, los cuales correspondieron a los puntos PM-4 y PM-5 respectivamente. Por otro lado, los fosfatos a la profundidad de 3 m variaron entre 0.13 y 0.20 mg/L, estos valores correspondieron a PM-5 y PM-1 respectivamente; además, se observó claramente un descenso de las concentraciones en relación a la secuencia de los puntos de muestreo y una constancia en los dos últimos con un valor de 0.13 mg/L en ambos. También, se evidenció que las

concentraciones de este nutriente fueron mayores a 3 m de profundidad, a excepción de los puntos PM-3 y PM-5, donde los valores más elevados sucedieron a 1 m de profundidad (Fig. 7).

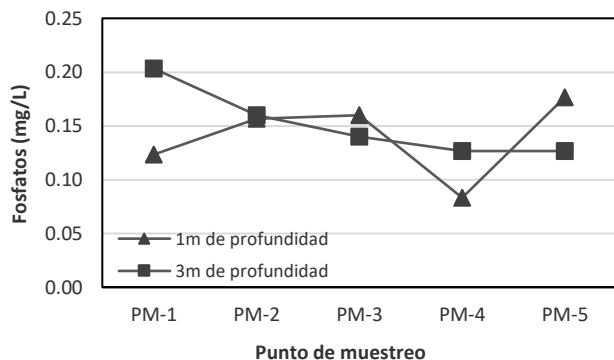


Fig. 7 Variación de la concentración de fosfatos en el agua entre las dos profundidades de muestreo

C. Resultados de la transparencia del agua

Los resultados obtenidos de la transparencia del agua de la laguna Cañoncillo variaron desde 2 m en el punto PM-3 hasta 3 m en el punto PM-2. En el caso de los puntos PM-1 y PM-4 se identificó un mismo valor de transparencia, el cual fue de 2.10 m (Fig. 8).

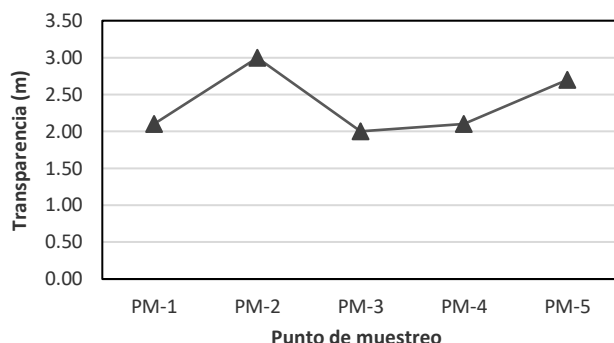


Fig. 8 Resultados de la transparencia del agua en los puntos de muestreo
Nota: Los datos menores significan un mayor grado de transparencia y viceversa.

D. Resultados de Clorofila-a

A partir del proceso del método tricromático para la obtención de la clorofila-a, se logró identificar que el mayor resultado en la muestra tomada a 1 m de profundidad en relación a las longitudes de onda, fue de 1.075 medido a 630 nm; mientras que el menor fue de 0.752 medido a 750 nm. Por otro lado, en la muestra tomada a 3 m se obtuvo el mayor valor a 664 nm y fue de 0.082; y el menor fue de 0.022 a 750 nm. En el primer caso (a 1 m de profundidad) se presenció una relación inversa, pues, a medida que la longitud de onda fue

aumentando, los niveles de clorofila disminuyeron; sin embargo, en el segundo caso (a 3 m de profundidad) sucedió lo contrario, a excepción del valor generado a una longitud de onda de 750 nm, donde el resultado fue el menor de todo el grupo de datos (TABLA II).

Al determinar la clorofila-a expresada en mg/m^3 se observó que a 1 m de profundidad existía una mayor concentración que a 3 m, existiendo una diferencia entre ambos valores de 37 mg/m^3 y un promedio de 41.36 mg/m^3 (TABLA II).

