

MACROINVERTEBRADOS COMO BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DEL  
AGUA EN ECOSISTEMAS DE AGUA DULCE



DANIEL IGNACIO CÁRDENAS LÓPEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL  
ESTADO DEL ARTE  
VILLAVICENCIO

2025

MACROINVERTEBRADOS COMO BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA EN  
ECOSISTEMAS DE AGUA DULCE

DANIEL IGNACIO CÁRDENAS LÓPEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

PhD. DANIEL EDUARDO TRUJILLO GONZÁLEZ

Doctor en Ciencias Químicas

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD INGENIERIA. AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2025

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Mg. William PEÑARANDA ZÁRATE**

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

### **Dedicatoria**

A mi madre Dora López Gutiérrez, la cual con su amor incondicional me dio la guía necesaria para continuar, este logro es gracias al esfuerzo, guía y sacrificio que día a día me brindo esforzándose para que nunca me rindiera.

A mi abuela Rosalba Gutiérrez quien fue un pilar fundamental a lo largo de mi vida y quien antes de su partida me hizo prometerle que terminaría todo lo que me propusiera en honor a ella presento este trabajo

A mi Papá Javier Cárdenas por su apoyo en momentos claves de mi vida y su mensaje de no rendirme y seguir adelante

A mi Papá Juan Camilo Diaz quien con su dedicación a lo largo de mi vida formo mi carácter y estuvo presente siempre para ayudarme a alcanzar mis sueños y apoyarme en cada paso

### **Agradecimientos**

Al doctor Daniel Eduardo Trujillo mi director quien con su guía y compromiso oriento mi trabajo logrando darme un impulso para terminarlo.

Al profesor Jair Burgos por su dedicación y compromiso con mi formación académica.

A mis padres quiénes me brindaron su confianza y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y sin ellos nada de esto sería posible.

A mi novia Gabriela Traslaviña quien es mi apoyo en todos los momentos de mi vida y gracias a ella he podido afrontar las adversidades de la mejor manera dándome siempre su amor y motivación para ser constante.

Al profesor Diego Cortes por su ayuda en mi trabajo de grado.

## Contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	11
Introducción .....	12
1. Desarrollo del estado del arte.....	15
1.1 Metodología de búsqueda.....	15
1.2 Estrategia de Búsqueda y Palabras Clave .....	15
1.3 Evaluación de la Calidad del Agua .....	17
1.4 Biomonitorio.....	18
2. Metodología y parámetros para recolectar macroinvertebrados acuáticos .....	23
2.1 Métodos para aguas poco profundas .....	24
2.2 Métodos para aguas profundas.....	31
3.Resultados Relevantes e impacto.....	32
3.1 Variables medibles.....	33
4.Delimitación del problema.....	34
4.1 Parámetros y características de la muestra documental .....	35
4.2 Enfoque epistemológico.....	36
5.Discusión.....	39
6. Conclusiones .....	41
7. Recomendaciones .....	42
Bibliografía .....	43

### Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Reconocimiento Taxonomico para la identificación .....	21
<b>Figura 2</b> Red tipo D para muestreos de macroinvertebrados acuáticos .....	25
<b>Figura 3</b> <i>Clasificación de macroinvertebrados de seis patas segmentadas (Stroud Water Research Center, n.d.)</i> .....	25
<b>Figura 4</b> <i>RED SURBER para recolección de macroinvertebrados (Redes Nagut, 2016)</i> .....	26
<b>Figura 5</b> <i>Muestreador de Fondos Hess Stream</i> .....	27
<b>Figura 6</b> <i>Draga para obtener muestras cuantitativas de un área definida del fondo</i> .....	31

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col. de acuerdo a los valores originales de BMWP</i> .....	28
<b>Tabla 2</b> <i>Clasificación de las aguas, significado de acuerdo con el índice BMWP/Col.</i> .....	29

## Resumen

Este trabajo explora el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Los macroinvertebrados, que incluyen insectos, moluscos, crustáceos y anélidos, son esenciales para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos debido a su sensibilidad a los cambios ambientales.

Se destacan varios índices biológicos utilizados para esta evaluación. El (*Biological Monitoring Working Party*) BMWP/Col () clasifica las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica, el índice ABI (*Índice Biológico Andino*), que es un índice creado para sistemas andinos de montaña (Meneses Campo et al., 2019). mientras que el ASPT (o *Average Score Per Taxon* (Puntuación Promedio por Taxón)) proporciona una medida de la calidad del agua independiente de la riqueza de taxones. El índice EPT se basa en la presencia de *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera*, órdenes altamente sensibles a la contaminación. El índice de diversidad de Shannon-Weaver mide tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos.

