

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de
eutrofización en lagunas altoandinas**

Por:

Soncco Murga Rocio Heredia

Alvarez Rivas Daniel Josue

Asesor:

Msc Jael Calla Calla

Juliaca, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Jael Calla Calla, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: “ESTADO DEL ARTE SOBRE LOS INDICES QUE DETERMINAN EL NIVEL DE EUTROFIZACION EN LAGUNAS ALTOANDINAS” constituye la memoria que presentan los estudiantes Rocío Heredia Soncco Murga y Daniel Josue Alvarez Rivas para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 08 días del mes de setiembre del año 2020



MSc Jael Calla Calla
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 06 día(s) del mes de agosto del año 2020 siendo las 8:30 horas

se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, bajo la dirección del (de la)

presidente(a) Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

secretario(a) Ing. Miguel Angel Salcedo

y los demás miembros

Msc. Rose Adeline Gallata Ghura

y el(la) asesor(a) Msc. Jael Galla Galla

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de

investigación titulado: Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de eutrofización en lagunas altoandinas

de los (las) egresados (as): a) Daniel Josue Alvarez Rivas

b) Rocio Heredia Soncco Murga

conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en

Ingeniería Ambiental

(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por los candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Daniel Josue Alvarez Rivas

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato/a (b): Rocio Heredia Soncco Murga

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó a los candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de eutrofización en lagunas altoandinas

Art state about indices that determine the eutrophication level in highland lagoons

Soncco Murga Rocio Heredia ^{a*}, Alvarez Rivas Daniel Josue ^b, Calla Calla Jael ^c

^aFacultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión Filial Juliaca Salida Arequipa Km6

^bFacultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión Filial Juliaca Salida Arequipa Km6

^cFacultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión Filial Juliaca Salida Arequipa Km6

Resumen

La eutrofización es la excesiva acumulación de nutrientes en cuerpos de agua, la cual es un peligro para los recursos hídricos. Las lagunas altoandinas también se ven involucradas con este problema debido al crecimiento poblacional, que trae consigo diversas actividades antropogénicas como agricultura, ganadería, piscicultura, entre otras. La importancia de contar con un índice de estado trófico adecuado radica en que este determina el estado eutrófico en el que se encuentra un cuerpo de agua, utilizando indicadores selectos los resultados obtenidos serán adecuados en cada índice; que tienen rangos específicos para clasificar el estado trófico en el que se encuentra el cuerpo de agua. El objetivo fue identificar los índices que determinan el estado eutrófico en cuerpos de agua lénticos (lagunas) en zonas altoandinas, mediante la comparación de diversas investigaciones. La metodología utilizada fue la revisión bibliográfica de investigaciones realizadas en zonas altoandinas que son consideradas a partir de los 2300 msnm de altitud, que se caracterizan por tener climas templados y fríos. Diversos investigadores que buscaron determinar el estado trófico en lagunas altoandinas se basaron en el índice de OCDE – 1982, mayormente por su facilidad de uso, y el índice de TSI, aunque existe una gran cantidad de modificaciones; observándose el uso del índice de OCDE – 1982 porque es el más usado y adaptable a zonas con mayor altitud según diversos estudios. Por lo tanto, se concluye que no se puede determinar con certeza el índice más adecuado para determinar el estado de eutrofización en una laguna altoandina.

Palabras clave: índices tróficos; lagunas altoandinas; eutrofización; estado trófico; léntico

Abstract

Eutrophication is the excessive accumulation of nutrients in water bodies, which is a danger to water resources. The high Andean lagoons are also involved with this problem due to population growth, which brings with its various anthropogenic activities such as; agriculture, livestock, fish farming, and others. The importance of having an adequate trophic state index is that it determines the eutrophic state in which a waterbody is found, using selected indicators and the obtained results will be adequate in each index; which has specific ranges to classify the trophic state in which the waterbody is found. The objective was to identify the indices that determine the eutrophic state in lentic water bodies (lagoons) in high Andean areas, by comparing various investigations. The methodology used was the bibliographic review of research carried out in high Andean areas that are considered from 2300 meters above sea level, which are characterized by having temperate and cold climates. Many researchers who sought to determine the trophic status in high Andean lagoons relied on the OECD index - 1982 largely for its ease of use, and the TSI index, although there are a large number of modifications; observing the use of the OECD index - 1982, because it is the most used and adaptable to areas with higher altitudes according to various studies. Therefore, it is concluded that the most adequate index to determine the eutrophication status in a high Andean lagoon cannot be determined with certainty.

Key words: trophic indices; high Andean lagoons; eutrophication; trophic state; lentic

* Autor de correspondencia:

Km. 6 Carretera Salida, Juliaca, Puno

Tel.: +51 946668594 - +51 983759221

E-mail: rocio.soncco@upeu.edu.pe, danielalvarez@upeu.edu.pe

1. Introducción

El exceso de nutrientes en las aguas de mares, ríos, lagos y lagunas es un grave problema para la vida acuática, debido a que acaba con la vida de peces y moluscos. La eutrofización o hipertrofia es un proceso mayormente de origen antrópico (Smith & Smith, 2001). Dicho proceso, en estos últimos años, se ha ido incrementando debido al crecimiento poblacional urbano, esto ocasiona mayor concentración de residuos sólidos y líquidos (Western, 2001), los cuales incrementan la concentración de nutrientes en los cuerpos de agua léntico.

Las lagunas en zonas altoandinas también son propensas a la problemática de la eutrofización, puesto que el crecimiento poblacional acelerado genera que las personas no encuentren un lugar donde vivir, debido a los altos costos en vivienda, esto varía dependiendo de la cercanía a la zona urbana. Por tanto, optan por acentuarse en lugares alejados a menor costo y con más grandes espacios. Los pobladores aledaños a una laguna pueden beneficiarse realizando diferentes actividades como, por ejemplo: piscicultura, agricultura, ganadería, etc.; muchas veces para mejorar la producción de cada una de estas se requiere de nutrientes adicionales como el nitrógeno y fósforo tanto en la agricultura como en la piscicultura. En particular, estos compuestos químicos no son aprovechados en su totalidad, por ello el porcentaje restante incrementa considerablemente el estado trófico en las lagunas.