TABLA II
RESULTADOS DE CLOROFILA-A EN AMBAS PROFUNDIDADES DE MUESTREO

Profundidad	Longitud de onda	Clorofila-a	Clorofila-a (mg/m^3)	Promedio
1 m	630 nm	1.075	59.86	41.36
	647 nm	0.985		
	664 nm	0.936		
	750 nm	0.752		
3 m	630 nm	0.028	22.86	
	647 nm	0.038		
	664 nm	0.082		
	750 nm	0.022		

E. Resultados del Índice de Eutrofización por Nutrientes de Karydis et al.

Los resultados de los nutrientes analizados (nitratos y fosfatos) según el índice de Eutrofización por Nutrientes (IE) generaron valores inferiores a 3. En el caso de los nitratos, oscilando entre 1.92 en PM-1 y 2.59 en PM-5, representando de esa manera un estado oligotrófico en todos los puntos (TABLA III).

TABLA III
RESULTADOS DEL ÍNDICE DE EUTROFIZACIÓN POR NUTRIENTES DE KARYDIS ET AL. A PARTIR DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

Punto de muestreo	Profundidad	Nitratos (mg/L)	X	C	A	IE	Clasificación
PM-1	1 m	0.39	1.56	1.07	5	1.92	Oligotrófico
	3 m	1.17					
PM-2	1 m	1.40	2.47			2.28	Oligotrófico
	3 m	1.07					
PM-3	1 m	0.57	2.67			2.37	Oligotrófico
	3 m	2.10					
PM-4	1 m	0.68	1.78			2.01	Oligotrófico
	3 m	1.10					
PM-5	1 m	1.40	3.17			2.59	Oligotrófico
	3 m	1.77					
Promedio		1.17	-	2.23	Oligotrófico		

Así mismo, los valores de IE según la concentración de fosfatos también representaron una clasificación de oligotrófico en todos los puntos; sin embargo, en este caso los resultados variaron entre 0.89 en PM-4 y 0.95 en PM-1 y PM-2 (TABLA IV). Además, los promedios respectivos del IE según los nitratos y fosfatos fueron 2.23 y 0.94.

TABLA IV
RESULTADOS DEL ÍNDICE DE EUTROFIZACIÓN POR NUTRIENTES DE KARYDIS ET AL. A PARTIR DE LA CONCENTRACIÓN DE FOSFATOS

Punto de muestreo	Profundidad	Fosfatos (mg/L)	X	C	A	IE	Clasificación
PM-1	1 m	0.12	0.33	0.16	5	0.95	Oligotrófico
	3 m	0.20					
PM-2	1 m	0.16	0.32			0.95	Oligotrófico
	3 m	0.16					
PM-3	1 m	0.16	0.30			0.94	Oligotrófico
	3 m	0.14					
PM-4	1 m	0.08	0.21			0.89	Oligotrófico
	3 m	0.13					
PM-5	1 m	0.18	0.30			0.94	Oligotrófico
	3 m	0.13					
Promedio		0.15	-	0.94	Oligotrófico		

F. Resultados del Índice de Estado Trófico de Carlson, modificado por Toledo et al.

Los resultados del IET obtenidos a partir de la medición de la transparencia del agua oscilaron entre 40.063 en PM-1 y 40.767 en PM-3, mostrando una clasificación de oligotrófico en todos los puntos de muestreo. Además, el promedio de

estos valores resultó ser 38.449, que también corresponde a una clasificación de oligotrófico por ser menor que 44.00 (TABLA V).

TABLA V
RESULTADOS DEL ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO DE CARLSON, MODIFICADO POR TOLEDO ET AL. A PARTIR DE LA TRANSPARENCIA DEL AGUA

Punto de muestreo	Transparencia (m)	TSI	Clasificación
PM-1	2.10	40.063	Oligotrófico
PM-2	3.00	34.917	Oligotrófico
PM-3	2.00	40.767	Oligotrófico
PM-4	2.10	40.063	Oligotrófico
PM-5	2.70	36.437	Oligotrófico
Promedio	2.38	38.449	Oligotrófico

La concentración de clorofila-a en la muestra tomada a 1 m de profundidad, indicó un resultado de IET de 71.60; mientras que a 3 m de profundidad indicó un IET de 65.91. En ambos casos se superó el valor límite de 54 establecido por el índice, por lo que en las dos profundidades se obtuvo una clasificación de eutrófico. Además, el promedio resultó ser de 66.77, el cual también se clasificó como eutrófico (Tabla VI).