Para la recolección de macroinvertebrados, se emplean métodos cualitativos, cuantitativos y semi-cuantitativos, asegurando la representatividad y comparabilidad de las muestras. Las variables medibles incluyen aspectos taxonómicos, ecológicos y fisicoquímicos del agua, proporcionando una comprensión detallada de la estructura y dinámica de las comunidades de macroinvertebrados.

El diseño de redes de monitoreo con protocolos estandarizados es crucial para la comparación de resultados entre diferentes estudios y regiones. Estos protocolos aseguran la consistencia y fiabilidad de los datos, fundamentales para la toma de decisiones en la gestión ambiental.

Los macroinvertebrados no solo proporcionan una evaluación integrada de la calidad del agua, sino que también fomentan la participación comunitaria a través de programas de capacitación y educación ambiental. Sin embargo, se reconocen desafíos como la variabilidad natural de los ecosistemas y la necesidad de una identificación taxonómica precisa.

En conclusión, los macroinvertebrados son herramientas valiosas para la monitorización de la calidad del agua. Su uso, combinado con índices biológicos y métodos de muestreo

estandarizados, proporciona una base sólida para la gestión y conservación de los recursos hídricos, promoviendo una gestión sostenible y equitativa de los ecosistemas acuáticos.

**Palabras clave:** Macroinvertebrados, Bioindicadores, Calidad del agua, Agua dulce, Índices biológicos

### Abstract

This work explores the use of macroinvertebrates as bioindicators of water quality in freshwater ecosystems. Macroinvertebrates, including insects, mollusks, crustaceans, and annelids, are essential for assessing aquatic ecosystem health due to their sensitivity to environmental changes.

Several biological indices used for this assessment are highlighted. The BMWP/Col classifies macroinvertebrate families based on their tolerance to organic pollution, while the ASPT provides a water quality measure independent of taxon richness. The EPT index focuses on the presence of *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, and *Trichoptera*, which are highly sensitive to pollution. The Shannon-Weaver diversity index evaluates both species richness and the evenness in the distribution of individuals.

Macroinvertebrate collection employs qualitative, quantitative, and semi-quantitative methods, ensuring the representativeness and comparability of samples. Measurable variables include taxonomic, ecological, and physicochemical aspects of water, providing a detailed understanding of the structure and dynamics of macroinvertebrate communities.

The design of monitoring networks with standardized protocols is crucial for comparing results across studies and regions. These protocols ensure the consistency and reliability of data, fundamental for decision-making in environmental management.

Macroinvertebrates not only provide an integrated evaluation of water quality but also foster community participation through training and environmental education programs. However, challenges such as the natural variability of ecosystems and the need for precise taxonomic identification are acknowledged.

In conclusion, macroinvertebrates are valuable tools for monitoring water quality. Their use, combined with biological indices and standardized sampling methods, provides a solid foundation for the management and conservation of water resources, promoting sustainable and equitable management of aquatic ecosystems.

**Keywords:** Macroinvertebrates, Bioindicators, Water quality

## Introducción

La evaluación y el monitoreo de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce representa uno de los pilares fundamentales para la gestión sostenible y la conservación efectiva de los recursos hídricos (Vörösmarty et al., 2010). En un contexto donde la presión antropogénica sobre los ecosistemas acuáticos continúa aumentando, la necesidad de métodos confiables y eficientes para evaluar las necesidades y condiciones del agua se ha vuelto cada vez más crítica (Carpenter et al., 1998). Esta evaluación abarca el análisis de diversos indicadores físicos, químicos y biológicos (Chapman, 2021), siendo estos últimos, y particularmente el empleo de macroinvertebrados, una de las herramientas más valiosas y ampliamente adoptadas. La historia de los macroinvertebrados como indicadores biológicos se remonta a más de un siglo en Europa (Springer, 2013a).

Los macroinvertebrados acuáticos comprenden un grupo diverso de organismos que habitan en el fondo de ecosistemas lóticos (ríos, arroyos) y lénticos (lagos, lagunas), encontrándose adheridos a diversos sustratos como vegetación acuática, troncos y rocas sumergidas. Sus poblaciones están constituidas principalmente por platelmintos, insectos, moluscos y crustáceos, y se caracterizan por poseer un tamaño que oscila entre 0.5mm y 5.0mm, lo que facilita su identificación visual directa (Roldán-Pérez, 2016a). Estos organismos se pueden clasificar, según su tolerancia a la contaminación, en grupos sensibles (intolerantes), moderadamente tolerantes y tolerantes (Hilsenhoff, 1987), lo que permite inferir las condiciones del agua a partir de su presencia y abundancia. La definición de los macroinvertebrados como bioindicadores radica en su capacidad para reflejar las condiciones ambientales del ecosistema a través de su presencia, abundancia y composición comunitaria, destacando especialmente los macroinvertebrados bentónicos por su marcada sensibilidad a las alteraciones ambientales, facilidad de muestreo y amplia distribución en diversos hábitats acuáticos (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992).

