

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

Análisis cienciométrico sobre microalgas en ríos del Ecuador: una contribución para su integración como bioindicadores de la calidad del agua

Proyecto de Investigación y Desarrollo

Katherine Fernanda Molina Molina

**Daniela Rosero López, PhD
Diana Ontaneda, MSc.
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magister en Soluciones Integrales para la Gestión del Agua

Quito, 15 de julio de 2025

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Análisis cienciométrico sobre microalgas en ríos del Ecuador: una contribución para su integración como bioindicadores de la calidad del agua

Katherine Fernanda Molina Molina

Nombre del Director del Programa:	Valeria Ochoa-Herrera
Título académico:	PhD.
Director del programa de:	Maestría en Soluciones Integrales para la Gestión del Agua
Nombre del Decano del colegio Académico:	Eduardo Alba
Título académico:	PhD.
Decano del Colegio:	Ciencias e Ingeniería
Nombre del Decano del Colegio de Posgrados:	Darío Niebieskikwiat
Título académico:	PhD.

Quito, julio 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombre del estudiante: Katherine Molina Freire

Código de estudiante: 343788

C.I.: 1727008193

Lugar y fecha: Quito, 15 de julio de 2025.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

DEDICATORIA

A Dios, por habitar en mis silencios, por sostenerme cuando solo quedaba fe y por regalarme la paz que no se explica, pero se siente.

A mí, por no soltar mis sueños, por caminar con determinación incluso cuando el camino fue cuesta arriba, por creer en mi capacidad de transformar los desafíos en oportunidades y demostrarme que siempre puedo.

A mi papá, Wilson Molina, por ser mi refugio, por su amor incondicional, por enseñarme con ejemplo silencioso que el trabajo y la fortaleza nacen de la humildad.

A mi mamá, Mónica Molina, que, a pesar de la distancia, siempre llega en forma de susurro que calma, de palabras tibias que disuelven mis sombras. Es mi oración, mi abrigo, mi luz.

Este sueño, que un día tembló en mis manos, hoy florece entre las páginas y lleva el nombre del amor que me sostuvo.

Con amor, Kathy Molina

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad San Francisco de Quito, por ser una institución de excelencia académica, por su compromiso con la formación crítica y por ofrecer las herramientas, el entorno y el rigor necesarios para que el conocimiento florezca. Haber cursado esta maestría en sus aulas ha sido una experiencia enriquecedora que transformó mi forma de pensar, de investigar y de relacionarme con la ciencia.

A mis directoras, Daniela Rosero López y Diana Ontaneda, cuyo acompañamiento fue más allá de lo académico. Desde el primer día me guiaron con paciencia, entrega y calidez. Sus palabras sabias, su fe constante en mi capacidad y su energía positiva fueron faro en los momentos de duda. Gracias por enseñarme a convertir el conocimiento en propósito, por ayudarme a construir esta tesis con sentido, y por alentarme siempre a alcanzar esta meta. Sin su guía generosa, este trabajo no se habría concretado.

Extiendo también un agradecimiento a los docentes y profesionales que formaron parte de este proceso, mi respeto y reconocimiento. En especial a Melania Intriago y Valeria Ochoa, directoras del posgrado, quienes supieron mantener el equilibrio entre el rigor académico y el trato humano. Gracias por su impecable organización, por su entrega constante, y por hacer que el camino de esta maestría se recorriera con orden, claridad y entusiasmo. Cada clase, cada lectura, cada conversación nutrió mi perspectiva y afianzó mi compromiso con la gestión del agua. A las instituciones que me abrieron las puertas con generosidad, les agradezco por compartirme aprendizajes que no están en los libros, sino en el contacto directo con los territorios, con los ecosistemas y con la vida misma.

A mis compañeros y compañeras maestrantes, con quienes compartí aulas, conocimientos, preguntas, desafíos, presentaciones en equipo, salidas de campo bajo el sol y la

lluvia, risas liberadoras y también preocupaciones comunes. Esta travesía fue más llevadera porque fue compartida. Gracias a Anita Andrade, por su compañerismo leal, su amistad desinteresada y su guía constante. A todos, su apoyo en momentos clave hizo la diferencia. ¡Nunca los olvidaré!

Y finalmente, a una persona especial, que estuvo conmigo en silencio y en presencia, me acompañó en los días en los que estudiar y trabajar parecía una tarea interminable. Cuando todo parecía a punto de colapsar, fue su cariño el que sostuvo mi equilibrio. Gracias por estar, por ayudarme sin condiciones, por cuidar de mí sin pedirlo. Su apoyo fue luz discreta, pero constante, y por ello, también le doy las gracias.

RESUMEN

El conocimiento científico sobre microalgas en ríos ecuatorianos como indicadores de calidad del agua se encuentra fragmentado y disperso en múltiples publicaciones, lo que dificulta su aplicación integral en la gestión hídrica del país. Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis cienciométrico exhaustivo de los estudios sobre microalgas en ríos del Ecuador, con el fin de caracterizar el estado actual del conocimiento científico, identificar tendencias de investigación, detectar vacíos temáticos y establecer líneas prioritarias para futuras investigaciones. La metodología incluye una revisión sistemática de literatura científica en bases de datos especializadas, seguida de análisis bibliométrico y cienciométrica utilizando herramientas como VOSviewer, Bibliometrix y CiteSpace. Se analizarán indicadores de productividad científica, colaboración institucional, evolución temporal de las publicaciones, análisis de co-citación y mapeo de redes de conocimiento. Los resultados proporcionarán un panorama integral del desarrollo científico en esta área, identificando las instituciones más productivas, los autores más influyentes, las metodologías más utilizadas y las especies de microalgas más estudiadas en contextos fluviales ecuatorianos. Esta investigación contribuirá significativamente a la consolidación del conocimiento existente y servirá como herramienta estratégica para orientar futuras inversiones en investigación, fortaleciendo así las bases científicas para la gestión integral de recursos hídricos en Ecuador.

Palabras Clave: cienciometría, bibliometría, microalgas, ríos Ecuador, bioindicadores de calidad del agua.

ABSTRACT

Scientific knowledge about microalgae in Ecuadorian rivers as indicators of water quality is fragmented and scattered across multiple publications, which hinders its comprehensive application in the country's water management. This research aims to conduct a comprehensive scientometric analysis of studies on microalgae in Ecuadorian rivers, with the goal of characterizing the current state of scientific knowledge, identifying research trends, detecting thematic gaps, and establishing priority lines for future research. The methodology includes a systematic review of scientific literature in specialized databases, followed by bibliometric and scientometric analysis using tools such as VOSviewer, Bibliometrix, and CiteSpace. Indicators of scientific productivity, institutional collaboration, temporal evolution of publications, co-citation analysis, and knowledge network mapping will be analyzed. The results will provide a comprehensive overview of scientific development in this area, identifying the most productive institutions, the most influential authors, the most widely used methodologies, and the most studied microalgae species in Ecuadorian river contexts. This research will significantly contribute to consolidating existing knowledge and serve as a strategic tool to guide future investments in research, thereby strengthening the scientific basis for integrated water resource management in Ecuador.

Keywords: Sciometrics, bibliometrics, microalgae, Ecuadorian rivers, bioindicators of water quality.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción.....	13
2. Revisión de la literatura.....	17
2.1 Métodos comunes para evaluar la calidad del agua usando microalgas	19
2.2 Clorofila-a como indicador de biomasa y calidad del agua en microalgas	20
2.3 Marco normativo y perspectivas para la integración en Ecuador	21
3. Metodología y diseño de la investigación	24
4. Análisis de datos	27
4.1 Características de los estudios encontrados	27
4.2 Análisis temáticos de los estudios	31
4.3 Correlación entre microalgas y parámetros ambientales.....	34
5. Conclusiones y recomendaciones	39
6. Referencias	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros comúnmente evaluados en el marco del TULSMA.....	22
Tabla 2: Métodos que se utilizan en la European Commission para evaluar la calidad del agua con microalgas.....	23
Tabla 3: Criterios para la selección de estudios de microalgas.....	25
Tabla 4: Investigaciones científicas que relacionan a las microalgas y cianobacterias con la calidad del agua y aspectos de los ecosistemas fluviales.	29
Tabla 5: Distribución temática de las especies de microalgas y su valor como indicadores ..	33
Tabla 6: Correlaciones de las microalgas y cianobacterias con parámetros ambientales del agua.	35
Tabla 7: Tabla modelo como una propuesta para incluir indicadores biológicos en la normativa ecuatoriana	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Hallazgos de estudios de microalgas como bioindicadores de calidad de agua.....	31
Figura 2: Evaluación de los estudios sobre microalgas como bioindicadores, según si consideraron condiciones ambientales, valor indicador y confiabilidad del uso de las especies.	
.....	34
Figura 3: Relación entre parámetros fisicoquímicos del agua y la respuesta bioindicadora de microalgas y cianobacterias.	37
Figura 4: Distribución de microalgas y cianobacterias en grupos y especies en los estudios evaluados como bioindicadores.	37

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos son ecosistemas complejos y dinámicos que integran procesos físicos, químicos y biológicos a lo largo de su red de drenaje. La calidad del agua en estos sistemas está determinada por múltiples factores, incluyendo la cobertura vegetal de la cuenca, el uso del suelo, la presencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación, así como la regulación hidráulica y climática (Encina, 2022). En entornos urbanos y rurales de América Latina, los ríos enfrentan presiones significativas derivadas del desarrollo humano, la industrialización y el crecimiento acelerado de la población (Mata, 2021), que alteran su capacidad de autorregulación, generando procesos de deterioro ecológico que afectan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados. A escala global, se estima que aproximadamente el 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento adecuado, generando impactos severos en la calidad del agua y la biodiversidad de estos ecosistemas (Salazar Huánuco, 2020). Esta problemática se intensifica en países en desarrollo, donde las limitaciones económicas y tecnológicas dificultan la implementación de sistemas eficaces de tratamiento. En el caso de Ecuador, los ríos que atraviesan áreas urbanizadas han experimentado un progresivo deterioro en su calidad. Entre las principales causas se encuentran la descarga directa de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento, el uso inadecuado de agroquímicos en las cuencas hidrográficas, la deforestación de zonas ribereñas —que actúan como filtros naturales— y una gestión deficiente de los residuos sólidos (Wingfield, 2021). Esta situación compromete no solo la salud ecológica de los cuerpos de agua, sino también la seguridad hídrica de las poblaciones humanas que dependen de estos recursos.

Frente a este contexto, el uso de macroorganismos fotosintéticos como bioindicadores de calidad de agua se ha posicionado como una herramienta fundamental para el monitoreo y la evaluación del estado ecológico de los ecosistemas acuáticos. Los bioindicadores de calidad

de agua como los macroorganismos fotosintéticos cuya presencia, abundancia o estado fisiológico reflejan las condiciones ambientales de un ecosistema determinado (Rodrigues Capítulo & Gómez, 2020). A diferencia de los métodos fisicoquímicos tradicionales, estos organismos integran los efectos acumulativos de múltiples presiones ambientales a lo largo del tiempo, proporcionando una visión más holística del estado ecológico (Ayala Matute, 2021). Los bioindicadores presentan diferentes sensibilidades a perturbaciones por lo que la estructura de las comunidades resulta en un reflejo de las condiciones ambientales a largo plazo (Rodrigues Capítulo & Gómez, 2020).