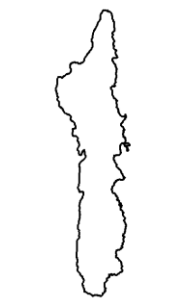




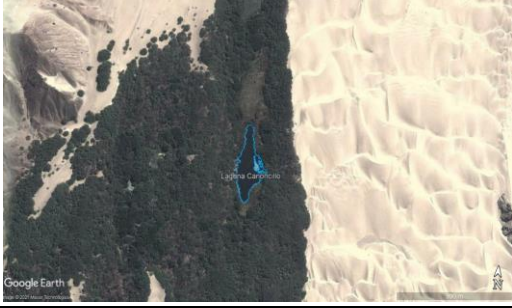


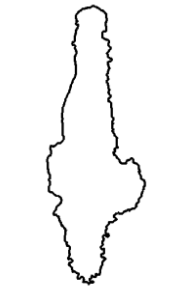
TABLA VI
RESULTADOS DEL ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO DE CARLSON, MODIFICADO POR TOLEDO ET AL. A PARTIR DE LA CLOROFILA-A


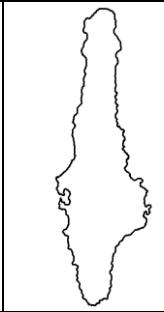






Profundidad	Clorofila-a (mg/m ³)	TSI	Clasificación
1 m	59.86	71.60	Eutrófico
2 m	22.86	61.95	Eutrófico
Promedio	41.36	66.77	Eutrófico

G. Resultados del análisis de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales indicaron que la pérdida total del área del espejo de agua de la laguna Cañoncillo desde antes del año 2003 hasta el año 2021 fue de 2.99 ha; mientras que la pérdida total del perímetro fue de 766.723 m (TABLA VII).

TABLA VII
VARIACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA DE LA LAGUNA CAÑONCILLO A TRAVÉS DEL TIEMPO

ID	Año	Mes	Área del espejo de agua (ha)	Perímetro del espejo de agua (m)	Imagen satelital	Área de la laguna
1	Años anteriores al 2003	-	3.642	1424.743		
2	2003	Mayo	1.232	2127.926		
			0.055	122.639		
3	2012	Mayo	0.893	1067.771		
4	2013	Abril	0.854	958.174		
5	2016	Abril	0.768	580.923		

ID	Año	Mes	Área del espejo de agua (ha)	Perímetro del espejo de agua (m)	Imagen satelital	Área de la laguna
6	2017	Mayo	0.725	584.820		
7	2019	Julio	0.713	603.795		
8	2020	Noviembre	0.673	690.851		
9	2021	Julio	0.652	658.020		

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos del agua son importantes para la evaluación del nivel de eutrofización de los cuerpos de agua, puesto que, este proceso altera el ecosistema acuático. En este caso, el pH del agua es alcalino por superar el valor de 7 en todos los puntos de muestreo, lo que presenta una baja naturaleza corrosiva del agua; además, el aumento del pH es en parte resultado de la tasa reducida de la actividad fotosintética y la asimilación de CO₂ y bicarbonatos [11].

Los valores de temperatura variaron con la profundidad de la columna de agua, lo que puede estar relacionado con la estratificación térmica, por lo que se pueden distinguir capas de agua con diferentes temperaturas.

La estratificación térmica es un factor clave en el intercambio de nutrientes y oxígeno entre las aguas superficiales y profundas, así como en el entorno ligero del fitoplancton [17]. Además, los efectos del calentamiento global, que elevan las temperaturas del agua, interactúan con el incremento de nutrientes de manera combinada. [9].