Estas lagunas son procedentes directa o indirectamente de los nevados, también constituyen un potencial hídrico y algunas de ellas por la cercanía a los glaciares son asociadas a desastres de ahí que están siendo evaluadas a partir de la década de 1940 como investigación glaciológica en el Perú (ANA, 2013). La importancia de la laguna radica en que son recursos hídricos de agua dulce, los cuales beneficia a una gran cantidad de especies de igual forma al ser humano en el consumo (previo tratamiento) o en las actividades como la agricultura y ganadería. Además, existen muchos lugares donde las lagunas son usadas como centros de atracción de actividades turísticas y recreativas.

Por ello, es de gran importancia determinar el tipo de índice que se usará para determinar el estado trófico de una laguna y obtener un dato relativo con otros sistemas, es así que se utilizan índices del estado trófico calculados en base a diferentes indicadores. Un tipo de valoración del estado trófico se centra en comparar los datos conseguidos experimentalmente con unos valores fijos formulados para cada rango. La OCDE (Vollenweider, 1982) utiliza la media anual de clorofila 'a' ($Chla$, mg/m^3), el valor máximo anual de clorofila 'a' ($Chla$ máx., mg/m^3), la media anual de fósforo total (PT, mg/m^3) y la profundidad media anual de visión del disco de Secchi (m) (López & Madroño, 2015). Otro método para evaluar objetivamente el estado trófico es el índice de Carlson (1977), este propuso el cálculo de un índice para dar una escala numérica y evaluar el estado trófico de un cuerpo de agua (Índice de estado trófico de Carlson - CTSI) midiendo la turbidez y la concentración de Chl-a. CTSI se calcula en función de relaciones empíricas entre SDD, Chl-a y TP. En base a esto las relaciones son propiedades locales definidas para entornos similares al Área de estudio

de Carlson; por lo tanto, las modificaciones de CTSI debe ser utilizada de acuerdo con los parámetros ambientales locales específicos (Membrillo et al., 2016).

Por consiguiente, los indicadores físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza, así como de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, pero sin contribuir datos de su influencia en la vida acuática; los indicadores biológicos aportan esta información, pero no señalan nada acerca de los contaminantes, por lo que los investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco et al., 2002).

La ventaja de los indicadores fisicoquímicos se centra en que sus análisis se obtienen de forma más rápida, es por esto que pueden ser monitoreados con mayor frecuencia, en comparación con los indicadores biológicos, que obtienen sus resultados en base a una observación y medición de ciertas comunidades de seres vivos presentes en las aguas; su elección de especie debe ser cuidadosa, de esta dependerá la evaluación de la calidad del recurso que generalmente se realiza para un uso determinado, a diferencia de los indicadores físico-químicos donde sus resultados servirán para diferentes usos (Samboni et al., 2007).

Según las metodologías descritas por OCDE, APHA y Carlson, el nivel de eutrofización de la laguna Conococha en agosto del 2012 se encuentra en el nivel eutrófico a hipereutrófico (Díaz et al., 2013).

De acuerdo a los indicadores fisicoquímicos, en la laguna Ñahuinpuquio la concentración de fósforo total determinada en temporada de estiaje es de 1,20 mg/l y en época de lluvia 1,26 mg/l. Según la clasificación del nivel trófico propuesta por OECD (Vollenweider, 1982), se evidencia que la laguna presenta un nivel ultraoligotrófico, debido a que el valor propuesto por la organización es < 4 (mg/l). La concentración de nitrato (N-NO₃) presente en la laguna de Ñahuinpuquio, en temporada de estiaje es de 86 µg/l y en época de lluvia es de 92 µg/l, colocando a la laguna en su máxima clasificación, a un nivel mesotrófico, comparando con la clasificación propuesta por el APHA en 1981 (Campos, 2015).

Por otro lado, en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina) para determinar el estado de eutrofización se utilizó el índice OCDE y, según ello, se identificó que se encontraría experimentando un deterioro en la calidad del agua y un avance progresivo hacia un estado elevado de eutrofia, pasando desde mesotrófico a eutrófico (Ledesma et al., 2013).

Para el caso de la Laguna de la Cocha (Colombia), se utilizaron los índices de estado trófico IET e IETM, donde como resultado se clasificó entre el rango de oligotrófica y ultraoligotrófica. Esta clasificación suele ser típica de lagos de alta montaña con inferiores procesos de contaminación de origen alóctono y autóctono, que evidencian una buena calidad de agua con poco crecimiento de algas y alta oxigenación presente en el agua (López & Madroño, 2015).

Según Gunkel & Casallas (2002), dentro del estudio del lago de San Pablo durante el período de estratificación (desde setiembre hasta mayo) en la capa superficial se encuentra fósforo reactivo soluble (PO₄₃ - P) en concentraciones promedias de 0.07 mg/l (reacciones estándar = 0.02 mg/l) y de 0.11 mg/l de

fósforo total. En la temporada de estratificación existe un ambiente anaeróbico en el hipolimnion. La transparencia del disco Secchi oscila entre 2.5 a 4 m. Debido a su similitud con los lagos fríos de la zona templada, el Lago San Pablo puede ser clasificado como lago eutrófico, de acuerdo con el índice OCDE (Vollenweider, 1982). Durante el periodo de mezcla (de junio a agosto) en general se puede afirmar que la columna de agua está bien mezclada y se pueden encontrar concentraciones de fósforo reactivo soluble hasta de 0.15 mg/l PT. Las concentraciones de nitrógeno son comparativamente bajas (menores de 0.3 mg/l NH₄ y 0.5 mg/l NO₃). Durante el período de mezcla el contenido de NO₃ puede subir hasta 3 mg/l.