Entre los bioindicadores de calidad de agua más promisorios se encuentran las microalgas y las cianobacterias. Las microalgas, organismos fotosintéticos unicelulares o coloniales, presentan una alta sensibilidad a variaciones en parámetros como nutrientes, pH, temperatura y oxígeno disuelto, lo que las convierte en indicadores eficientes de cambios en la calidad del agua (Baylón Coritoma, 2018). Por su parte, las cianobacterias —procariontas fotosintéticos— destacan por su capacidad de proliferar en ambientes eutrofizados, su habilidad para fijar nitrógeno atmosférico y su resistencia a condiciones extremas, siendo especialmente relevantes en contextos de deterioro ambiental (Villalobos, 2020). Algunas especies de cianobacterias, además, producen toxinas que implican riesgos significativos para la salud pública.

Las microalgas y cianobacterias son clave en las redes tróficas acuáticas y presentan características biológicas y ecológicas que las hacen útiles como indicadores de calidad del agua ya que permiten detectar condiciones de eutrofización, contaminación orgánica y alteraciones en el régimen hidrológico (Rosero-Lopez et al., 2022; Baylón Coritoma, 2018).

Pese a su importancia, el conocimiento sobre el uso de microalgas en el monitoreo ecológico de ríos en Ecuador sigue siendo limitado.

En este marco, la presente tesis propone un análisis cienciométrico sobre el estudio de

microalgas en ríos ecuatorianos, con el objetivo de identificar tendencias, vacíos y oportunidades de investigación que permitan su incorporación efectiva como bioindicadores de la calidad del agua en políticas de gestión integral de los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos asociados. El análisis cienciométrico permite explorar de manera cuantitativa la producción científica en un campo determinado, identificando patrones, vacíos y redes de colaboración. Este tipo de análisis cobra relevancia en el contexto de la ciencia abierta, al facilitar la visualización del conocimiento existente y la toma de decisiones informadas para la planificación de políticas y líneas de investigación prioritarias. En el caso de las microalgas en ríos del Ecuador, un enfoque cienciométrico contribuye a contextualizar el estado del arte y guiar su integración como herramientas de monitoreo ecológico.

El objetivo general de esta investigación es realizar un análisis cienciométrico de la producción científica relacionada con microalgas en ríos del Ecuador, con el fin de identificar patrones de investigación, vacíos temáticos y potenciales aplicaciones en la gestión de la calidad del agua mediante el uso de bioindicadores. Para alcanzar el objetivo general se plantearon tres objetivos específicos: **i)** compilar y sistematizar la literatura científica sobre microalgas en sistemas fluviales del Ecuador publicada en bases de datos nacionales e internacionales, **ii)** identificar los principales enfoques metodológicos y taxonómicos utilizados en los estudios, así como sus vínculos con la evaluación de la calidad del agua, y **iii)** proponer lineamientos para la integración de microalgas como bioindicadores en programas de monitoreo ecológico en el contexto de la gestión integral del recurso hídrico.

Esta investigación se justifica en el hecho de que el monitoreo efectivo de la calidad del agua es un pilar esencial para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la seguridad hídrica de las poblaciones humanas. En este contexto, las microalgas representan una alternativa valiosa como bioindicadores debido a su sensibilidad ecológica, rápida respuesta a los cambios ambientales y amplia distribución (Allan, Castillo y Kapps, 2021). Sin embargo,

en Ecuador, el conocimiento sobre su uso en ríos permanece fragmentado y poco sistematizado.

Este trabajo se justifica por su contribución al fortalecimiento del conocimiento científico sobre el rol ecológico y bioindicador de las microalgas en los ecosistemas fluviales del país. A través de un enfoque cienciométrico, se busca generar una visión integral del estado del arte que permita orientar futuras investigaciones y apoyar el diseño de políticas públicas basadas en evidencia. Además, la identificación de vacíos de conocimiento y oportunidades de aplicación puede facilitar la incorporación de indicadores biológicos en estrategias de monitoreo ambiental, fortaleciendo así la transición hacia modelos de gestión del agua más integrales, participativos y sostenibles.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La investigación sobre el uso de microalgas y fitoplancton como bioindicadores en América Latina ha cobrado creciente relevancia en las últimas décadas, particularmente como alternativa complementaria a los métodos fisicoquímicos tradicionales (Allan, Castillo y Kapps, 2021). Los esfuerzos investigativos en Centroamérica también ofrecen valiosas referencias. En Guatemala, Jurado (2024) llevó a cabo una evaluación anual del fitoplancton en el lago de Amatitlán, identificando patrones estacionales marcados: las cianobacterias predominaban en épocas cálidas y secas, mientras que las diatomeas eran más abundantes en temporadas frías y lluviosas. Estos resultados refuerzan el valor de las microalgas como indicadores sensibles a cambios hidrometeorológicos. Por otro lado, en Costa Rica, Zamora Díaz (2021) examinó el impacto de efluentes de lagunas de estabilización sobre comunidades de microalgas bentónicas. Su estudio propuso protocolos adaptados a ecosistemas tropicales, los cuales han sido adoptados en iniciativas de monitoreo hídrico en otros países centroamericanos, subrayando la necesidad de enfoques contextualizados y estandarizados.

Como país vecino con alta diversidad hidrológica, Perú ha generado investigaciones relevantes para el entendimiento regional. Reynán (2023) estudió la ficoflora del río Colorado, en Tucumán, estableciendo vínculos precisos entre la composición algal y parámetros como salinidad y nutrientes derivados de la actividad agrícola. Este trabajo identificó especies sensibles a condiciones de salinidad elevada y contaminación difusa, posicionando a las microalgas como herramientas útiles para la evaluación de impactos no puntuales en zonas rurales. Un estudio emblemático fue desarrollado por Vélez-Azañero, Lozano y Cáceres-Torres (2016) en la cuenca baja del río Lurín (Perú), donde se evidenció una relación inversa entre la diversidad fitoplanctónica y los niveles de contaminación. Tramos menos impactados presentaban índices de diversidad superiores a 2.5 (Shannon-Winner), mientras que los más

contaminados no superaban valores de 1.0.

En Ecuador, Viteri-Garcés et al., 2017 en su estudio denominado “Determinación de bioindicadores y protocolos de la calidad de agua en el embalse de la Central Hidroeléctrica Baba” demostró la viabilidad técnica y económica de utilizar microorganismos acuáticos para el monitoreo ambiental, y estos métodos han sido replicados en otras cuencas del país y de la región andino-amazónica (Quevedo et al., 2021).

Los ecosistemas acuáticos altoandinos se caracterizan por su fragilidad ecológica, baja productividad y sensibilidad a los cambios en el entorno. Estas condiciones han motivado estudios detallados en países andinos. En Perú, Cervantes (2021) identificó 47 especies de fitoplancton en lagunas altoandinas del departamento de Pasco, donde las diatomeas (Bacillariophyceae) fueron el grupo dominante, seguidas por clorofitas, lo que coincide con patrones observados en otros sistemas de montaña. En Ecuador, Sardi Barzallo (2018) examinó comunidades de diatomeas epilíticas en los páramos del Macizo del Cajas, encontrando relaciones significativas entre la composición específica y variables fisicoquímicas como conductividad, nutrientes disueltos y pH. Su investigación fortaleció la base para el uso de bioindicadores biológicos en ecosistemas de altura, donde los métodos fisicoquímicos pueden tener limitaciones operativas.

En el contexto nacional, estudios recientes han evidenciado una creciente atención al rol ecológico de las microalgas en sistemas acuáticos. Arévalo Moreno (2023) realizó un estudio exhaustivo sobre la diversidad de microalgas y cianobacterias en cuerpos de agua continentales del Ecuador, identificando 89 especies en 45 géneros. Su análisis relacionó la composición de comunidades algales con el estado trófico de los ecosistemas, aportando indicadores potenciales para distintos niveles de alteración. Complementariamente, Rivera Guamán (2023) evaluó la calidad del agua en el río Nangaritza mediante análisis fitoplanctónico, destacando a *Euglena spp.* y *Oscillatoria spp.* como especies indicadoras de contaminación orgánica moderada a

severa. Estudios similares han sido realizados como trabajos de titulación en instituciones como la Universidad de Cuenca, Universidad Central del Ecuador y UTPL, los cuales, aunque no indexados, han contribuido al conocimiento técnico local sobre el uso de microalgas en evaluación ecológica.

2.1 Métodos comunes para evaluar la calidad del agua usando microalgas

Existen varios métodos para evaluar la calidad del agua desde un enfoque ecológico e integral. Uno de los más comunes es el análisis taxonómico de microalgas, que consiste en identificar las especies presentes en una muestra y determinar su riqueza, diversidad y composición. Esta información permite identificar relaciones entre la estructura de la comunidad y las condiciones ambientales del ecosistema acuático (Rodrigues-Capítulo & Gómez, 2020).

También se aplican índices ecológicos, como el Índice de Shannon-Wiener, que mide la diversidad, o el Índice de Sensibilidad Específica a la Contaminación, que estima la tolerancia de cada especie frente a distintos grados de alteración en el río. Otro método complementario es el cálculo del biovolumen celular, que calcula el tamaño total de las células presentes y, por tanto, la biomasa real de microalgas en el sistema (Y. Ferrer-Sánchez et al., 2024). Desde el enfoque fisicoquímico, se utilizan parámetros como el oxígeno disuelto, los nutrientes (nitrógeno y fósforo), el pH, la conductividad, la turbidez y la demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO y DQO), los cuales manifiestan la capacidad del cuerpo de agua para sustentar vida acuática o advertir sobre procesos de eutrofización o contaminación orgánica. La combinación de estos métodos permite una evaluación más completa y sensible del estado ecológico del agua, superando las limitaciones de los enfoques que solo miden parámetros aislados y permitiendo tomar decisiones más acertadas para la gestión del recurso hídrico (Segura-García et al., 2012).

En regiones como la Unión Europea, estos métodos se componen mediante el uso de índices bióticos específicos, como el Índice Biótico Diatomáceo (IBD) o el Trophic Diatom Index (TDI), que combinan información taxonómica con valores ecológicos asignados a cada especie para interpretar el estado del ecosistema (European Commission, 2000). Estos enfoques permiten avanzar hacia un monitoreo con enfoque ecosistémico, donde las microalgas no solo reflejan la condición actual del agua, sino también su historia reciente de modificación ambiental.

2.2 Clorofila-a como indicador de biomasa y calidad del agua en microalgas

La clorofila-a es un pigmento verde que actúa como el motor solar de las microalgas y organismos fotosintéticos acuáticos. Su principal función biológica es secuestrar la energía del sol necesaria para el proceso de fotosíntesis, mediante el cual estos organismos transforman el dióxido de carbono y agua en oxígeno y materia orgánica. No obstante, más allá de su rol fisiológico, la clorofila-a tiene un gran valor en el monitoreo ambiental, ya que su concentración en el agua permite valorar la biomasa total de microalgas presentes en un río, especialmente en el fitoplancton (APHA, 2017; Reynolds, 2019).

Desde el punto de vista ecológico, la clorofila-a es un indicador indirecto de la productividad primaria del ecosistema y del estado trófico del cuerpo de agua. Cuando existen niveles bajos suelen relacionar a ecosistemas oligotróficos o poco alterados, mientras que concentraciones altas revelan posibles condiciones eutróficas, con abundancia de nutrientes y proliferación de organismos fotosintéticos. Este fenómeno puede estar vinculado a descargas de aguas residuales de todo tipo, escorrentías agrícolas o contaminación difusa, que aumentan la disponibilidad de fósforo y nitrógeno —principales nutrientes limitantes en entornos fluviales y lacustres (Baylón Coritoma, 2018; Allan, Castillo & Capps, 2021).