La relevancia de estos organismos como bioindicadores reside en su capacidad para proporcionar una evaluación integrada de la calidad del agua. A diferencia de los análisis fisicoquímicos tradicionales, que ofrecen una visión instantánea y puntual de las condiciones del agua, las comunidades de macroinvertebrados actúan como registros biológicos que integran los efectos acumulativos de los contaminantes y las perturbaciones ambientales a lo largo del tiempo, permitiendo así una comprensión más completa y holística del estado ecológico del ecosistema

acuático (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992). Es importante señalar que el presente estudio se centra en la evaluación de la calidad del agua dulce, la cual se define como aquella que naturalmente posee bajas concentraciones de sales disueltas, generalmente por debajo de 1000 mg/L de sólidos disueltos totales (R. G. Wetzel, 2024), y cuya disponibilidad es crucial para el sostenimiento de la vida terrestre y acuática en los continentes. La comprensión de la calidad del agua dulce, en contraste con otros tipos de agua como las aguas marinas (con una salinidad promedio de 35 g/L) o las aguas salobres (con salinidades intermedias), es fundamental para abordar los desafíos específicos de conservación en estos ecosistemas particulares.

La diversidad taxonómica de los macroinvertebrados, junto con la especificidad de sus requerimientos ambientales, ha permitido el desarrollo de diversos índices biológicos, herramientas cuantitativas que emplean la composición y abundancia de las comunidades biológicas acuáticas para evaluar la calidad ecológica de los ecosistemas hídricos (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992). Estos índices funcionan bajo el principio de la sensibilidad diferencial de los taxones a las alteraciones ambientales; diferentes grupos de macroinvertebrados exhiben distintos grados de tolerancia a factores de estrés como la contaminación orgánica, la toxicidad o las modificaciones del hábitat (Hilsenhoff, 1987). En la práctica, a cada taxón identificado en un muestreo se le asigna una puntuación que refleja su sensibilidad, siendo las puntuaciones más elevadas correspondientes a los taxones más sensibles y las más bajas a los tolerantes (Armitage et al., 1983). El cálculo del índice implica la aplicación de una fórmula que combina las puntuaciones de los taxones presentes, a menudo ponderada por su abundancia o riqueza taxonómica, para generar un valor numérico que se interpreta mediante escalas predefinidas de calidad ecológica (Pavluk et al., 2000)

La utilidad de los índices biológicos basados en macroinvertebrados radica en su capacidad para ofrecer un monitoreo costo-efectivo de la calidad del agua en comparación con análisis fisicoquímicos exhaustivos, permitiendo la evaluación a largo plazo y en múltiples sitios de las extensas redes hídricas (Hellowell, 1986) Estos índices proporcionan una integración de las condiciones ambientales al reflejar los efectos acumulativos de las perturbaciones a lo largo del tiempo, ofreciendo una perspectiva más global de la salud del ecosistema frente a la instantánea que proporcionan los parámetros fisicoquímicos (Poulton et al., 2015). Además, son indicadores de estrés múltiple, respondiendo a la combinación de diversas presiones que afectan los ecosistemas acuáticos colombianos, como la contaminación, la deforestación y las alteraciones

hidrológicas (Springer, 2013b). Su aplicación permite la evaluación de la efectividad de las medidas de gestión y restauración implementadas en los cuerpos hídricos, evidenciando mejoras o deterioros en la calidad ecológica a través de cambios en los valores del índice (Arjen Y. Hoekstra et al., 2011). Dada la alta biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos en Colombia, muchos de ellos endémicos, estos índices contribuyen a identificar áreas de valor ecológico y a evaluar el impacto de las actividades humanas en estas comunidades únicas, apoyando las estrategias de conservación (Roldan, 2003). Finalmente, los índices biológicos pueden integrarse en el marco regulatorio y las políticas ambientales colombianas para establecer criterios de calidad ecológica y evaluar el cumplimiento de normativas (Subodh & Otto, 1998). Entre los índices destacados y validados para la evaluación de la calidad ecológica en sistemas fluviales se encuentran el índice BMWP (Biological Monitoring Working Party) (Armitage et al., 1983) y el IBF (Índice Biológico de Familias), herramientas que han demostrado ser particularmente útiles en la toma de decisiones relacionadas con la conservación de ecosistemas acuáticos, proporcionando una base científica sólida para el desarrollo de estrategias de protección y restauración del recurso hídrico.

## **1. Desarrollo del estado del arte**

Para el desarrollo de este estado del Arte se desarrolló una búsqueda bibliográfica y selección de artículo, libros tanto en lengua castellana como en lengua extranjera, estos fueron seleccionados de tal manera que aportaran sus conocimientos en esta investigación, con lo cual le dará un contexto a la investigación.