El presente estudio tomará como área de referencia la zona altoandina del Perú, que abarca una gran parte de la Sierra. El objetivo de la investigación será identificar los índices que determinan el estado eutrófico en cuerpos de agua lénticos (lagunas) en zonas altoandinas a través de la comparación de diversas investigaciones.

2. Desarrollo o revisión

2.1. Eutrofización

Eutrofización proviene etimológicamente de la palabra griega “eutros”, eu=bien y trofein=nutrir o alimentar, que significa bien nutrido o alimentado (Domènech, 2000); es decir, consiste en la cantidad excesiva de materia orgánica en el agua, provocando el crecimiento rápido de algas y otras plantas de pigmento verde que cubre la superficie e imposibilita el ingreso de la luz solar a las capas inferiores (Quiroz, 2019).

La eutrofización en las aguas es un proceso natural o antropogénico que es el enriquecimiento de las aguas por nutrientes, a una consecuencia de que no puede ser proporcionado por la mineralización total, esto provoca el incremento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, las cuales al caer se sedimentan en el fondo de los lagos, generando residuos orgánicos que al descomponerse consumen gran cantidad de oxígeno disuelto y; en consecuencia, puede afectar la vida acuática y provocar la muerte por asfixia de la flora y fauna (Goitía, 2011). El proceso de fertilización es el que causa una alta productividad y biomasa en un ecosistema acuático, lo cual se da por la actividad humana (agricultura) (Epa & of the Regional Administrator, 2011). En dicha situación, es alterado su estado de equilibrio que genera la modificación de su funcionamiento, acelerando procesos indeseables (RAPAL, 2010).

Los niveles eutróficos en un cuerpo de agua se pueden clasificar dependiendo del nivel de productividad biológica, como se muestra en la siguiente figura:

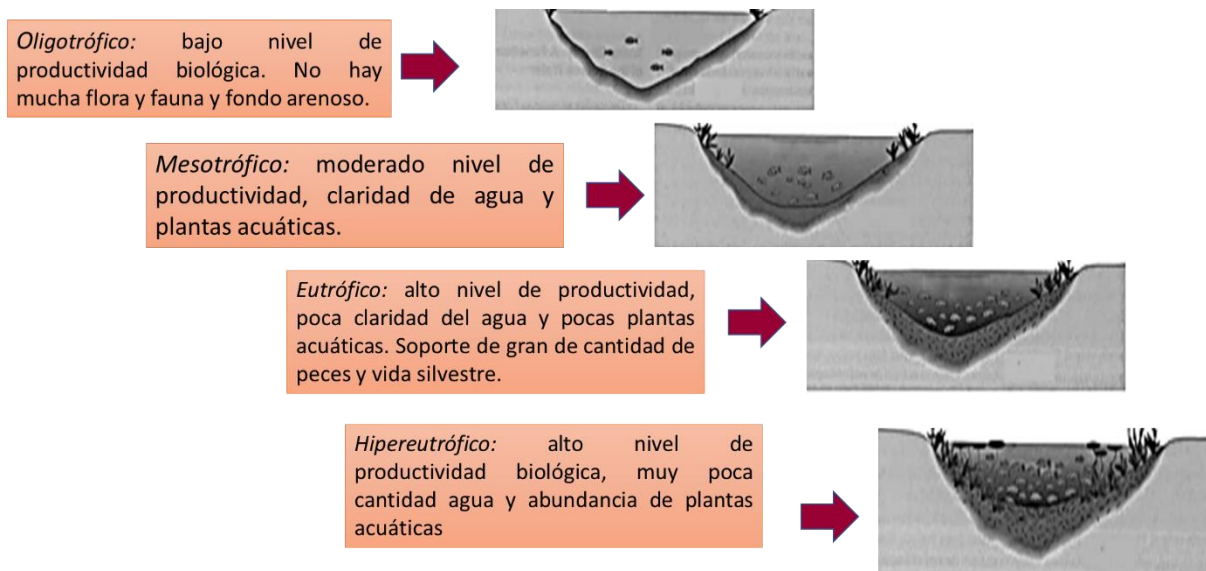


Figura 1. Niveles eutróficos (Nebel & Wright, 1999)

2.1.1. Causas de la eutrofización

Las causas principales de la eutrofización en las lagunas es el aumento masivo de nutrientes de fósforo y nitrógeno que ingresan por diversas vías a partir de materiales que son transportados por precipitación, vertidos agrícolas, industriales y domésticos. El aumento de nutrientes es por la descomposición de la materia orgánica en el sistema (laguna), que se da a través de diferentes procesos fisicoquímicos quedando depositados en el sedimento que puede ser la fuente de nutrientes, así como lo describe las condiciones de redox como una fuente de nutrientes. En épocas de estiaje, se mantienen estas condiciones como la alta producción, grandes cantidades de biomasa de microalgas y plantas. Los indicadores que intervienen en el estado trófico son tanto físicos, químicos como biológicos. Los compuestos nitrogenados y fosfatos son los mayores causantes de la eutrofización (Mateu, 2017).

Tabla 1

Principales causas de eutrofización

Naturales	Antropogénicas
Aporte de contaminantes de la atmósfera mediante la precipitación	Vertidos residuales, agrícolas, urbanos y plantas de tratamiento
Sedimentos suspendidos en un canal y transportados con el paso de agua.	Uso masivo de fertilizantes.
Liberación de sedimentos anóxicos, causantes de la turbidez.	Pozos sépticos
Descomposición de organismos y sedimentación de los mismos.	Uso excesivo de detergente que contienen gran cantidad de fósforo
Adición de nitrógeno procedentes de microorganismos	Arrastre de contaminantes mediante agua de Lluvia
	Sistemas de alcantarillado de ciudades aledañas.