Desde el punto de vista metodológico, la clorofila-a se mide mediante procedimientos estandarizados, que involucran la filtración de la muestra de agua, la extracción del pigmento con solventes (como acetona o metanol) y posteriormente su medición mediante espectrofotometría o fluorometría (APHA, 2017). Este análisis, aunque requiere de ciertos equipos, es accesible y ampliamente replicable en contextos de laboratorio universitario o institucional, lo que lo convierte en un parámetro útil para el monitoreo ecológico de bajo costo y alta eficacia, especialmente en países en desarrollo como Ecuador.

2.3 Marco normativo y perspectivas para la integración en Ecuador

En Ecuador, la normativa ambiental vigente —principalmente el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) y la Norma Técnica de Calidad Ambiental del Recurso Hídrico— establece lineamientos para evaluar la calidad del agua basándose, en su mayoría, en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Estos criterios permiten clasificar los cuerpos de agua en categorías (A, B, C y D) de acuerdo con el uso, como abastecimiento para consumo humano, actividades agrícolas, fines recreativos, entre otros. Sin embargo, hasta el momento no se contempla de forma explícita la utilización de bioindicadores biológicos, como las microalgas o las diatomeas, dentro de los procesos de evaluación de la calidad del agua (MAATE, 2021). En la (Tabla 1) se detallan los tipos de parámetros que el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente considera prioritarios para monitorear la calidad del agua.

Tabla 1: Parámetros comúnmente evaluados en el marco del TULSMA.

Tipo de parámetro	Ejemplos de parámetros
Físicos	Temperatura, turbidez, color, sólidos suspendidos totales (SST)
Químicos	pH, OD (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), fósforo, nitrógeno
Microbiológicos	Coliformes totales y fecales, Escherichia coli
Metales pesados	Arsénico, plomo, mercurio, cadmio
Otros	Hidrocarburos totales del petróleo, detergentes, pesticidas

Las directrices estratégicas recientes emitidas por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2021), en articulación con el Plan Nacional de Recursos Hídricos 2021–2030, plantean el fortalecimiento de un monitoreo de los cuerpos de agua que sea integral, participativo y con enfoque ecosistémico. Esta propuesta representa una oportunidad, tanto normativa como técnica, para incorporar bioindicadores biológicos —especialmente algas— en la evaluación del estado ecológico de los ecosistemas acuáticos (MAATE, 2021).

La integración de indicadores algales no solo enriquecería los análisis basados en parámetros fisicoquímicos, sino que también facilitaría la formación de las políticas nacionales con marcos de referencia internacionales, como la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea. Esta normativa europea establece la necesidad de evaluar el estado ecológico de las masas de agua mediante el uso de indicadores biológicos como macroinvertebrados, peces, diatomeas y macrófitas, complementados con elementos químicos y aspectos hidromorfológicos (European Commission, 2000).

Tabla 2: Métodos que se utilizan en la Comisión Europea para evaluar la calidad del agua con microalgas.

Método utilizado en la European Commission	Qué evalua?	Para qué sirve?	Tipo de cuerpo de agua donde se aplica
Índice Biótico Diatomáceo (IBD)	Evaluía la calidad del agua con base en la presencia y sensibilidad de diatomeas a la contaminación	Útil para establecer el estado ecológico general.	Ríos y arroyos de montaña y llanura (agua dulce)
Índice de Sensibilidad Específica (IPS)	Mide la sensibilidad específica de cada especie de diatomea a la contaminación orgánica y nutrientes	Permite clasificar tramos impactados	Ríos con presión antrópica moderada o fuerte
Índice Trófico de Diatomeas (TDI)	Asocia cada especie a un nivel trófico	Útil para determinar eutrofización y estados de alteración por exceso de nutrientes	Ríos, lagos y embalses eutrofizados
Matriz de composición + abundancia + métricas multivariadas	Analiza la estructura comunitaria, incluyendo diversidad, dominancia y respuesta ecológica integrada	Se usa para clasificaciones más complejas	Sistemas fluviales, lagos, humedales complejos
Biovolumen y biomasa por clorofila-a	Mide la biomasa total algal como indicador indirecto de productividad y eutrofización	Complementa el análisis taxonómico	Lagos, embalses, zonas de aguas lentes o estratificadas

Adoptar un enfoque similar permitiría robustecer la gestión del agua bajo una perspectiva ecosistémica, fomentando decisiones más integradas, sensibles y respaldadas por evidencia científica. En este contexto, resulta prioritario que Ecuador avance hacia una actualización de su normativa ambiental, incorporando protocolos validados a nivel local para el uso de bioindicadores como herramienta técnica de seguimiento y control ambiental. Esta transformación normativa no solo optimizaría la calidad de la información generada, sino que también impulsaría políticas públicas más consistentes con los objetivos nacionales de conservación y sostenibilidad ecológica.

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el presente estudio se aplicó una metodología de análisis cienciométrico, mismo que se utiliza como una herramienta clave para identificar y sistematizar el conocimiento científico formado en torno al estudio de microalgas en ríos del Ecuador. Esta técnica permite visualizar patrones de producción académica, autores más relevantes, temas emergentes y vacíos de información, lo cual resulta fundamental para comprender cómo se ha abordado el uso de microalgas como bioindicadores de calidad del agua. Las microalgas, especialmente las diatomeas epilíticas, son organismos sensibles a los cambios fisicoquímicos del entorno acuático, por lo que su presencia o ausencia refleja condiciones como el nivel de nutrientes, oxigenación, pH o carga orgánica (Rodríguez Capítulo & Gómez 2020; Lobo et al., 2016). Al combinar la revisión bibliográfica con el análisis cuantitativo de la producción científica, se fortalece el marco metodológico y se justifica la necesidad de incorporar estos bioindicadores en programas de monitoreo ecológico en los sistemas fluviales del país, considerando su efectividad, bajo costo y sensibilidad ante impactos ambientales (Segura-García et al., 2012).

Con el objetivo de identificar, sistematizar y analizar la producción científica relacionada con el uso de microalgas como bioindicadores en ríos del Ecuador. La búsqueda bibliográfica se realizó a través de la plataforma Semantic Scholar, seleccionando los 50 documentos más relevantes en respuesta a la consulta: *"Análisis cienciométrico sobre los estudios de microalgas en ríos del Ecuador: una contribución para la integración como bioindicadores de la calidad del agua"*.

El enfoque descriptivo y exploratorio se fundamentó en métodos cuantitativos para caracterizar la producción científica relacionada con microalgas en ríos del Ecuador, con énfasis en su potencial aplicación como bioindicadores en programas de gestión de la calidad del agua.

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica en bases de datos bibliográficas reconocidas (Scopus, Web of Science, Scielo, Google Scholar), utilizando palabras clave como *microalgas*, *cianobacterias*, *bioindicadores*, *ríos*, *calidad del agua*, y *Ecuador*. Se aplicaron criterios de inclusión/exclusión para garantizar la relevancia temática y geográfica de los estudios. El proceso de selección se estructuró en dos etapas: (i) filtrado temático con base en criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, y (ii) extracción de datos estructurados a partir de los estudios seleccionados. Para el análisis se consideraron exclusivamente estudios realizados en sistemas fluviales de agua dulce, con énfasis en el contexto geográfico ecuatoriano y relevancia ecológica.

Los documentos fueron evaluados con base en siete criterios principales (Tabla 3). La inclusión de un estudio dependía de la evaluación integral de todos los criterios, con juicio experto orientado a la pertinencia del contenido para el objetivo de investigación.

Tabla 3: Criterios para la selección de estudios de microalgas.

Criterio	Descripción
Enfoque geográfico	El estudio debía centrarse en microalgas presente en ríos del Ecuador con identificación taxonómica adecuada.
Análisis de calidad de agua	Se incluyeron solo estudios que relacionaban parámetros de calidad del agua con análisis de microalgas.
Ambiente natural	Se excluyeron estudios realizados en ambientes artificiales o marinos; se priorizaron ríos naturales y de agua dulce.
Tipo de documento	Se consideraron artículos científicos, informes técnicos o ponencias de congreso que abordaron explícitamente microalgas como bioindicadores.
Enfoque en monitoreo ambiental	Se excluyeron estudios puramente biotecnológicos o de cultivo; se priorizó el enfoque ecológico y de evaluación ambiental.
Evaluación integrada	El estudio debía contener componentes explícitos de evaluación ecológica (biológica, fisicoquímica o microbiológica)
Especificidad del ecosistema	Debía tratarse de cuerpos de aguas continentales ecuatorianos (ríos, quebradas); se excluyeron estuarios, lagos artificiales y embalses.

Nota. Elaboración propia con base en criterios de evaluación

Para interpretar los resultados se contrastó los hallazgos con la literatura teórica sobre el uso de microalgas como bioindicadores, con el fin de evaluar el grado de alineación entre la investigación científica y las necesidades de monitoreo ecológico en el país. A partir de este análisis se propondrán recomendaciones para integrar este conocimiento en la gestión integral del recurso hídrico en Ecuador.

4. ANÁLISIS DE DATOS

Este capítulo presenta el análisis cienciométrico de estudios sobre microalgas utilizadas como bioindicadores en ríos del Ecuador. A partir de una búsqueda sistemática en la base de datos Semantic Scholar y un proceso de filtrado riguroso, se seleccionaron seis estudios relevantes desarrollados en Ecuador y regiones cercanas. Se aplicó una matriz de extracción para sistematizar la información referente a ubicación geográfica, diseño metodológico, organismos utilizados, parámetros físico-químicos analizados, hallazgos ecológicos y su aplicabilidad para sistemas de monitoreo de calidad del agua.

4.1 Características de los estudios encontrados

En total, se analizaron once estudios científicos sobre microalgas como bioindicadores de la calidad del agua en sistemas fluviales. Siete de ellos se llevaron a cabo en la región andina del Ecuador, dos en la región amazónica del país, uno en Panamá y uno en Colombia. En cuanto a los tipos de organismos estudiados, seis investigaciones emplearon diatomeas epilíticas a nivel de especie, dos utilizaron fitoplancton a nivel de género, y otras dos trabajaron con perifiton o algas perifíticas tanto a nivel de género como de especie; además, una investigación adicional se enfocó en comunidades planctónicas (Tabla 3). Algunos estudios combinaron el análisis de fitoplancton y perifitón. En términos de variables ambientales, la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto (OD), fueron considerados en al menos seis estudios. Le siguen en frecuencia parámetros como los fosfatos y los nitratos, presentes en cinco investigaciones, debido a su fuerte relación con procesos de eutrofización. Otros indicadores de contaminación orgánica, como la DBO, la DQO y los coliformes fecales, también fueron empleados en al menos cuatro estudios, especialmente en contextos urbanos o agrícolas. Asimismo, la turbidez y los sólidos totales disueltos (TDS) fueron parámetros incluidos en al menos tres investigaciones, destacándose por su utilidad en la detección de aporte de sedimentos y materia

orgánica. En menor frecuencia, aunque no por ello menos relevantes, se registraron variables como la conductividad eléctrica, la clorofila-a, y el biovolumen celular, que, si bien no se repiten ampliamente, aportan información detallada sobre la productividad primaria y la biomasa algal.