### **1.1 Metodología de búsqueda**

La presente investigación se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura científica, para la identificación, selección y síntesis de información relevante. Se emplearon diversas bases de datos reconocidas por su amplia cobertura y calidad de publicaciones académicas, incluyendo:

- (i) Scielo: Seleccionada por su extenso catálogo de publicaciones en ciencias ambientales, biología y ecología, áreas directamente relacionadas con el estudio de los macroinvertebrados como bioindicadores.
- (ii) Scopus: Elegida por su robusto sistema de indexación y herramientas de análisis bibliométrico, permitiendo una búsqueda exhaustiva y la identificación de tendencias en la investigación.
- (iii) Google Académico: Utilizada como herramienta complementaria para ampliar la búsqueda y localizar literatura gris (tesis, informes, etc.) que pudiera aportar información valiosa y actualizada.
- (iv) Google Books: Utilizado como medio gratuito de lectura para algunos títulos de interés que aporte valiosa información de estudios en Colombia

### **1.2 Estrategia de Búsqueda y Palabras Clave**

La estrategia de búsqueda se diseñó para capturar la literatura más relevante y actualizada sobre el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Se emplearon las siguientes palabras clave en idioma inglés, consideradas fundamentales para delimitar el alcance de la búsqueda:

- (i) "Macroinvertebrates": Término central que define el grupo de organismos de interés en la investigación.
- (ii) "Bioindicators" OR "Biological Indicators": Palabras clave que especifican el rol de los macroinvertebrados en la evaluación de la calidad del agua.
- (iii) "Water Quality": Término que delimita el objeto de estudio en relación con los ecosistemas acuáticos.
- (iv) "Freshwater Ecosystems": Palabras clave que especifican el tipo de ecosistemas de interés.
- (v) "Assessment" OR "Monitoring" OR "Evaluation": Términos que describen el proceso de análisis de la calidad del agua.

Estas palabras clave se combinaron utilizando operadores booleanos (AND, OR) para refinar la búsqueda y obtener resultados más precisos. Se realizaron varias iteraciones de la búsqueda, ajustando las combinaciones de palabras clave para optimizar la recuperación de información. Algunas de las ecuaciones de búsqueda utilizadas fueron:

- "Macroinvertebrates" AND "Bioindicators" AND "Water Quality" AND "Freshwater Ecosystems"
- "Macroinvertebrates" AND ("BMWP/Col ") AND "Water Quality"
- "Macroinvertebrates" AND "Biological Indicators" AND "Freshwater" AND ("Rivers" OR "Lakes")

### ***1.2.1 Criterios de selección de artículos y documentos***

Los documentos seleccionados cumplieron con los siguientes criterios:

- Pertinencia temática: solo se incluyeron artículos, capítulos de libros y documentos científicos que abordaran directa o indirectamente el uso de macroinvertebrados como bioindicadores en cuerpos de agua dulce.
- Rigurosidad científica: se priorizaron fuentes revisadas por pares o producidas por instituciones científicas reconocidas.
- Actualidad: se dio preferencia a documentos publicados en los últimos 15 años (2008–2024), aunque se consideraron también textos clásicos que fundamentan el desarrollo

histórico del tema (como Armitage et al., 1983; Hilsenhoff, 1987; (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992)).

- Aplicabilidad al contexto latinoamericano y colombiano: se valoraron estudios realizados en ecosistemas tropicales, especialmente en Colombia y América Latina, para asegurar la contextualización del tema.
- Accesibilidad y disponibilidad: se seleccionaron fuentes de acceso libre o disponibles a través de bibliotecas universitarias y bases institucionales como el CRAI de la Universidad Santo Tomas.

### **1.2.2 Inclusión de literatura en lengua extranjera**

Se incorporaron un total de 12 artículos y libros en lengua extranjera (principalmente en inglés). La inclusión de estas fuentes se justificó por las siguientes razones:

1. Avance del conocimiento científico: gran parte de la producción científica en ecología acuática y bioindicadores proviene de países como Estados Unidos, Reino Unido, Alemania y Canadá, por lo que acceder a literatura en inglés permitió ampliar el panorama teórico y metodológico.
2. Validez y reconocimiento internacional: muchos de los métodos, índices e investigaciones pioneras han sido publicados originalmente en inglés, como el índice BMWP (Biological Monitoring Working Party) y el manual (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992), fundamentales para este trabajo.
3. Actualización científica: en revistas como *Freshwater Biology*, *Ecological Indicators* o *Hydrobiologia* se publican investigaciones de vanguardia que no cuentan con traducción al español, por lo que fue necesario trabajar con fuentes en su idioma original.

### **1.3 Evaluación de la Calidad del Agua**

Tras aplicar los filtros anteriores, se seleccionaron más de 30 fuentes relevantes, entre artículos científicos, libros, manuales técnicos y revisiones sistemáticas. Estos documentos proporcionaron la base teórica y metodológica para desarrollar una visión integral sobre el uso de macroinvertebrados como bioindicadores, los diferentes índices biológicos aplicables

(BMWP/Col, ASPT, EPT, Shannon-Weaver), los métodos de recolección (cualitativos, cuantitativos, semi-cuantitativos) y los protocolos estandarizados de monitoreo en ecosistemas acuáticos.