Nota. Mateu (2017)

2.1.2. Eutrofización en lagunas

Una laguna sufre el proceso de eutrofización cuando sus aguas se enriquecen en nutrientes. Esto podría parecer bueno a simple vista, porque así se podrían desarrollar más cómodamente los seres vivos que en él habitan. Sin embargo, la situación no es tan simple, el problema radica que, a mayor presencia de nutrientes, habrá un crecimiento excesivo de plantas y otros organismos. Donde por falta de oxígeno, mueren, se fermentan y generan agua con malos olores y lo convierten en un lugar nauseabundo, haciéndolo inhabitable para muchas especies, reduciendo drásticamente su calidad (Moreta, 2011). El proceso de fermentación utiliza una gran cantidad del oxígeno disuelto; por ello, las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos. Tal resultado daría el inicio de la destrucción del ecosistema (Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2011).

La eutrofización se refiere a toda esta cadena de sucesos que dan inicio al enriquecimiento de nutrientes, el incremento y muerte del fitoplancton, la acumulación de sedimentos, el incremento de bacterias, la escasez de oxígeno y sofoco de organismos superiores (Nebel & Wright, 1999).

2.1.3. Efectos del proceso de eutrofización

Cuando una laguna se encuentra en estado eutrófico, este comienza a sufrir una alteración de la biota y de la diversidad biológica, incitando a la proliferación de algas, cianobacterias y micrófitos en abundancia. El incremento de estos organismos provoca turbiedad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua. Por ello, se genera de manera directa la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de la columna de agua y; por lo tanto, una deficiente producción de oxígeno libre; paralelamente incrementa la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie (Álvarez, 2015).

El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma progresiva en un ambiente anaerobio y, en consecuencia, un incremento de gases como anhídrido carbónico (CO₂), anhídrido sulfuroso (H₂S) y metano (CH₄) haciendo poco posible la vida de la mayoría de las especies que lo forman. “Se da por tanto mortandad masiva de biota en general, bioacumulación de sustancias toxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, reduciendo la vida útil, proliferando la aparición de organismos patógenos y vectores que ocasionan enfermedades” (Zouiten, 2012).

2.2. Índices de estado trófico

Los índices tróficos se usan como referencia para determinar el estado eutrófico de los cuerpos de agua, surge la necesidad de crearlos mediante la evaluación de determinados indicadores que posibilite obtener las condiciones de los cuerpos de agua, estos índices brindan información conveniente para implementar criterios de manejo en los cuerpos de agua, así como determinar la situación trófica. De acuerdo con Contreras (como se citó en Gómez et al., 2014), cuantificar los nutrimentos de los cuerpos de agua se vuelve esencial para la evaluación de la dinámica trófica. La medición de estos permite su clasificación que varía desde oligotrófico hasta hipertrófico.

Los índices son herramientas que proporcionan información sinóptica sobre el estado eutrófico de los ecosistemas acuáticos, lo cual permite generar criterios ecológicos para definir acciones de gestión y conservación de estos ambientes (Muciño et al., 2017).