De los once estudios analizados, nueve de ellos evaluaron explícitamente la estructura de la comunidad de microalgas, ya sea mediante el conteo de individuos, estimación de riqueza específica, diversidad mediante los índices de Shannon-Wiener, equitatividad o biovolumen celular. Estos trabajos aplicaron análisis taxonómicos y métricas comunitarias para interpretar las condiciones ambientales de los ríos analizados. En cuanto al uso de instrumentación de campo y laboratorio, al menos siete investigaciones reportaron el uso de equipos multiparamétricos, pH-metros, medidores de oxígeno disuelto, o técnicas específicas de laboratorio como el uso de microscopios, espectrofotómetros, centrífugas, tratamientos con ácidos (H_2SO_4 , HCl , dicromato), e incluso métodos estadísticos avanzados como análisis de correspondencia canónica (CCA).

Tabla 4: Investigaciones científicas que relacionan a las microalgas y cianobacterias con la calidad del agua y aspectos de los ecosistemas fluviales.

No.	Estudio	Región geográfica	Tipo de microalgas	Parámetros medidos	Hallazgos principales
1	(Uquillas-Romo et al., 2025)	Región andina, Ecuador	Diatomeas epilíticas	Fosfatos, clorofila-a, sólidos disueltos	Diatomeas tolerantes a contaminación, diversidad baja en zonas críticas
2	(Pérez Alarcón et al., 2020)	Región amazónica	Fitoplancton, perifiton	Fosfatos, TDS, pH, temperatura	Indicadores de contaminación orgánica, relación inversa con visitantes
3	(Rosero-López et al., 2022)	Ecuador, Papallacta	Cianobacterias	Nutrientes, clorofila-a, régimen hidrológico	Indicadores de acumulación de materia orgánica en descomposición.
4	(Castillejo et al., 2018)	Región andina	Diatomeas epilíticas	OD, pH, DBO, DQO, amonio	Aumento de diversidad aguas abajo; se requiere índice trófico local
5	(Escobar et al., 2013)	Puéllaro, Ecuador	Comunidades planctónicas	Físico-químicos no especificados	Presencia de plancton indica contaminación por perturbación antrópica
6	(Clavijo, 2025)	Región andina, Ecuador (río Yanayacu, provincia de Cotopaxi)	Diatomeas epilíticas	Temperatura, nitratos, fosfatos, OD, DBOs, DQO, TDS, turbidez, coliformes fecales, pH, conductividad eléctrica	Incremento progresivo de contaminación aguas abajo; ITCA evidenció contaminación moderada (β -mesotrófico) en el punto alto y fuerte (α -mesotrófico) en puntos medios y bajos; especies indicadoras de diferentes grados de eutrofización.
7	(Clavijo et al., 2022)	Región andina, provincia de Cotopaxi, Ecuador (río Illuchi)	Diatomeas epilíticas	Temperatura, pH, OD, DBOs, nitratos, fosfatos, coliformes totales, sólidos disueltos, turbidez, clorofila	Mayor contaminación aguas abajo. El ICA varió de "regular" (puntos 1 y 2) a "malo" (punto 3). El ITCA mostró contaminación despreciable (oligotrófico) en punto 1, moderada (β -mesotrófico) en punto 2 y fuerte (α -mesotrófico) en punto 3. Diatomeas como <i>Cocconeis lineata</i> , <i>Fragilaria ulna</i> y <i>Rhoicosphenia abbreviata</i> se relacionaron con mayor eutrofización
8	(Heredia et al., 2024)	Región Amazónica, río Jimbitono, parroquia Proaño, provincia de Morona Santiago	Diatomeas epilíticas (fitobentos adherido a rocas)	Físico-químicos: temperatura, pH, OD, turbidez, sólidos totales, DBO5, nitratos, fosfatos, coliformes fecales	El ICA (Índice de Calidad del Agua) indicó calidad regular y mala. El ITCA (Índice Trófico de Calidad del Agua) evidenció una transición de estado: oligotrófico y mesotrófico.
9	(Yaguana et al., 2022)	Región andina, río Malacatos, ca, provincia de Loja. Parte de la cuenca binacional Catamayo-Chira	Diatomeas epilíticas (fitoperifiton)	Riqueza, diversidad (Shannon), equitatividad, biovolumen celular.	El tramo con vegetación nativa presentó alta equitatividad y biovolumen, pero menor riqueza. El tramo urbano tuvo baja diversidad y equitatividad, dominado por <i>Navicula</i> y <i>Nitzschia</i> .
10	(Morán-Mora et al., 2025)	Panamá	Fitoplancton	Nutrientes, coliformes, TDS	Géneros indicadores de calidad; baja diversidad en zonas impactadas
11	(Hernández et al., 2018)	Colombia	Algas perifíticas	Nutrientes, sólidos, pH, turbidez	Deterioro progresivo; especies perifíticas como buenos indicadores

Nota. Elaboración propia en base a investigaciones científicas extraídas de SemanticScholar.

Entre los hallazgos más relevantes, cuatro estudios evidenciaron que las microalgas — ya sean diatomeas, fitoplancton o perifiton — actúan como indicadoras confiables de

contaminación, especialmente de tipo orgánico (Pérez Alarcón et al., 2020; Rosero-López et al., 2022; Escobar et al., 2013; Hernández et al., 2018). Tres investigaciones reportaron baja diversidad o dominancia de taxones tolerantes en sitios impactados por actividades antrópicas (Uquillas-Romo et al., 2025; Morán Mora et al., 2025; Yaguana et al., 2022). A su vez, cuatro estudios documentaron que la estructura comunitaria reflejaba gradientes de calidad del agua, desde condiciones oligotróficas en zonas altas hasta estados mesotróficos en tramos más impactados (Clavijo et al., 2022; Clavijo, 2025; Heredia et al., 2024; Yaguana et al., 2022). Por otro lado, dos estudios resaltaron la necesidad de calibrar índices de calidad de agua localmente, debido a las limitaciones de los modelos tróficos estandarizados en contextos ecuatorianos (Castillejo et al., 2018; Hernández et al. 2018), y dos más como el vertido de aguas residuales o la actividad agrícola como el principal factor que modifica la composición y abundancia del biofilm y el fitoplancton (Clavijo, 2025; Heredia et al., 2024). Asimismo, tres estudios registraron géneros o especies específicas de microalgas como *Navicula*, *Fragilaria*, *Planktothrix*, *Zygnema*, entre otras con valor diagnóstico frente a distintos niveles de alteración (Clavijo et al., 2022; Morán Mora et al., 2025; Hernández et al., 2018), y dos estudios reportaron un deterioro progresivo de la calidad del agua a lo largo del gradiente longitudinal de los ríos analizados (Clavijo et al., 2022; Clavijo, 2025). Además, un estudio obtuvo una relación inversa entre el número de visitantes y la concentración de fosfatos, evidenciando la influencia del turismo estacional sobre los parámetros tróficos (Pérez Alarcón et al., 2020), otro describió condiciones de calidad "regular" mediante el ICA (Heredia et al., 2024), y uno más destacó la efectividad del perifiton como bioindicador sensible frente a gradientes ambientales (Hernández et al., 2018). Cabe mencionar que no se identificaron estudios fuera de Ecuador, Panamá o Colombia, ni investigaciones centradas exclusivamente en cianobacterias o algas verdes como grupo bioindicador principal.

A continuación, en la (Figura 1) se visualiza los principales hallazgos cuantificados en los estudios sobre microalgas bioindicadoras reforzando que los resultados identificados muestren con claridad cuántos estudios coinciden en cada enfoque evaluado.

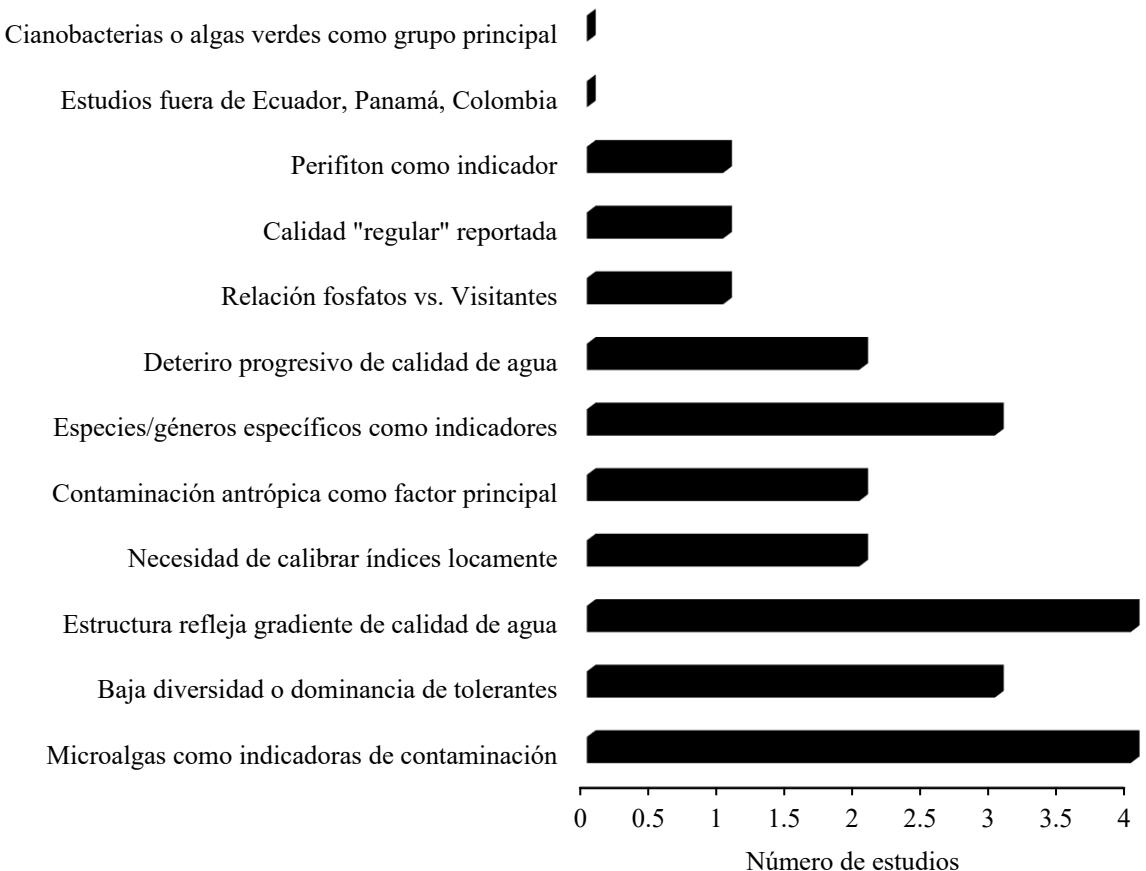


Figura 1: Hallazgos de estudios de microalgas como bioindicadores de calidad de agua

4.2 Análisis temáticos de los estudios

Entre los estudios revisados, los autores (Heredia et al., 2024; Morán-Mora., 2025) analizaron microalgas en contextos oligotróficos o de bajo impacto humano, destacando su sensibilidad y valor diagnóstico en condiciones de calidad alta. En contraste, (Clavijo et al., 2022; Clavijo, 2025; Hernández et al., 2018) identificaron ambientes eutróficos o fuertemente

impactados, caracterizados por el dominio de especies tolerantes, elevada carga orgánica o perturbación antrópica evidente.