La evaluación de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce se ha realizado tradicionalmente con base a los análisis fisicoquímicos y bacteriólogos, sin embargo, a lo largo de los años muchos países han aceptado la inclusión de las comunidades acuáticas como un hecho fundamental para la evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos (Roldan, 2003).

Los macroinvertebrados bentónicos han emergido como herramientas biológicas excepcionales para esta tarea, destacándose por su estrecha relación con el sustrato y su marcada sensibilidad a las alteraciones ambientales (Barbour et al., 1998). La naturaleza sésil o de movilidad limitada de estos organismos les permite integrar las condiciones ambientales a lo largo de su ciclo vital, proporcionando así una perspectiva más comprehensiva de la calidad del agua en comparación con los análisis fisicoquímicos convencionales.

La diversidad taxonómica de los macroinvertebrados bentónicos es notable, abarcando múltiples grupos como insectos (*Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera*, *Diptera*), moluscos, crustáceos y anélidos. Cada grupo taxonómico exhibe requerimientos ecológicos específicos y diferentes niveles de tolerancia a los contaminantes, lo que los convierte en excelentes indicadores de diversos tipos de perturbaciones ambientales. La presencia de taxa sensibles como los EPT (*Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera*) se asocia generalmente con aguas de alta calidad, mientras que la predominancia de taxa tolerantes como ciertos dípteros suele indicar condiciones de deterioro ambiental (Hilsenhoff, 1987). Esta diferenciación en la sensibilidad permite una evaluación detallada de la calidad del agua y el estado ecológico del ecosistema.

#### **1.4 Biomonitoreo**

El biomonitoreo mediante macroinvertebrados bentónicos ha demostrado ser una herramienta eficaz y económicamente viable para la evaluación continua de ecosistemas acuáticos. (Roldan, 2003) realizaron una revisión exhaustiva de la literatura científica, destacando la utilidad de los índices biológicos basados en estos organismos para evaluar la calidad de ríos y arroyos. Los programas de biomonitoreo que utilizan macroinvertebrados pueden detectar cambios sutiles

en la calidad del agua que podrían pasar desapercibidos en análisis químicos rutinarios, proporcionando así una alerta temprana de potenciales problemas ambientales.

#### ***1.4.1 Diseño de Redes de Monitoreo***

La implementación efectiva de redes de monitoreo requiere una metodología estandarizada y científicamente robusta. (Barbour et al., 1998) propusieron protocolos estandarizados para el muestreo y análisis de macroinvertebrados, facilitando la comparación de resultados entre diferentes estudios y regiones. Estos protocolos han sido fundamentales para el establecimiento de redes de monitoreo coherentes y comparables a diferentes escalas espaciales y temporales. La selección de sitios de muestreo, la frecuencia de recolección de datos y los métodos de análisis deben diseñarse cuidadosamente para asegurar la representatividad y confiabilidad de los resultados.

#### ***1.4.2 Soporte a la Toma de Decisiones***

La selección e implementación de índices biológicos apropiados es crucial para la interpretación efectiva de los datos obtenidos y su posterior aplicación en la toma de decisiones. Entre los índices más ampliamente utilizados se encuentran el BMWP (Biological Monitoring Working Party), el IBF (Índice Biológico de Familias), el ASPT (Average Score Per Taxon) y ABI, que es un índice creado para sistemas andinos de montaña.

Estos índices asignan valores numéricos a cada taxón basándose en su tolerancia a la contaminación, permitiendo calcular un valor global que refleja la calidad del agua (Armitage et al., 1983). La información generada a través de estos índices proporciona una base científica sólida para la toma de decisiones en la gestión ambiental y la implementación de medidas de conservación y restauración.

Además, la integración de los datos de macroinvertebrados con otros indicadores ambientales y socioeconómicos permite una aproximación más holística a la gestión de los recursos hídricos. Esta información integrada puede utilizarse para:

- Establecer objetivos de calidad del agua
- Evaluar la efectividad de las medidas de gestión implementadas
- Identificar áreas prioritarias para la conservación

- Desarrollar estrategias de restauración ecológica
- Fundamentar políticas de protección ambiental

La robustez y versatilidad de los macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores continúa ampliando sus aplicaciones en la evaluación y gestión de ecosistemas acuáticos, consolidándose como una herramienta indispensable para la conservación de los recursos hídricos a nivel global.