El valor más bajo de oxígeno disuelto resultó ser de 3.82 en PM-5 a 3 m de profundidad. En este caso, se relaciona a la

muerte de las plantas acuáticas, las que llegan a descomponerse y degradarse por la acción de múltiples bacterias, haciendo que la demanda de oxígeno del agua aumente, y por lo tanto el oxígeno disuelto disminuya [7].

El menor resultado de conductividad eléctrica que se obtuvo se relaciona inversamente con el de oxígeno disuelto, esto debido a que una mayor conductividad eléctrica está asociada con una mayor cantidad de sales en el agua, lo que puede aumentar la capacidad de la solución para conducir electricidad y reducir la solubilidad del oxígeno.

La disminución de la transparencia del agua es en parte un efecto del aumento de la carga de nutrientes, ocasionado por un mayor crecimiento del fitoplancton [18]. Estos organismos llegan a disminuir la cantidad de luz solar incluso hasta las capas más profundas de los cuerpos de agua, disminuyendo así la transparencia o claridad del agua. Esta disminución afecta de manera negativa a la capacidad que poseen los seres vivos acuáticos para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis y de esta manera adquirir energía, lo que logra minimizar la productividad primaria del ecosistema y disminuir la disponibilidad de alimento para los consumidores.

Las concentraciones de nitratos y fosfatos fueron representadas por valores bajos, haciendo que los resultados del índice propuesto sean bajos igualmente y se representaran por un resultado de oligotrófico, lo que significa que es una laguna con baja productividad primaria, por presentar un bajo contenido de nutrientes en sus aguas. Estas lagunas poseen una baja producción de plantas acuáticas, por lo que por lo general presentan aguas cristalinas, con un agua de alta calidad [11]. A pesar de que la baja producción primaria en los lagos oligotróficos, estos suelen indicar un buen contenido de oxígeno y una calidad alta de agua, convirtiéndolos así en hábitats óptimos para el desarrollo de seres acuáticos sensibles y en maravillosas fuentes de agua para uso potable.

En el caso del IET según la transparencia del agua, sucedió lo mismo que con el IE de los nutrientes, pues, los resultados fueron bajos, por lo que en ambos casos se obtuvo una clasificación de oligotrófico. Mientras que, según el IET a partir de la concentración de clorofila-a sucedió lo contrario, pues, en todos los puntos los valores fueron elevados, por lo que se indicó un estado eutrófico de la laguna. Estos cuerpos de agua se caracterizan por contener gran cantidad de plantas acuáticas; en el caso de que las especies dominantes del ecosistema lleguen a ser las algas, el agua tiende a ser de tonos más oscuros. Además, cuando las algas y otros organismos acuáticos mueren y se descomponen, se puede agotar los niveles de oxígeno disuelto en el agua, creando zonas muertas donde no puede sobrevivir la vida acuática y, en última instancia, puede provocar la muerte de peces y otras especies [11].

Por otro lado, las imágenes satelitales también pueden ser utilizadas para monitorear la reducción del cuerpo de agua, es decir, la disminución en su tamaño y volumen. Al comparar imágenes satelitales de diferentes momentos, se pueden observar los cambios en la superficie del cuerpo de agua y su entorno, lo que puede indicar la reducción del mismo, como se

presentó anteriormente, donde la laguna Cañoncillo perdió gran parte de su extensión en los últimos 18 años.

V. CONCLUSIONES

El nivel de eutrofización de la laguna Cañoncillo es oligotrófico según las concentraciones de nitratos y fosfatos y de la transparencia; mientras que según la concentración de clorofila-a es eutrófico por la elevada presencia de plantas acuáticas dentro del cuerpo de agua.