Asimismo, (Clavijo, 2025; Hernández et al., 2018; Heredia et al., 2024; Rosero-López et al., 2022) reportaron impactos atribuibles a descargas de aguas residuales, actividades agrícolas o procesos de contaminación orgánica, factores que modificaron significativamente la composición algal. Por su parte, (Yaguana et al., 2022; Escobar et al., 2013) describieron gradientes ambientales o perturbaciones localizadas, observando variaciones estructurales en las comunidades algales vinculadas a cambios en la cobertura vegetal, urbanización u otros elementos del entorno fluvial. Respecto al valor indicador, (Morán Mora et al., 2025; Heredia et al., 2024) identificaron especies representativas de alta calidad del agua, mientras que (Clavijo et al., 2024; Hernández et al., 2018; Rosero-López et al., 2022) destacaron géneros de microalgas asociados a condiciones eutróficas o contaminadas, como *Planktothrix sp.*, *Nitzschia* y *Oscillatoria*.

Otros enfoques incluyeron el uso de indicadores generales de calidad biológica, como se observa en (Pérez Alarcón et al., 2020), y la observación de especies con capacidad adaptativa o sensibilidad particular a condiciones ambientales, mencionadas por (Hernández et al., 2018). En este mismo sentido, (Uquillas-Romo et al., 2025) reportó la pérdida de diversidad como un signo de deterioro ecológico en sitios afectados, específicamente en comunidades de diatomeas epilíticas.

En cuanto a la confiabilidad de las especies bioindicadoras, esta fue abordada de forma explícita por (Clavijo et al., 2022; Hernández et al., 2018; Morán-Mora et al., 2025), quienes respaldaron su uso por su sensibilidad ecológica y replicabilidad. No obstante, (Castillejo et al., 2018; Heredia et al., 2024) y nuevamente (Hernández et al., 2018) subrayaron la necesidad

de calibrar los índices de calidad del agua localmente, debido a que las herramientas tróficas estandarizadas pueden no reflejar adecuadamente las condiciones de los sistemas tropicales de montaña. Finalmente, (Heredia et al., 2024) advirtió que el uso de índices internacionales no calibrados podría sobreestimar la calidad del agua en sistemas altamente impactados, generando lecturas poco realistas en contextos donde predominan presiones antrópicas fuertes.

Tabla 5: Distribución temática de las especies de microalgas y su valor como indicadores

Estudio	Especie / Grupo	Condiciones Ambientales	Valor Indicador	Confiabilidad
Uquillas-Romo et al., 2025			Reflejan la calidad biológica del agua;	
Castillejo et al., 2018		Oligotrófico a mesotrófico; zonas altas a bajas; afectadas por aguas residuales y agricultura	especies dominantes tolerantes a la contaminación; pérdida de diversidad indica deterioro	Pueden sobreestimar la calidad del agua en sistemas muy impactados; los índices internacionales no siempre son aplicables
Clavijo, 2025	Diatomeas epilíticas (varias especies)			
Clavijo et al., 2022				
Heredia et al., 2024				
Yaguana et al., 2022				
Pérez Alarcón et al., 2020	<i>Navicula</i> , <i>Euglena</i> , <i>Gomphonema</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Chlamydomonas</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Cocconeis lineata</i> , <i>Fragilaria ulna</i> , <i>Rhoicosphenia abbreviata</i> , <i>Nitzschia</i> (fitoplancton/perifiton)			
Morán-Mora et al., 2025		Altos niveles de fosfatos; cuerpos de agua alterados	Indicadores de contaminación orgánica; contaminación orgánica y eutrofización	Considerados confiables para detectar sobrecarga orgánica; los índices de diversidad (Shannon-Wiener) respaldan estos hallazgos
Hernández et al., 2018				
Escobar et al., 2013	Comunidades planctónicas (varias especies)	Manantiales tras perturbación antrópica	Presencia/abundancia indica contaminación	Útiles en contextos agrícolas; posible identificación a nivel de especie
Morán-Mora et al., 2025	<i>Coccobotrys</i> sp., <i>Frustulia</i> sp. (fitoplancton)	Oligotrófico, bajo impacto humano	Indicadores de alta calidad del agua	Específico del contexto; estudio realizado en Panamá
Morán-Mora et al., 2025	<i>Spirogyra</i> sp., <i>Planktothrix</i> sp. (fitoplancton)	Eutrofización, impacto agrícola	Indicadores de contaminación	Específico del contexto; estudio realizado en Panamá
Hernández et al., 2018	<i>Chaetophora</i> sp., <i>Cymbella tumida</i> , <i>Gomphonema subclavatum</i> , <i>Tabellaria</i> sp., <i>Zygnema</i> sp. (algas perifíticas)	Gradientes ambientales variables; impacto agrícola	Algunas especies se adaptan, otras indican buena calidad	Efectivas para evaluar la calidad ecológica; se requiere calibración local

Nota. Elaboración propia de la investigación.

En la (Figura 2) de barras apiladas muestra cómo cada estudio evaluó los tres componentes clave: condiciones ambientales, valor indicador y confiabilidad de las microalgas como bioindicadores.

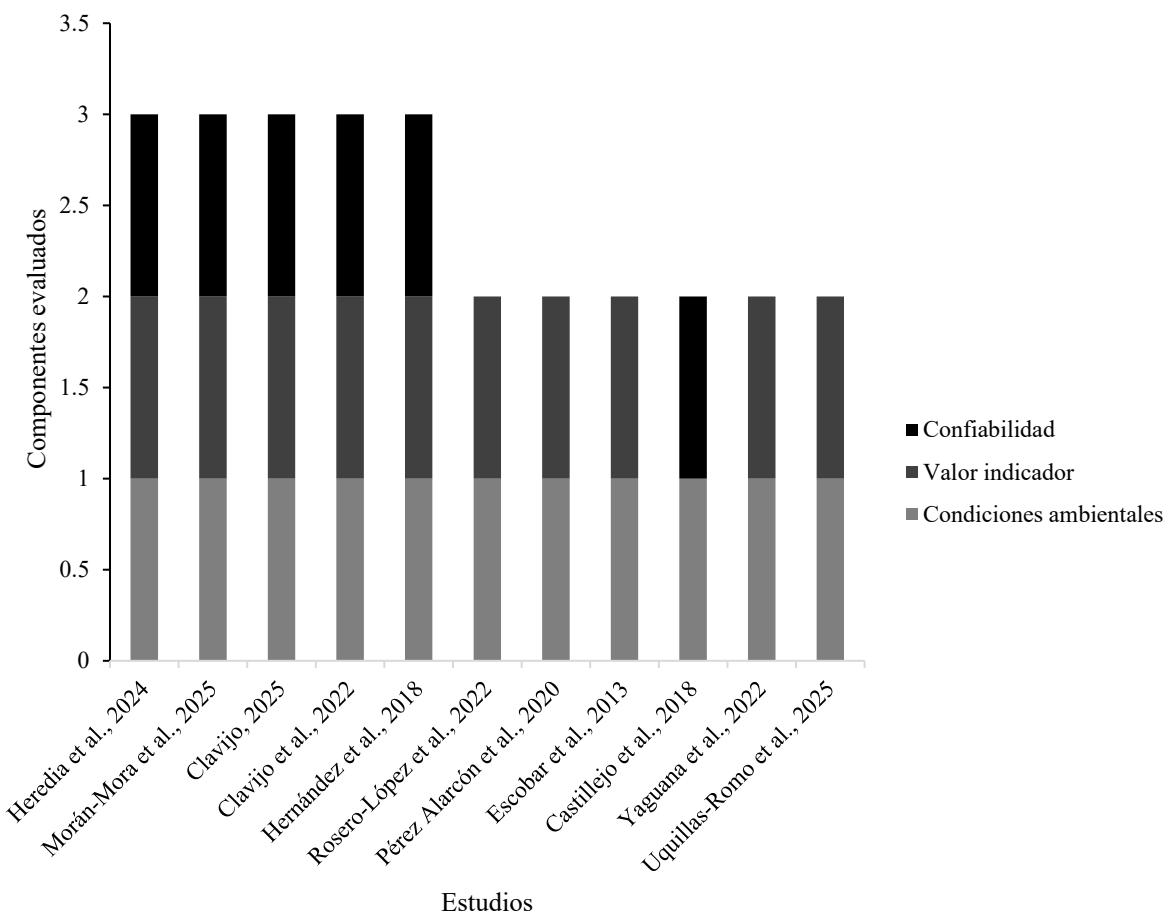


Figura 2: Evaluación de los estudios sobre microalgas como bioindicadores, según si consideraron condiciones ambientales, valor indicador y confiabilidad del uso de las especies.

4.3 Correlación entre microalgas y parámetros ambientales

Luego de analizar la relación entre los parámetros ambientales evaluados en los estudios cienciométricos y la respuesta biológica observada en las comunidades de microalgas en ríos de Ecuador y regiones vecinas (Tabla 5). Se identificó que en cuatro de los cinco tipos de parámetros fosfatos y nutrientes, Oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales y conductividad, y coliformes los niveles de impacto más altos fueron reportados en zonas con influencia antrópica significativa, especialmente en áreas urbanas o agrícolas. El único parámetro con un nivel de impacto descrito como variable fue la temperatura y el caudal, cuya influencia estuvo

condicionada por factores estacionales y la actividad humana (como la presencia de visitantes). En cuanto a los patrones geográficos, los fosfatos y nutrientes mostraron un aumento aguas abajo, con mayor impacto en las zonas bajas y urbanas; mientras que el oxígeno disuelto presentó un patrón específico del sitio, con efectos más notorios en zonas de menor altitud y altamente impactadas. Para los sólidos disueltos y la conductividad, se observó un incremento progresivo desde las cabeceras hasta la desembocadura. En contraste, los coliformes no presentaron un patrón geográfico uniforme entre los estudios analizados. Es importante destacar que ningún parámetro registró niveles elevados en sitios de referencia o no impactados; todos los valores altos se asociaron exclusivamente a usos del suelo y actividades humanas. En conjunto, estos resultados evidencian que, si bien existen patrones geográficos recurrentes, no hay un patrón dominante aplicable a todos los parámetros, lo que refuerza la necesidad de enfoques multivariados y específicos del contexto en la evaluación de la calidad del agua mediante bioindicadores.

Tabla 6: Correlaciones de las microalgas y cianobacterias con parámetros ambientales del agua.

Tipo de Parámetro	Respuesta Biológica	Nivel de Impacto	Patrón Geográfico
Sólidos Disueltos Totales (TDS), conductividad	Correlación con menores índices de calidad ecológica Relación directa con niveles de fosfato; afecta la composición de microalgas	Alto en sitios impactados por actividades antrópicas Variable; influenciada por la temporada y la actividad humana	Aumento progresivo desde cabeceras hacia la desembocadura Estacional y específico del sitio
Temperatura, caudal	Altos niveles indican contaminación; asociados a baja diversidad	Alto en zonas de impacto agrícola/urbano	No se encontró mención consistente sobre patrones geográficos en los estudios
Coliformes (microbiológico)	Mayor abundancia de microalgas tolerantes; reducción de la diversidad	Alto en zonas impactadas, urbanas o agrícolas	Incremento aguas abajo; zonas bajas y urbanas más afectadas
Fosfatos, nutrientes	Niveles bajos de OD asociados a dominancia de taxones tolerantes a contaminación	Alto en áreas con actividad humana directa	Específico del sitio; más pronunciado en zonas bajas o impactadas
Oxígeno Disuelto (OD)			

Nota. Elaboración propia de la investigación.