Los bioindicadores también permiten identificar episodios de toxicidad aguda que, en muchos casos, pasan desapercibidos en los análisis físicoquímicos convencionales. No obstante, presentan ciertas restricciones, ya que no siempre son efectivos para evaluar la calidad del agua para el consumo humano, pues pueden no revelar la existencia de contaminantes químicos nocivos o microorganismos patógenos que representan un riesgo para la salud de las personas (Springer, 2013a).

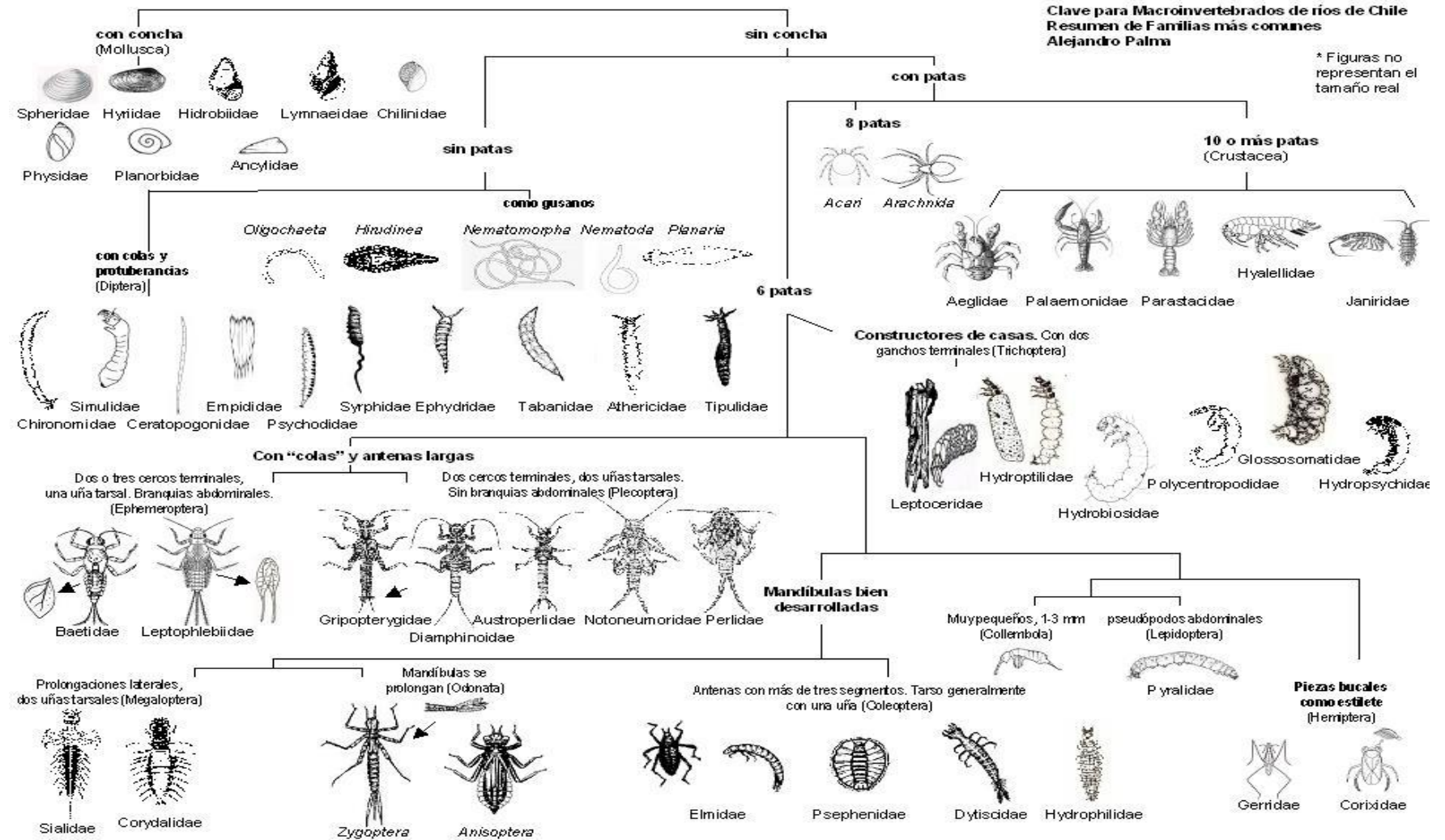
### ***1.4.3 Macroinvertebrados de referencia***

La identificación precisa de los macroinvertebrados es crucial para utilizarlos eficazmente como bioindicadores de la calidad del agua. Para ello, es necesario contar con organismos de referencia que permitan la correcta clasificación de estos grupos.

En el caso de los macroinvertebrados, existen guías y claves taxonómicas que facilitan su identificación a nivel de familia o incluso de género (Figura 1). Estas herramientas recopilan las características morfológicas clave, como la forma del cuerpo, el número de patas, la presencia de branquias, entre otros (Roldán-Pérez, 2016b). Esta herramienta es esencial para estandarizar el proceso de identificación, especialmente en estudios de biomonitoreo donde la sensibilidad diferencial de cada taxón a la contaminación determina su valor como indicador (Hilsenhoff, 1987).