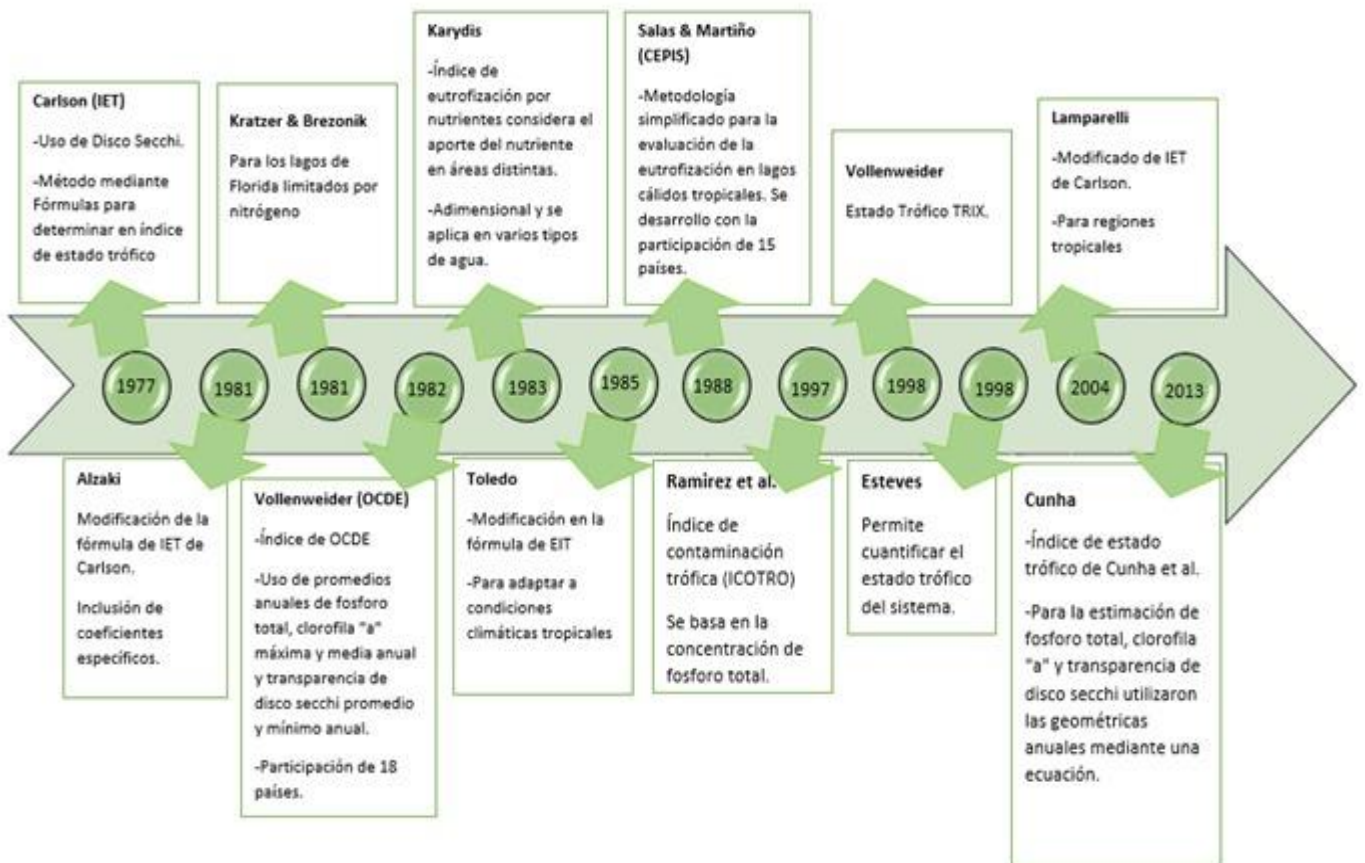


Figura 2. Índices propuestos y modificados durante los años, que determinan el estado eutrófico en cuerpos de agua.

Los sistemas de clasificación trófica se desarrollaron inicialmente para entornos templados (por ejemplo, Carlson, 1977; OCDE, 1981). En un intento por evaluar la eutrofización en áreas tropicales, también se desarrollaron varios índices que consideran las características particulares de estos ambientes. Por ejemplo,

el índice desarrollado por Toledo et al. (1983), que se construyó de manera similar al índice de Carlson (1977), se calcula de una manera que da menos peso a la variable "transparencia del agua" que se ve directamente afectada por la alta turbidez de las aguas tropicales durante la mayor parte del año. Salas y Martino (1991) propusieron un modelo trófico simplificado basado en los niveles de fósforo. Más recientemente, Lamparelli (2004) propuso un índice modificado basado en el índice de Carlson (1977) (Silvino & Barbosa, 2015).

2.2.1. Índice de Carlson o índice de estado trófico (TSI)

Propuesto en 1977, fue uno de los primeros índices planteados para sistemas acuáticos; está basado en la utilización del disco de secchi para la medición de la transparencia del agua a través de la columna de agua del lago. Esta determina el nivel de refracción de la luz a través de la turbidez y el color que presente el volumen de agua por efecto de descargas de sólidos (suspendidos, volátiles o sedimentables) o por la formación de sistemas coloidales o soluciones complejas. Posteriormente publicado el trabajo de Carlson, en el año de 1981, Alzaki propuso una modificación en la fórmula del Índice de Carlson a través de la inclusión de coeficientes específicos para cada elemento que integra la composición del estado trófico.

Adicionalmente, se aplicaron regresiones lineales transparencia Secchi-clorofila "a" y transparencia Secchi-fósforo total a partir de la información disponible. A los resultados de clorofila se les aplicó una transformación log-log para lograr un ajuste lineal. El fósforo total se podría correlacionar mejor con la transparencia cuando este sea el factor limitante (Toro, 2019). Finalmente, el \log_2 fue transformado en \ln para obtener las siguientes ecuaciones:

Tabla 2

Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua

Estado de eutrofia	TSI	DS(m)	Pt(mg/m ³)	Clorf a(mg/m ³)
	0	64	0.75	0.04
Oligotrófico (TSI<30)	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
	40	4	12	2.6
Mesotrófico (30<TSI<60)	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
	70	0.5	96	56
Eutrófico (60<TSI<90)	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
Hipereutrófico (90<TSI<100)	100	0.06	768	1183
Relación de los parámetros de eutrofización		$\frac{TSI \ Ds}{2}$	$2 \times TSI \ Pt$	$\sqrt{7.8 TSI \ Clorf \ a}$

Nota. Modificado de Carlson (1977;1980)

Tabla 3*Fórmulas para estimar el estado trófico aplicando los indicadores de eutrofia*

Parámetro de eutroficación	Carlson (1977; 1980)	Aizaki et al. (1981)
Claridad del agua (Ds)(m)	TSI Ds = 60 - 14.41Ln (Ds)	TSI DS = 10 × (2.46 + $\frac{3.76-1.57Ln(Ds)}{Ln2.5}$)
Fósforo total (Pt) (mg/l)	TSI Pt = 14.42Ln (Pt) + 4.15	TSI Pt = 10 × (2.46 + $\frac{6.68-1.15Ln(Pt)}{Ln2.5}$)
Clorofila a (Clorf a) (mg/m ³)	TSI Clorf a = 9.81Ln (Clorfa) + 30.6	TSI Clorf a = 10 × (2.46 + $\frac{Ln(Clorf a)}{Ln2.5}$)
Nitrógeno total (Ntotal) (mg/lt) T	TSI TN = 54,45 + 14,43 ln (TN)	-----

Nota. Modificado de Carlson (1977; 1980) y Aizaki et al. (1981)

Donde:

IST (DS): Índice de estado trófico de Carlson disco secchi

IST (Cl. "a"): Índice de estado trófico de Carlson clorofila "a"

IST (PT): Índice de estado trófico de Carlson fósforo total

Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo (IETM).

Toledo (1985) planteó modificaciones en la formulación matemática del IET con el fin de adecuarlo a condiciones climáticas de los ambientes tropicales, modificación aplicada en un estudio realizado en un reservorio ubicado en la población de Barra Bonita en Brasil.