En la Figura 3 se muestra la comparación entre el nivel de impacto ambiental y la respuesta biológica observada de microalgas y cianobacterias frente a cinco parámetros clave de calidad del agua: TDS/conductividad, temperatura/caudal, coliformes, fosfatos/nutrientes y oxígeno disuelto (OD). Se evidencia que los parámetros con mayor correlación tanto ecológica como bioindicadora son los fosfatos, los coliformes y el oxígeno disuelto, todos con una puntuación alta (4/4) en ambas categorías evaluadas. Esto refuerza su papel central como variables críticas en el análisis de deterioro ambiental, especialmente en cuerpos de agua impactados por actividades domésticas o agrícolas (Heredia et al., 2024; Rosero-López et al., 2022; Clavijo, 2025). Los TDS y la conductividad también mostraron alta incidencia, particularmente en zonas bajas, lo que concuerda con estudios que asocian estos parámetros al arrastre de sedimentos y carga iónica producto del uso del suelo y escorrentías (Morán-Mora et al., 2025). Por su parte, la temperatura y el caudal presentaron una relación más variable, influenciada por factores estacionales y locales, aunque se reconoce su efecto sobre la solubilidad del oxígeno y la composición algal (Yaguana et al., 2022). En conjunto, esta gráfica visualiza cómo los cambios fisicoquímicos en el agua se traducen en respuestas ecológicas observables a través de las comunidades de microalgas y cianobacterias, confirmando su utilidad como bioindicadores sensibles de calidad ambiental en sistemas fluviales del Ecuador.

En cuanto a los grupos ecológicos utilizados como bioindicadores (Figura 4a), se observa que las diatomeas epilíticas son el grupo predominante con un (45 %) de representatividad, seguidas por el perifiton con un (27 %), y el fitoplancton con un (28 %). Esta distribución evidencia una marcada preferencia por los organismos adheridos a sustratos, especialmente diatomeas, debido a su alta sensibilidad a gradientes de contaminación y su utilidad para reflejar el estado ecológico de los ríos, en particular en zonas andinas del Ecuador.

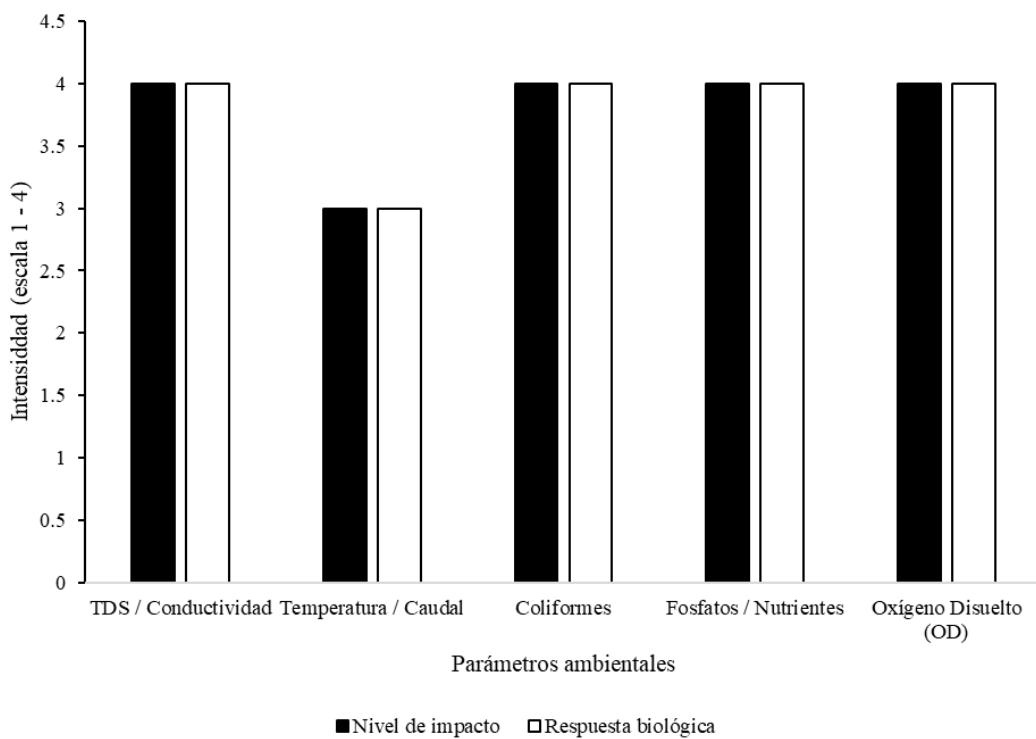


Figura 3: Relación entre parámetros fisicoquímicos del agua y la respuesta bioindicadora de microalgas y cianobacterias.

Por otro lado, en términos taxonómicos (Figura 4b), las diatomeas representan el (50 %) del total de especies o géneros identificados en los estudios, seguidas por las cianobacterias (25 %) y otros grupos (25 %), que incluyen algas verdes y euglenoides.

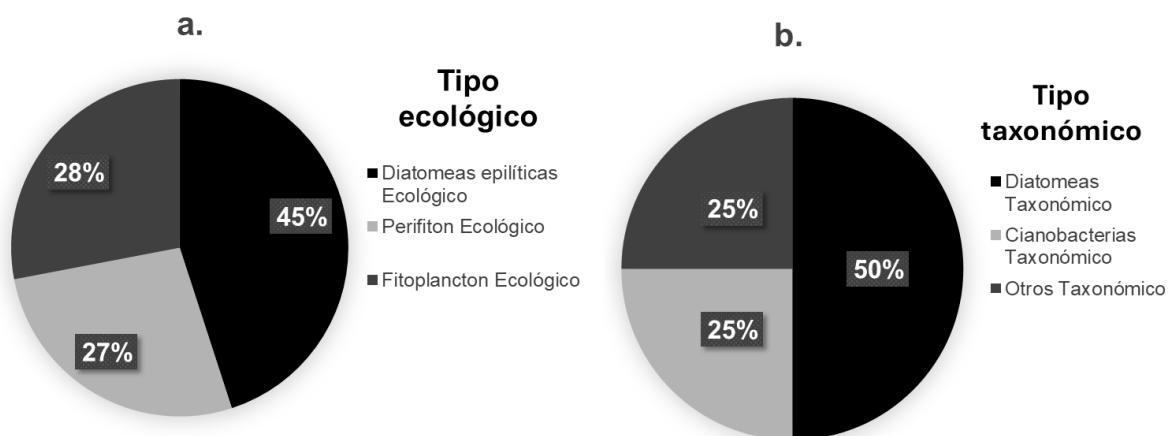


Figura 4: Distribución de microalgas y cianobacterias en grupos y especies en los estudios evaluados como bioindicadores.

Esta tendencia confirma el papel central de las diatomeas como bioindicadores confiables, mientras que las cianobacterias, aunque menos frecuentes, se asocian fuertemente a procesos de eutrofización y presencia de materia orgánica en descomposición. La categoría “otros” abarca géneros como *Euglena*, *Chlamydomonas*, *Spirogyra* y *Coccobotrys*, los cuales han mostrado sensibilidad a perturbaciones antrópicas, pero requieren mayor calibración local para su uso estandarizado. Estos resultados resaltan la necesidad de promover evaluaciones integradas, que consideren tanto la diversidad taxonómica como las condiciones ambientales, para lograr un diagnóstico más robusto sobre la calidad del agua en sistemas fluviales ecuatorianos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados del análisis cienciométrico evidencian que las microalgas, especialmente las diatomeas epilíticas, el fitoplancton y el perifiton, han sido empleadas exitosamente como bioindicadores en estudios realizados en ríos del Ecuador, Panamá y Colombia. Estas investigaciones muestran una fuerte correlación entre la composición de comunidades algales y los gradientes de calidad del agua, particularmente en contextos influenciados por actividades agrícolas, urbanas y antrópicas. Las especies indicadoras identificadas permiten discriminar entre condiciones oligotróficas y eutróficas, y la pérdida de diversidad aparece como un signo consistente de deterioro ecológico. Además, los parámetros fisicoquímicos como fosfatos, OD, TDS y coliformes mostraron patrones claros de respuesta biológica e impacto espacial, con niveles elevados asociados exclusivamente a usos del suelo y no a sitios de referencia. Esta tesis evidencia la necesidad de actualizar y robustecer el marco normativo e institucional que rige la calidad del agua en Ecuador. Las normativas actuales (TULSMA, Norma Técnica de Calidad Ambiental del Recurso Agua, Plan Nacional de Recursos Hídricos 2021–2030) se centran casi exclusivamente en parámetros fisicoquímicos, dejando fuera indicadores biológicos como las microalgas. Es necesario incluirlos en Reglamentos técnicos del MAATE, Reformas a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos (2014), Guías oficiales de evaluación ambiental e Indicadores del Sistema Nacional de Información del Agua (MAATE).

Desde el punto de vista metodológico, los estudios revisados presentan diseños observacionales con muestreo sistemático o estructurado en múltiples sitios y gradientes altitudinales, lo que demuestra una aproximación robusta pero heterogénea. Se observaron variaciones en el nivel taxonómico de identificación (género y especie) y en los índices utilizados, destacando la aplicación de métricas como Shannon-Wiener, Simpson, Pielou e índices ecológicos como el Índice de Sensibilidad Específica a la Contaminación. Sin embargo,

se identificó una falta de estandarización metodológica, especialmente en la selección y calibración de índices, lo cual limita la comparabilidad de resultados. Entre los estudios encontrados Tabla 1 y 2, se encontró que los índices internacionales podrían sobreestimar la calidad del agua en sistemas altamente impactados del Ecuador, y recomendaron el desarrollo de herramientas validadas localmente.

A pesar de los avances significativos, existen limitaciones importantes en el uso de microalgas y cianobacterias como bioindicadores. La variabilidad estacional natural y la influencia de factores climáticos (Marquez Uribe, 2021) evidencian la necesidad de desarrollar un índice taxonómico especializado para los ríos de diferentes regiones del país, ya que la implementación rutinaria sera la principal herramienta para ajustar los resultados a las realidades locales. Además, las innovaciones tecnológicas, incluyendo el uso de sensores remotos, técnicas moleculares y sistemas de inteligencia artificial para el reconocimiento de especies, prometen revolucionar el campo de los bioindicadores acuáticos. (Fray Valencia, 2021) exploró el uso de técnicas automatizadas para la identificación de microalgas, mostrando resultados prometedores para el monitoreo continuo y en tiempo real. Por otro lado, la selección de microalgas y cianobacterias como bioindicadores se fundamenta en la evidencia científica acumulada que demuestra su efectividad como herramientas de evaluación ambiental (Rodríguez Vásquez, 2023). De esta manera, la combinación de análisis taxonómicos, índices ecológicos y correlaciones con parámetros fisicoquímicos proporciona un enfoque integral que ha demostrado su validez en múltiples contextos geográficos y ambientales similares. Para alcanzar este objetivo es necesario aumentar las alianzas entre universidades, institutos de investigación y gobiernos locales para aprobar metodologías y fortalecer la institucionalización del monitoreo ecológico con base científica.