La presencia de plantas acuáticas en un cuerpo de agua se debe a la interacción de múltiples factores, no solo a la disponibilidad de nutrientes en el agua. Aunque los nutrientes son un factor importante para el crecimiento de estas, existen otros elementos que pueden favorecer su proliferación, como la luz solar, la temperatura, la salinidad, la turbulencia del agua y la presencia de sustratos adecuados para el anclaje de las raíces de las plantas. Además, algunas especies de plantas acuáticas son capaces de crecer en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes, y en algunos casos, incluso pueden capturar nutrientes de fuentes no convencionales, como el aire o el suelo debajo del agua.

La problemática de la eutrofización es compleja y requiere de una acción coordinada a nivel local, regional y global para abordarla adecuadamente y así evitar daños catastróficos que no solo afectan los ecosistemas acuáticos, sino a todos.

AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo de la Universidad Privada del Norte (UPN) y al Laboratorio de Ecología de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC) por las facilidades prestadas para el desarrollo del trabajo de investigación. Agradecer también a los ingenieros Sandra Villegas Chavarry y Fernando Díaz Llontop por el apoyo en los trabajos de campo.

REFERENCIAS

- [1] M. Khan and M. Firoz, "Eutrophication: Challenges and Solutions," in *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*, A. Ansari and S. Gill, Eds. Springer, Dordrecht, 2014, pp. 1-15.
- [2] Y. Li et al., "Anthropogenic activities accelerated the evolution of river trophic status," *Ecological Indicators*, vol. 136, pp. 1-9, March 2022.
- [3] G.S. Sruthy et al., "Fuzzy logic approach for the assessment of trophic state of water bodies," *Ecological Engineering*, vol. 169, pp. 1-10, June 2021.
- [4] B. Bhagowati and K.U. Ahmad, "A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling," *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 50, no. 1, pp. 155-166, March 2018.
- [5] D. P. Moreno, J. Quintero and A. López, "Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia," *Contactos*, Vol. 78, pp. 25-33, November 2010.
- [6] A. Moreno, "Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia)," *Logos, Ciencia & Tecnología*, Vol. 10, no. 2, pp. 172-203, March 2018.
- [7] G. Vásquez et al., "Metodología para determinar niveles de eutrofización en ecosistemas acuáticos," *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, Vol. 24, pp. 112-128, June 2012.

- [8] E. Jekatierynczuk-Rudczyk et al., "The trophic status of Suwałki Landscape Park lakes based on selected parameters (NE Poland)," *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 186, pp. 5101-5121, May 2014.
- [9] D. W. Schindler, S. R. Carpenter, S.C. Chapra, R. E. Hecky and D. M. Orihel, "Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication is a Success," *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, no. 17, pp. 8923-8929, February 2016.
- [10] M. Le Moal et al., "Eutrophication: A new wine in an old bottle?," *Science of The Total Environment*, Vol. 615, pp. 1-11, September 2018.
- [11] R. Bhateria and D. Jainista, "Water quality assessment of lake water: a review," *Sustainable Water Resources Management*, vol. 2, pp. 161-173, March 2016.
- [12] B. Vinçon-Leite and C. Casenave, "Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review," *Science of The Total Environment*, Vol. 651, pp. 2985-3001, September 2018.
- [13] A. P. Toledo, M. Talarico, S. J. Chinez and E. G. Agudo, "A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais", in *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Camburiú.
- [14] M. Karydis, L. Ignatiades and N. Moschopoulou, "An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment," *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 16, no. 3, pp. 339-344, September 1983.
- [15] Global Learning and Observation to Benefit the Environment, "Protocolo de Transparencia del Agua", Área de hidrología, Argentina, 2005.
- [16] Autoridad Nacional del Agua, "Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales," Ministerio de Agricultura y Riego, Perú, 2016.
- [17] G. Kirillin and T. Shatwell, "Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes," *Earth-Science Reviews*, Vol. 161, pp. 179-190, August 2016.
- [18] J. H. Andersen, "Getting the measure of eutrophication in the Baltic Sea: towards improved assessment principles and methods," *Biogeochemistry*, Vol. 106, pp. 137-156, July 2010.