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

$$IETM(DS) = 10 \left(6 - \frac{0,64 + \ln(Ds)}{\ln(2)} \right) \quad (1)$$

$$IETM(Cl.a) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln(Cl."a")}{\ln(2)} \right) \quad (2)$$

$$IETM(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{80,32}{PT}\right)}{\ln(2)} \right) \quad (3)$$

Donde:

IETM (DS): Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo disco secchi

IETM (Cl. "a"): Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo clorofila "a"

IETM (PT): Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo fósforo total

Los valores obtenidos al aplicar las ecuaciones varían en una escala de cero a cien y los criterios de aplicación se resumen en la tabla, citada anteriormente.

Tabla 4*Criterio de aplicación del IET.*

Valor índice	Categoría trófica
< 30	Ultraoligotrófico
30 - 44	Oligotrófico
44 - 54	Mesotrófico
54 - 74	Eutrófico
> 74	Hipereutrófico

Nota. Toledo (1985)

2.2.2. Índice Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

Cooperación sobre la eutrofización de la OCDE realizado en la década de 1970 con la participación de connotados científicos de 18 países y coordinado por Vollenweider (OCDE, 1982) crearon una secuencia de categorías tróficas cimentada en las concentraciones de Pt, Clorf a, nitrógeno total (Nt) y transparencia medida con el Ds. Dada la compleja interacción entre las numerosas variables que intervienen en la eutrofización, Janus y Vollenweider (1981) llegaron a la conclusión de que es imposible establecer una limitación estricta entre las distintas categorías tróficas (Moreno et al., 2010).

Tabla 5

Categorías de estado trófico de la OECD, 1981.

Categoría trófica	Pt (ug/L)	Clorf a (ug/L)		Transparencia DS (m)	
		Media	Máxima	Media	Mínimo
Ultraoligotróficos	< 4.	< 1	< 2.5	>12	> 6
Oligotróficos	4 – 10	1 – 2,5	2.5 – 8	12 – 6	6 – 3
Mesotrófico	10 – 35	2,5 – 8	8 – 25	6 – 3	3 – 1,5
Eutrófico	35 – 100	8 – 25	25 – 75	3 – 1,5	1,5 – 0,7
Hipereutrófico	>100	>25	>75	< 1,5	< 0,7

Nota. Modificado de OCDE (Vollenweider, 1982).

Teniendo en cuenta el APHA, los valores para definir el estado trófico según la variable de nitrógeno ($\text{NO}_3\text{-N}$) es la siguiente (Díaz et al., 2013):

Tabla 6

Clasificación general (APHA, 1981)

Estado trófico	Nitrógeno ($\text{NO}_3\text{-N}$) (ug/L)
Oligotrófico	1 – 50
Mesotrófico	60 – 200
Eutrófico	> 200

Nota. APHA (1981)

2.3. Indicadores más utilizados para zonas altoandinas

Nitrógeno

Es un nutriente esencial para el fitoplancton razón por la cual puede ser el factor limitante para su desarrollo. El uso extendido de fertilizantes nitrogenados (NH_4 NO_3 , KNO_3 , NaNO_3) puede contribuir de manera significativa a la población de anfibios. Este u otros compuestos nitrogenados puede provenir de la agricultura, de excrementos de diferentes organismos, dentro de ello está las aguas negras de las poblaciones o de alimentos de la acuicultura que se puede presentar en forma sólida o disuelta, de origen orgánico o inorgánico (Fontúrbel, 2016). El método de monitoreo es de forma de nitratos.

Fósforo

Es uno de los indicadores químicos, el cual se mide las concentraciones en forma de fósforo total y de ortofosfatos. Siendo un nutriente esencial del fitoplancton, frecuentemente es el factor limitante de su

crecimiento (Yojoa et al., 2007). Es usado como un indicador de calidad de agua y estado trófico en lagos, porque es correlacionado con indicadores como clorofila, nitrógeno y biomasa algar.

Disco Secchi

Este indicador físico indica la pérdida vertical de la luz, medido por el disco de secchi. Por su relación con el fitoplancton sirve de indicador del estado trófico de un cuerpo de agua (laguna). La acumulación masiva de fitoplancton disminuye la transparencia. Sus variaciones pueden indicar las dudas en la densidad de algas y así indirectamente los niveles de los nutrientes limitantes. Además es un indicador de evaluación sencilla, rápida y de bajo costo (Maldonado, 2018).

Clorofila “a”

Este indicador proporciona una medida indirecta de la biomasa de algas y aporta como variable en la determinación del estado trófico en cuerpos de agua léntico. Se define como el pigmento verde responsable de la capacidad de la planta para convertir la luz solar en la energía química necesaria para fijar CO₂ en hidratos de carbono (Gómez et al., 2014). Para la determinación se puede utilizar el método espectrofotométrico.

2.4. Análisis de la investigación

Comparación de tres lagunas altoandinas

Se tomó como referencia tres trabajos de investigación que determinaban el nivel de eutrofización de lagunas en zonas altoandinas.

Tabla 7
Clasificación de zonas por altitud

Zona	Altura
Sierra	500 - 6768 msnm
Zona altoandina	2300 - 6768 msnm

Nota. (Anaya, 2014)

Comúnmente se le suele llamar Sierra a las zonas altoandinas, para lo cual se tomó como referencia el Decreto Supremo N.º 051-2010-EF, donde se destaca la ubicación basándose en la altitud, según la Ley N.º 29482, en la cual se aprecia que están constituidas a partir de las regiones denominadas quechua, Suni, Puna y Janca, es decir, desde los 2,300 msnm. (Anaya, 2014).