Finalmente, el conjunto de evidencia respalda firmemente la integración de microalgas como componentes clave en los sistemas de evaluación de la calidad del agua en ríos del

Ecuador. Sin embargo, esta incorporación debe ir acompañada de la calibración de índices biológicos a las condiciones ecológicas y taxonómicas locales, así como de la combinación con indicadores fisicoquímicos y microbiológicos para obtener evaluaciones más completas. La escasa disponibilidad de estudios enfocados exclusivamente en contextos ecuatorianos y la heterogeneidad en los enfoques metodológicos subrayan la urgencia de fortalecer líneas de investigación nacionales que promuevan el monitoreo biológico sistemático en ríos, particularmente en ecosistemas altoandinos y amazónicos. Este esfuerzo contribuirá no solo a una mejor comprensión del estado ecológico de los sistemas acuáticos, sino también al diseño de políticas públicas de gestión hídrica más integrales, contextualizadas y basadas en evidencia científica.

Con base en los hallazgos de esta investigación y en referencia a modelos internacionales como la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, se propone como modelo de incorporación de indicadores biológicos y fisicoquímicos en los estándares de calidad del agua en Ecuador (Tabla 7). Esta propuesta busca complementar los actuales parámetros normativos del TULSMA con métricas ecológicas que reflejen de forma más integrada el estado real de los ecosistemas acuáticos. Se incluyen variables clave como la riqueza, diversidad y dominancia de microalgas, así como la presencia de cianobacterias tóxicas y la concentración de clorofila-a, combinadas con nutrientes esenciales (fósforo, nitrógeno) y oxígeno disuelto, para generar una visión más completa y sensible de la calidad del agua en sistemas fluviales.

Tabla 7: Tabla modelo como una propuesta para incluir indicadores biológicos en la normativa ecuatoriana

Parámetro	Unidad de medida	Categoría de calidad
Microalgas bioindicadoras (Diatomeas, Chlorophyta, etc.)	Presencia/ausencia, proporción de especies sensibles vs. tolerantes	Alta: dominan especies sensibles; Baja: dominan especies tolerantes
Cianobacterias (géneros indicadores: Oscillatoria, Microcystis)	Abundancia relativa y dominancia (%)	Alta: < 20% de dominancia; Baja: > 60% de cianobacterias dominantes
Diversidad específica (Índice de Shannon)	Índice (0 a >3.5)	Alta: > 3.0; Baja: < 1.5
Equitatividad (Pielou)	Índice (0 a 1)	Alta: > 0.8; Baja: < 0.4
Clorofila-a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ = oligotrófico; > 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ = eutrófico
Oxígeno disuelto (OD) (mg/L)	mg/L	> 5 mg/L = buena; < 3 mg/L = deficiente
Fósforo total (PT) (mg/L)	mg/L	< 0.05 mg/L = excelente; > 0.1 mg/L = eutrofización
Nitrógeno total (NT) (mg/L)	mg/L	< 1 mg/L = buena; > 5 mg/L = contaminación orgánica
Coliformes fecales	NMP/100 mL	< 1000 NMP/100 mL (Asociado a contaminación fecal)

6. REFERENCIAS

- Allan, J. D., Castillo, M. M., & Capps, K. A. (2021). *Stream ecology: structure and function of running waters*. Springer Nature.
- Arévalo Moreno, A. A. (2023). *Estudio de la diversidad de microalgas y cianobacterias en ecosistemas acuáticos continentales del Ecuador, para establecer la calidad del agua*. (Master's thesis, Quito: Universidad Tecnológica Indoamérica).
- Ayala Matute, D. E. (2021). *Uso de Diatomeas epilíticas como bioindicadoras de calidad de agua de la cuenca media-baja del Río Yanuncay en época seca*.
- Baylón Coritoma, M. R. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología aplicada*, 17(1), 119-132.
- Cervantes, R. S. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2), 137-146.
- Chinga Vinces, J. A. (2019). EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA EN EL RÍO PORTOVIEJO COMO INDICADORES BIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA (Doctoral dissertation).
- Contino, L. (2022). *Estudio de la fitoflora del río Colorado (Tucumán, Argentina) en relación a parámetros fisicoquímicos y su implicancia con la calidad del agua* . (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Tucumán).
- Domínguez, M. L. (2024). *CALIDAD DEL AGUA DEL CURSO INFERIOR DEL RÍO CHUBUT EVALUADA MEDIANTE ÍNDICES TRÓFICOS*. (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA AUSTRAL).
- Encina, M. L. (2022). Fitoplancton como indicador de calidad de agua. . *Revista Impacto*, 2(1), 62-64.
- EPMAPS. (2024). *Estrategia para la descontaminación de los ríos de Quito. Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito* . Quito, Ecuador.
- Escobar Cayetano, S. D. (2020). . *Determinación de microorganismos considerados indicadores biológicos de eutrofización en la laguna Huacracocha Huancayo en el período abril a septiembre del año 2019*.

- Fray Valencia, A. (2021). *Microalgas como bioindicadores de contaminación en las zonas de Punta Carnero Salinas y escollera La Libertad de la provincia de Santa Elena*. (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2021.).
- Garcés, M. V. (2017). Determinación de bioindicadores y protocolos de la calidad de agua en el embalse de la Central Hidroeléctrica Baba. . *Dominio de las Ciencias*, 3(3), 628-646.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. . McGraw-Hill.
- Iza Arias, G. L. (2024). *Evaluación de la calidad del agua del río San Pedro en los cantones Mejía, Rumiñahui y Quito, aplicando ICA-Dinius*.
- Jurado, M. T. (2024). . PROPUESTA DE INDICADORES PARA EVALUAR EL VALOR ECOLÓGICO DE HUMEDALES COSTEROS DE LIMA Y CALLAO. *Ecología Aplicada*, 23(2), 179-197.
- Lobo, E. A. (2016). Bioindicators in aquatic ecosystems: The role of diatoms and cyanobacteria in water quality assessment. . *Ecological Indicators*, 60, 488–497.
- Loor Pinargote, E. J. (2025). *Microalgas en los ríos Garrapata y Grande, provincia de Manabí*. (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2025.).
- Márquez Uribe, D. Y. (2021). *Cuantificación de indicadores de la calidad de agua residual municipal en un sistema de lagunas de oxidación* . (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Mata, G. M. (2021). *Barrancas. el drenaje de la eterna primavera: impactos económicos de los efluentes residuales en Cuernavaca*.
- Mora, M. A. (2025). Evaluación del estado ecológico de la quebrada la sonadora en Cermeño, Coclé, Panamá, utilizando fitoplancton como bioindicador. . *Revista Semilla del Este*, 5(2), 185-202.
- Morocho, L. E. (2019). *Lanzamiento de vigas metálicas del Puente Sobre el Río San Pedro ubicado en la vía Conocoto-Amaguaña, Pichincha, Ecuador* . (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO).
- Pilalumbo Armas, J. J. (2020). *Estudio de la Calidad de Agua del Río San Pedro, ubicado dentro del Distrito Metropolitano de Quito en el periodo 2013-2019*.

- Reynán, C. A. (2023). Dinámica de regeneración natural post-incendio de ecosistemas altoandinos en el distrito de Chiara. Ayacucho-Perú. . *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 11(1), 6-21.
- Reynolds, C. S. (2019). *The Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press.
- Rivera Guamán, J. C. (2023). *Calidad del agua del río Nangaritza mediante el análisis de la comunidad fitoplanctónica*.
- Rodas-Pernillo, E. &.-M. (2020). Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala. . *Ciencia, Tecnología y Salud*, 7(2), 170-188.
- Rodrigues Capítulo, A., & Gómez, N. (2020). *Aplicación de indicadores biológicos en cursos de agua de la ecorregión Pampa*.
- Rodríguez Vásquez, F. D. (2023). *El fitoplancton y zooplancton como bioindicadores de calidad del agua, durante el periodo del 2015 al 2020, en la laguna de Yarinacocha, Ucayali, 2023*.
- Rosero-López, D., Todd Walter, M., Flecker, A. S., De Bièvre, B., Osorio, R., González-Zeas, D., ... & Dangles, O. (2022). A whole-ecosystem experiment reveals flow-induced shifts in a stream community. *Communications Biology*, 5(1), 420.
- Salazar Huánuco, J. E. (2020). *Evaluación del impacto de las aguas residuales sobre la calidad del agua del río Tarma en el periodo 2015-2019*.
- Saldaña Fabela, P. I. (2019). *Detección de florecimientos algales producidos por cianobacterias, como posible causante de la mortandad de manatíes y peces, así como la hidrodinámica del sistema fluvial del río Bitzales, Macuspana, Tabasco*.
- Sardi Barzallo, C. (2018). *La diversidad de algas diatomeas como herramientas de monitoreo para la gestión de la calidad de recursos hídricos, en los páramos del Macizo del Cajas* . (Master's thesis, Universidad del Azuay).
- Sokal, R. R. (2012). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. W.H. Freeman and Co.
- Vélez-Azañero, A., Lozano, S., & Cáceres-Torres, K. (2016). Diversidad de fitoplancton como indicador de calidad de agua en la cuenca baja del río Lurín, Lima, Perú. *Ecología aplicada*, 15(2), 69-79.
- Villalobos, Y. G. (2020). Poblaciones de cianobacterias en dos embalses de abasto a La Habana: La Coca y La Zarza. . *Acta Botánica Cubana*, 219(2).

- Villalobos, Y. G.-S. (2022). Propuesta de un indicador de calidad biológica del agua en la evaluación del manejo sostenible de tierras (MST) en Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 221.
- Wingfield, S. M.-M.-H. (2021). Challenges to water management in Ecuador: Legal authorization, quality parameters, and socio-political responses. *Water*, 13(8), 1017.
- Zamora Díaz, P. V. (2021). *Evaluación del impacto del esfuerzo de un Sistema de Lagunas de Estabilización Facultativa mediante parámetros físicos químicos y biológicos (microalgas betónicas) en un sector del río Cañas, Guanacaste, Costa Rica*.
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Pearson.
- Bolívar Heredia, Patricio Méndez, & Miguel Osorio. (2024). Epilithic Diatoms as Bioindicators of Water Quality in the Jimbitono River, Morona Santiago, Ecuador. *ESPOCH Congresses The Ecuadorian Journal of STEAM*.
<https://doi.org/10.18502/esepoch.v4i1.15797>
- Clavijo Cevallos Manuel Patricio, Gallegos Diana Carolina, & Vilela Muñoz Cinthia. (2022). Diatomeas epilíticas asociadas a la calidad de agua del río Illuchi, Latacunga, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5, e158-e158.
<https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e158>
- Clavijo Cevallos Patricio Manuel. (2025). Diatomeas epilíticas asociadas al índice trófico de calidad del agua del río Yanayacu, Cotopaxi, Ecuador. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*. <https://doi.org/10.61154/mrcm.v11i1.2954>
- Edgar Uquillas-Romo, Adrián Chalán Ramírez, Luis Patiño-Pomavilla, Johanna Elizabeth Ayala Izurieta, & Andrés Beltrán-Dávalos. (2025). Diatomeas epilíticas como bioindicadores de calidad hídrica en el río Pachanlica, Ecuador. *Tecnología y ciencias del agua*. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-17-2-1>
- Elizabeth Yolanda Pérez Alarcón, Alarcón, E. Y. P., Verónica Maila Álvarez, Álvarez, V. M., Jenny Myreya Morillo Palacio, Palacio, J. M. M., José Ricardo Romero Quinaluisa,

Quinaluisa, J. R. R., José Bolívar Villarreal Yazán, & Yazán, J. B. V. (2020). *Calidad del agua del Río Oglán mediante bioindicadores fitoplanctónicos en la Estación Científica Juri Juri Kawsay*. 41(2), 109-124.