La figura 1 ilustra la diversidad de macroinvertebrados, desde moluscos (Mollusca) hasta insectos como Efemerópteros (*Ephemeroptera*) y Coleópteros (*Coleoptera*), resaltando rasgos clave como branquias abdominales, uñas tarsales o mandíbulas desarrolladas. Su diseño sigue protocolos ampliamente utilizados en la literatura científica (Merritt & Cummins, 1996) (Barbour et al., 1998) y se adapta a contextos latinoamericanos, como lo demuestran trabajos similares en Chile (Invertebrados Acuáticos Alejandro Palma, 2013) y Colombia (Roldan, 2003). La imagen no solo facilita la labor de campo, sino que también refuerza la reproducibilidad de los resultados en redes de monitoreo estandarizadas.

Figura 1 Reconocimiento Taxonomico para la identificación



Nota. Adaptado de (Invertebrados Acuáticos Alejandro Palma, 2013)

La disponibilidad de estos organismos de referencia, junto con el desarrollo de índices bióticos, ha sido fundamental para estandarizar y mejorar la precisión de los estudios basados en macroinvertebrados como bioindicadores. Esto ha permitido comparar resultados entre diferentes estudios y regiones, lo que a su vez ha contribuido a la consolidación de estos grupos como herramientas confiables para la evaluación de la calidad del agua (David M. Rosenberg & Vincent H. Resh, 1992).

Además, la integración de los organismos de referencia en programas de capacitación y educación ambiental ha sido crucial para fomentar el uso de los macroinvertebrados y las algas como bioindicadores. Estos programas han permitido que técnicos, estudiantes e incluso miembros de la comunidad adquieran las habilidades necesarias para identificar y monitorear estos organismos, lo que ha fortalecido la participación de las partes interesadas en la gestión de los recursos hídricos (Armitage et al., 1983)

La disponibilidad de organismos de referencia y el desarrollo de índices bióticos han sido fundamentales para consolidar el uso de macroinvertebrados y algas como bioindicadores fiables de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Estos recursos han permitido estandarizar los procesos de identificación y evaluación, lo que a su vez ha contribuido a mejorar la precisión y comparabilidad de los estudios realizados en diferentes regiones. Además, la integración de estos organismos de referencia en programas de capacitación y educación ambiental ha sido crucial para fomentar su uso y promover la participación de las comunidades en la gestión de los recursos hídricos.

## 2. Metodología y parámetros para recolectar macroinvertebrados acuáticos

Existen diversos métodos o formas para recolectar macroinvertebrados acuáticos, en gran medida la selección de la metodología que se use, va depender de según el tipo de estudio, el cuerpo de agua, hábitat de interés e incluso el presupuesto disponible (Ramírez, 2010).

Una de las mejores referencias para el estudio de los macroinvertebrados como bioindicadores de calidad de agua han sido estudiados mediante diversos métodos especializados según el tipo de ecosistema acuático. (Richard W. Merritt et al., 2008), en su obra fundamental "An Introduction to the Aquatic Insects of North America", establecieron protocolos estandarizados de muestreo y claves taxonómicas detalladas, demostrando la especial utilidad de órdenes como *Ephemeroptera* y *Trichoptera* como indicadores de aguas limpias. Para ecosistemas fluviales, (Hauer & Resh, 2007) desarrollaron en "Methods in Stream Ecology" técnicas específicas como el uso de redes Surber en hábitats rocosos, encontrando que la heterogeneidad del sustrato es determinante en la distribución de los organismos. En humedales, (Akhter & Singh Braich, 2018) propusieron en sus investigaciones el empleo de dragas Eckman, evidenciando la relación directa entre la vegetación acuática y la riqueza de macroinvertebrados. Los estudios limnológicos de (R. Wetzel & Likens, 2000) en lagos destacaron la importancia de considerar la estratificación térmica al muestrear, particularmente en cuerpos de agua eutrofizados. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU, a través del manual de (Barbour et al., 1998) sistematizó los protocolos de biomonitoreo rápido, validando la eficacia de redes tipo D pero advirtiendo sobre sus limitaciones en sedimentos finos. Complementariamente, (Ramírez, 2010) realizó un análisis comparativo de metodologías, concluyendo que los enfoques semicuantitativos ofrecen el mejor equilibrio entre precisión y practicidad para estudios en ecosistemas tropicales. Estos trabajos en conjunto proporcionan un marco metodológico robusto para la evaluación de la calidad del agua mediante macroinvertebrados en diversos ambientes acuáticos.