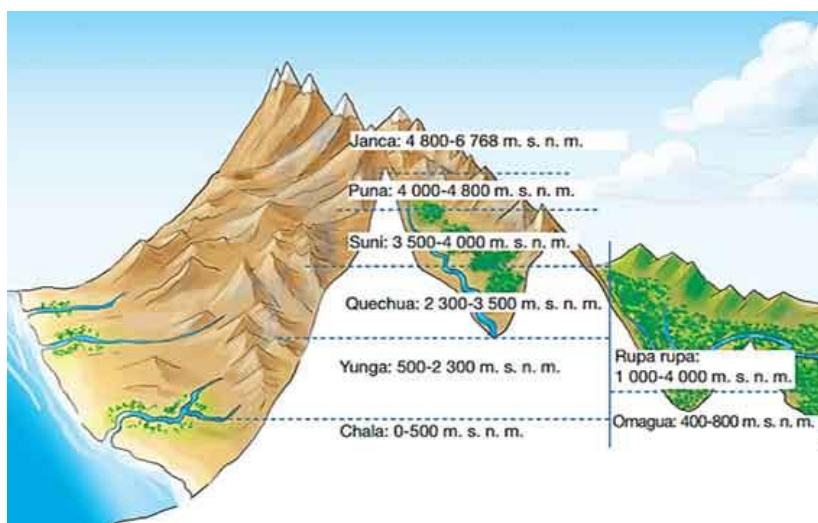


Figura 3. Altitud de las 8 regiones del Perú (Pulgar, 1941)

Ubicación de las lagunas

Considerando el criterio de zonas altoandinas, se comenzó con la revisión bibliográfica en donde se logró encontrar tres trabajos de investigación; es decir, con una altitud superior a 2300 msnm las cuales fueron las siguientes:

Tabla 8

Ubicación de lagunas

Laguna	Ubicación	Altitud	Longitud	Latitud
Conococha	Ancash-Perú	4050	-10.127357	-77.282293
Ñahuinpuquio	Junin-Perú	3400	-12.070528	-75.339048
San Miguel Almaya	Capulhuac-México	2995	19.218336	-99.43741

Nota. Elaboración en base a Campos (2015); Díaz et al. (2013) & Maldonado (2018).



Figura 3. Ubicación laguna Conococha (Google maps, 2020)



Figura 4. Ubicación laguna de Ñahuinpuquio (Google maps, 2020)



Figura 5. Ubicación laguna San Miguel de Almaya (Google maps, 2020)

2.5. Análisis de resultados obtenidos en las investigaciones

Se realizó una comparación en base a las lagunas ya descritas anteriormente, ubicadas dentro del rango de altitud adecuado, las cuales se denominarían lagunas altoandinas.

Tabla 9

Comparación de diferentes estudios

Índice	México			Perú						
	Indicadores	Media anual	Estado	Indicadores	Estiaje	Lluvia	Estado	Estiaje	Lluvia	Estado
OCDE	PT (mg/L)	26.27	Mesotrófico	PT (mg/L)	132	128.9	Hipereutrófico	1.2	1.27	Ultraoligotrófico
	Cl-a medio (ug/L)	33.28	Hipereutrófico	Cl-a (ug/L)	44.8	47.1	Hipereutrófico			
	Cl-a max. (ug/L)	57.33	Eutrófico							
	DS medio (m)	0.52	Hipereutrófico	DS (m)	0.6	0.7	Hipereutrófico			
	DS min. (m)	0.33	Hipereutrófico							
TSI				(N-NO ₃) µg/l	131.5	130.8	Hipereutrófico			
				PT (mg/L)	74.2	73.8	Hipereutrófico	7.2	7.25	Oligotrófico
				Cl-a (ug/L)	67.9	68.4	Eutrófico			
				DS (m)	67.1	66.1	Eutrófico			
APHA			(N-NO ₃) µg/l	230	201.4	Eutrófico	86	92.4	Mesotrófico	

Nota. Elaboración en base a Campos (2015); Díaz et al. (2013) & Maldonado (2018).

De acuerdo a la comparación se puede observar que, en México, se usa la media anual de los resultados de cada indicador y se utilizan como referencia todos los indicadores propuestos por el OCDE (1982). Sin

embargo, en Perú, en base a los trabajos de investigación realizados en las lagunas de Conococha y Ñahuinpuquio, se puede observar que solo se centran en monitorear en dos épocas del año (estiaje y lluvia), esto con el fin de obtener datos comparativos y verificar cuánto disminuye o aumenta el nivel de eutrofización dependiendo de la época del año. No se toman en cuenta los datos de los indicadores de Cl-a máx. (ug/L) y DS min (m). No obstante, en el caso de la laguna Ñahuinpuquio solo tomó de referencia el fósforo total (PT) para evaluar el nivel de eutrofización.

Además el índice OCDE (Vollenweider, 1982) aplica como complemento la metodología planteada por APHA (Standard Methods, 1981) para determinar el estado de eutrofización en base al nitrógeno.

De igual modo en el TSI de Carlson, se consideró como índice de referencia en ambos trabajos de investigación realizados en el Perú. Por otro lado, cabe resaltar que este índice va muy relacionado con los indicadores seleccionados y según los resultados obtenidos nos indica un rango donde no existe una distancia tan alejada; es el caso de la laguna de Conococha que indica la variación entre eutrófico e hipertrófico.

Por otro lado, en la laguna de Ñahuinpuquio se tomó como indicadores solamente los nutrientes: fósforo total y nitrógeno en forma de nitrato (N-NO₃) para determinar el estado eutrófico de la laguna obteniendo resultados variados que van desde ultraoligotrófico a mesotrófico.

Con el fin de obtener resultados óptimos en la determinación del estado de eutrofización se debe realizar el monitoreo todo el año tanto en épocas de lluvia y estiaje. Dicho lo anterior, debido a que se presenta una variación en cuanto a la concentración de los indicadores en épocas de lluvia suele surgir una dilución de los indicadores y en época de estiaje, una acumulación de nutrientes.