<https://doi.org/10.26807/remcb.v41i2.881>

Escobar, M. J., Terneus, E., Yáñez, P., & Patricio Yáñez. (2013). *EL PLANCTON COMO BIOINDICADOR DE LA CALIDAD DEL AGUA EN ZONAS AGRÍCOLAS ANDINAS: ANÁLISIS DE CASO*.

European Commission. (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy*. L327, 1-72. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>

Hernández, E., Esnedy Hernández A, A, E. H., Robinson Sepúlveda S, S, R. S., Heazel Grajales, Grajales, H., Heazel Grajales, Ramírez, N. J. A., Néstor Aguirre R, R, N. A., de Jesús Vélez Macías, F., Fabio Vélez M, M, F. V., Orlando Caicedo Q, Q, O. C., Jenny A. Mesa, Jenny Alejandra Mesa, Mesa, J. A., ... M, Y. M. (2018). Índice de calidad ecológico empleando algas perifíticas en un tramo del Río San Juan (Antioquia-Colombia). *Revista Mvz Cordoba*, 6998-7012.

<https://doi.org/10.21897/rmvz.1423>

MAATE. (2021). *Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica*.

<https://www.ambiente.gob.ec/>

Manuel Patricio Clavijo-Cevallos & Salomé Mishque-Cevallos. (2024). Utilización del Gen 18S, como marcador genético para la identificación molecular de diatomeas epilíticas. *Nativa*. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.17914>

Morán Mora Mario Alberto, Morán Mora Mario Antonio, & Llerena José Aguilar. (2025). Evaluación del estado ecológico de la quebrada la sonadora en Cermeño, Coclé,

- Panamá, utilizando fitoplancton como bioindicador. *Revista Semilla del Este*.
<https://doi.org/10.48204/semillaeste.v5n2.6772>
- Quevedo, L., Merino, K., Godoy, S., & Carrera, C. (2021). *Ecological assessment and water quality using benthic diatom communities in an Ecuadorian amazon river*. 152-158.
- Rodriguez-Capítulo, A., & Gómez, N. (2020). Bioindicadores en la evaluación de la calidad del agua: Conceptos y aplicaciones. *Universidad Nacional de La Plata*.
- Rosero-López, D., M. Todd Walter, M Todd Walter, Alexander S Flecker, Alexander S Flecker, Bert De Bièvre, Bert De Bièvre, Rafael Guerreiro Osório, Rafael Osorio, D. González-Zeas, Dunia González-Zeas, Sophie Cauvy-Fraunié, Sophie Cauvy-Fraunié, Olivier Dangles, & Dangles, O. (2022). A whole-ecosystem experiment reveals flow-induced shifts in a stream community. *Communications biology*, 5(1).
<https://doi.org/10.1038/s42003-022-03345-5>
- Segura-García, V., Enrique, A., Israde, I., & Maidana. (2012). Diatomeas epilíticas como indicadores de la calidad del agua en la cuenca alta del río Lerma, México. *Segura-García, V., Enrique, A., Israde, I., & Maidana*, 1209-1255.
- Viteri-Garcés, M. I., Chalen-Medina, J. A., & Cevallos-Revelo, Z. L. (2017). Determinación de bioindicadores y protocolos de la calidad de agua en el embalse de la Central Hidroeléctrica Baba. *Dominio de las Ciencias*, 3(3), 628-646.
<https://doi.org/10.23857/dc.v3i3.497>
- Y. Ferrer-Sánchez, A. R. Ramírez Castillo, A. Plasencia-Vázquez, & F. Abasolo-Pacheco. (2024). Impacto del uso de suelo y la fragmentación del paisaje sobre la calidad del agua del río Teaone en Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
<https://doi.org/10.20937/rica.54900>

Yaguana Roberth & Cartuche Victor. (2022). Variación de diatomeas (Bacillariophyta) en un gradiente del estado de conservación de ribera del río Malacatos, Loja- Ecuador.

CEDAMAZ, 12(2). <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i2.1626>

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1A: Bibliografía seleccionada de estudios de microalgas en Ecuador.....</i>	51
<i>Anexo 2A: Uso de plataforma Scopus para obtener bibliografía sobre microalgas a nivel de Ecuador</i>	52

Anexo A: BIBLIOGRAFÍA

Anexo 1A: Bibliografía seleccionada de estudios de microalgas en Ecuador

Estudio	Región geográfica	Tipo de microalgas	Parámetros medidos	Hallazgos principales
Uquillas-Romo et al., 2025	Región andina, Ecuador	Diatomeas epilíticas	Fosfatos, clorofila-a, sólidos disueltos	Diatomeas tolerantes a contaminación, diversidad baja en zonas críticas
Pérez Alarcón et al., 2020	Región amazónica	Fitoplancton, perifiton	Fosfatos, TDS, pH, temperatura	Indicadores de contaminación orgánica, relación inversa con visitantes
Rosero-López et al., 2022	Ecuador, Papallacta	Cianobacterias	Nutrientes, clorofila-a, régimen hidrológico	Indicadores de acumulación de materia orgánica en descomposición.
Castillejo et al., 2018	Región andina	Diatomeas epilíticas	DO, pH, DBO, DQO, amonio	Aumento de diversidad aguas abajo; se requiere índice trófico local
Escobar et al., 2013	Puéllaro, Ecuador	Comunidades planctónicas	Físico-químicos no especificados	Presencia de plancton indica contaminación por perturbación antrópica
(P. M. C. Cevallos 2025)	Región andina, Ecuador (río Yanayacu, provincia de Cotopaxi)	Diatomeas epilíticas	Temperatura, nitratos, fosfatos, OD, DBOs, DQO, TDS, turbidez, coliformes fecales, pH, conductividad eléctrica	Incremento progresivo de contaminación aguas abajo; ITCA evidenció contaminación moderada (β -mesotrófico) en el punto alto y fuerte (α -mesotrófico) en puntos medios y bajos; especies indicadoras de diferentes grados de eutrofización.
(M. P. C. Cevallos et al. 2022)	Región andina, provincia de Cotopaxi, Ecuador (río Illuchi)	Diatomeas epilíticas	Temperatura, pH, oxígeno disuelto, DBOs, nitratos, fosfatos, coliformes totales, sólidos disueltos, turbidez, clorofila	Mayor contaminación aguas abajo. El ICA varió de "regular" (puntos 1 y 2) a "malo" (punto 3). El ITCA mostró contaminación despreciable (oligotrófico) en punto 1, moderada (β -mesotrófico) en punto 2 y fuerte (α -mesotrófico) en punto 3. Diatomeas como <i>Cocconeis lineata</i> , <i>Fragilaria ulna</i> y <i>Rhoicosphenia abbreviata</i> se relacionaron con mayor eutrofización
(Cabezas, Steinitz-Kannan, y Vegas-Vilarrubia 2023)	Región andina norte del Ecuador, Laguna de Yahuarcocha, provincia de Imbabura	Cianobacterias (específicamente <i>Planktothrix agardhii</i>)	pH, temperatura, oxígeno disuelto (superficie y fondo), alcalinidad, fosfatos (PO_4), nitrógeno total (NT), clorofila-a, conductividad eléctrica, profundidad y transparencia (Secchi)	Se registró una intensa floración de <i>Planktothrix agardhii</i> (75–90% del fitoplancton). Alta clorofila-a y baja transparencia evidencian un estado hipereutrófico. Se ha reducido la biodiversidad fitoplánctica y bentónica. Se confirmó presencia de esta especie mediante análisis metagenómico y se identificó potencial toxicogenicidad
(Delgado-Fernández et al. 2025)	Región andina, Lagos Quimsacocha, provincia de Azuay	Fitoplancton: Diatomeas (<i>Synedra</i> , <i>Navicula</i>), algas verdes (<i>Chlorella</i> , <i>Cosmarium</i>), euglenoides (<i>Euglena</i>)	Temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, profundidad de lago; además índices de diversidad (Shannon, Simpson), índice de Palmer y AARL-PP Score	Se identificaron 80 morfoespecies; estado trófico mesotrófico, con contaminación orgánica moderada; las diferencias de composición se atribuyen a factores ambientales como la profundidad.
(Alarcón et al. 2020)	Región amazónica, Bosque Protector Oglán Alto, cantón Arajuno, provincia de Pastaza	Fitoplancton y perifiton (microalgas libres y adheridas)	Biológicos: diversidad (Shannon-Wiener) de fitoplancton y perifiton. Físico-químicos: temperatura, sólidos disueltos totales, caudal, fosfatos; y otros (pH, oxígeno disuelto, turbidez, DBO, DQO, nitratos)	El río está alterado; la relación visitantes-fosfatos fue inversa; relación directa fosfatos con caudal y temperatura; diversidad planctónica alta en control, media en zonas alteradas; aumento de fosfatos tras mayor afluencia de visitantes
(Heredia, Méndez, y Osorio 2024)	Región Amazónica, Río Jimbitono, parroquia Proaño, provincia de Morona Santiago	Diatomeas epilíticas (fitobentos adherido a rocas)	Físico-químicos: temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, sólidos totales, DBO5, nitratos, fosfatos, coliformes fecales	El ICA (Índice de Calidad del Agua) indicó calidad regular en PJ-01 y PJ-02, y mala en PJ-03. El ITCA (Índice Trófico de Calidad del Agua) evidenció una transición de estado: PJ-01: oligotrófico, PJ-02: β -mesotrófico, PJ-03: α -mesotrófico. La disminución de calidad se atribuye a aguas residuales domésticas y actividades pecuarias cercanas.
(Yaguana Robert y Cartuche Victor 2022)	Río Malacatos, cantón Loja, provincia de Loja, región andina del Ecuador. Parte de la cuenca binacional Catamayo-Chira	Diatomeas epilíticas (fitoperifiton)	Riqueza, diversidad (Shannon), equitatividad, biovolumen celular. No se evaluaron parámetros físico-químicos directamente.	Se identificaron 21 géneros y 4,765 individuos. El tramo con vegetación nativa presentó alta equitatividad y biovolumen, pero menor riqueza. El tramo urbano tuvo baja diversidad y equitatividad, dominado por <i>Navicula</i> y <i>Nitzschia</i> .
Morán Mora et al., 2025	Panamá	Fitoplancton	Nutrientes, coliformes, TDS	Géneros indicadores de calidad; baja diversidad en zonas impactadas
Hernández et al., 2018	Colombia	Algomas perifíticos	Nutrientes, sólidos, pH, turbidez	Deterioro progresivo; especies perifíticas como buenos indicadores

Anexo 2A: Uso de plataforma Scopus para obtener bibliografía sobre microalgas a nivel de Ecuador

The screenshot shows the Scopus search interface. At the top, there is a logo, the word "Scopus", and navigation links for "Search", "Lists", "Sources", "SciVal", a help icon, and account options ("Create account" and "Sign in"). Below the search bar, there is an "Advanced query" link.

The search query consists of three main parts connected by "AND":

- Search within Article title, Abstract, Keywords: "microalgae" OR "algae" OR "phytoplankton" OR "cyanobacteria" OR "diatoms"
- Search within Article title, Abstract, Keywords: "bioindicators" OR "indicators" OR "biomarkers" OR "ecological indicators"
- Search within Article title, Abstract, Keywords: "water quality" OR "water assessment" OR "aquatic health" OR "hydrology"

Below the search bar, there are buttons for "Save search", "Set search alert", "Add search field", "Reset", and a large blue "Search" button.