3. Conclusión

En conclusión, el índice de OCDE (1982) es el más usado, pero ello no indica que pueda ser el más eficiente, debido a que no existe una clasificación específica de los índices en base al tipo de clima y altitud que se encuentre el cuerpo de agua a monitorear. No obstante, según la indagación y comparación de diversos trabajos de investigación queda como evidencia el uso del índice de OCDE (1982) para determinar el estado de eutrofización en lagunas altoandinas teniendo en cuenta la laguna Conococha que se sitúa a una altitud de 4050 msnm destacada con mayor altitud estudiada. El empleo de varios indicadores conduce a resultados más consistentes.

Referencias

- Álvarez, X. (2015). *Modelo conceptual de la eutrofización y proliferación de cianobacterias*. http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/524/Modelo_conceptual_de_la_eutrofizaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anaya, C. (2014). *Características de las zonas Altoandinas en el Perú*. 511, 35. <http://www.congreso.gob.pe/dgp/Didp/index.html>
- Autoridad Nacional del Agua. (2013). Inventario Nacional del Glaciares y Lagunas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Campos, E. M. (2015). Estudio de los efectos de las actividades ribereñas de la población en el comportamiento de la laguna de Ñahuimpuquio Chupaca. *Riesgo físico en la salud ocupacional en la industria de aserrio del Eucalyptus globulus Labill*, 135. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente Introducción*. (2011). <https://silos.tips/download/programacion-de-las-ciencias-de-la-tierra-y-medioambientales>
- Díaz, A. C., Sotomayor, L. F., Palomino, E. J., & Tuya, E. G. (2013). *Evaluación de la eutrofización de la laguna Conococha-Ancash; agosto de 2012*. 114. https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Diaz_y_Sotomayor_2013.pdf
- Domènech, X. (2000). *Química de la hidrosfera. Origen y destino de los contaminantes*. Editorial Miraguano.
- Epa, U., & of the Regional Administrator, O. (2011). *State of the Great Lakes 2011 Indicators to assess the status and trends of the Great Lakes ecosystem*. <http://binational.net>
- Fontúrbel, F. (2016). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1–2), 135. <https://doi.org/10.21704/rea.v4i1-2.308>
- Gómez, R., Tovilla, C., Barba, E., Castañeda, O., Valle, F. J., Romero, E. I., & Ramos, E. (2014). *Trophic levels of ecological importance and relationship with some physical and chemical parameters in the estuarine lagoon system Chantuto-Panzacola, Chiapas, Mexico*. 31(2), 138–8452.
- Gunkel, G., & Casallas, J. (2002). Limnology of an equatorial high mountain lake - Lago San Pablo, Ecuador: The significance of deep diurnal mixing for lake productivity. *Limnologia*, 32(1), 33–43. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(02\)80015-9](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(02)80015-9)
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C. M., & Delgado, A. R. S. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciencia Agronomica*, 44(3), 419–425. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300002>
- López, M. L., & Madroño, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21. <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Maldonado, D. (2018). Laguna de San Miguel Almaya . *Determinación del estado trófico de la laguna de San Miguel Almaya. Capulhuac, Estado de México. Tesis*, 116.
- Mateu, A. (2017). *Los problemas de eutrofización de las aguas superficiales en relación con la agricultura*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/78548>

- Membrillo, A.-S., Torres, M.-A., Alcocer, J., Ledesma, R. M., Oseguera, L. A., & Ruiz, J. R. (2016). Trophic State Index estimation from remote sensing of lake Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 183–191. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57246489003>
- Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78, 25–33.
- Moreta Pozo, J. C. (2011). La eutrofización de los lagos y sus consecuencias. Ibarra. 2008. [Trabajo de grado previa la obtención del título de tecnólogo en saneamiento ambiental, *Universidad Técnica del Norte. Facultad Ciencias de la Salud. Escuela de Nutrición y Salud comunitaria tecnología en saneamiento ambiental*]. <https://n9.cl/zbkx>
- Muciño, R. E., Aguirre, A., & Figueroa, M. G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27(3), 281–291. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2017v27n3/mucino>
- Nebel, B. Wright, B. (1999). Ciencias Ambientales. *Ecología y Desarrollo Sostenible*, 509–527.
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzalez, M., & Rodríguez, F. (2002). *Contaminacion ambiental: Una vision desde la quimica*. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=CENIDA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=029485>
- Quiroz, R. (2019). *Universidad Católica Sedes Sapientiae*. 1–145. http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/135/Cueva_Mallqui_tesis_mestría_2014.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- RAPAL. (2010). Contaminación y eutrofización del agua: Impactos del modelo de agricultura industrial. In *Virtual Pro2*. <http://www.rapaluruaguay.org/>
- Samboni, N., Carvajal, Y., & Escobar, J. (2007). *Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators*. 27(3), 172–181.
- Silvino, R. F., & Barbosa. (2015). Eutrophication potential of lakes: an integrated analysis of trophic state, morphometry, land occupation, and land use. *Braz. J. Biol*, 75(3), 607–615. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.18913>
- Smith, T. M., & Smith. (n.d.). *Ecología, 6ta Edición – Thomas M. Smith | FreeLibros.Me*. Retrieved June 21, 2020, from <https://www.freelibros.me/ecologia/ecologia-6ta-edicion-thomas-m-smith>
- Toro, L. (2019). *Aplicación de metodologías para la estimación de la eutrofización en embalses tropicales y selección del índice de estado trófico más adecuado para el embalse Peñol-Guatapé, Colombia* , 4(1), 75–84. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>
- Vollenweider. (1982). *Eutrophication of waters*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/iroh.19840690206>
- Western, D. (2001). Human-modified ecosystems and future evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(10), 5458–5465. <https://doi.org/10.1073/pnas.101093598>
- Yojoa, L. De, Maja, E., & Studer, J. (2007). *Evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos indicadores del estado trófico*. https://www.academia.edu/7138243/Tesis_Evelyn_Studer_Acerca_del_Lago_de_Yojoa

Zouiten, H. (2012). *Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=25371>