Una vez consultados estas referencias se debe tener en cuenta el diseño del estudio y diferencia que es lo que se va a realizar, puesto que existen diversos estudios los cuales son cualitativos son generalmente preferidos cuando el objetivo es caracterizar la biodiversidad de un lugar en particular (Ramírez, 2010). Las caracterizaciones cualitativas generalmente no son apropiadas para hacer comparaciones entre localidades o entre fechas de muestreo, Para estos casos lo ideal es ir a una metodología cuantitativa el objetivo de hacer un trabajo cuantitativo es

minimizar variaciones debido al método y enfatizar cambios que resulten de variaciones en el ambiente. Se pueden hacer nuestros cuantitativos por área, con repeticiones suficientes para describir la variabilidad del sistema. O bien, hacer muestreos semicuantitativos manteniendo constante el tiempo de muestreo (p. ej. 15 minutos por hábitat) y no el área (Ramírez, 2010).

## 2.1 Métodos para aguas poco profundas

Para garantizar una captura eficiente de macroinvertebrados en ambientes acuáticos poco profundos, se recomienda utilizar redes con una abertura de malla de 250 micrómetros o menor. Este tamaño de poro es ampliamente utilizado en estudios ecológicos y permite la retención de la mayoría de los taxa de interés, asegurando así una muestra representativa de la comunidad bentónica (Ramírez, 2010).

Los métodos **cuantitativos** para identificar macroinvertebrados en aguas superficiales permiten realizar evaluaciones rápidas sobre la diversidad y composición de estos organismos. Aunque no ofrecen mediciones exactas, son especialmente útiles para explorar diferentes ecosistemas acuáticos y establecer comparaciones sobre la calidad del agua.

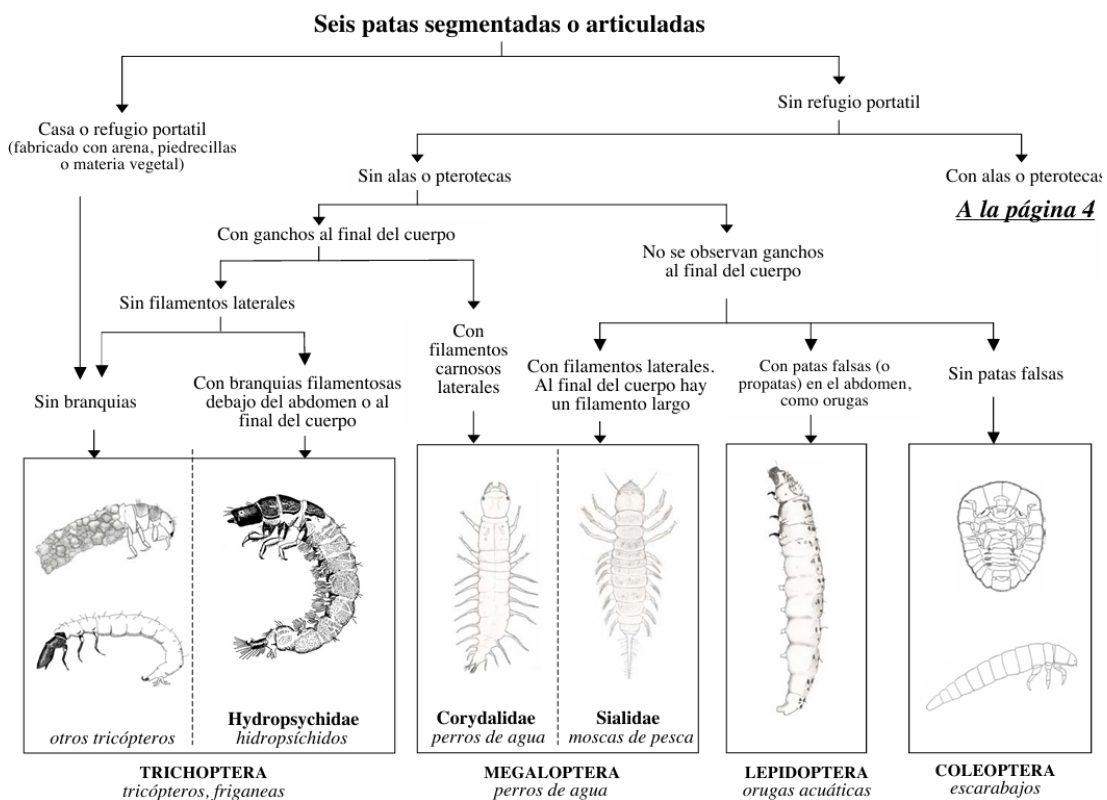
Para el muestreo, se utilizan principalmente redes especializadas como las redes tipo D (figura 2). El objetivo es capturar la mayor diversidad posible de especies, por lo que se pueden emplear varios tipos de redes. Las recolecciones directas son cruciales para capturar organismos fuertemente adheridos al sustrato, como las larvas de *Petrophila* y algunas especies de tricópteros (figura 3).

Las técnicas de muestreo varían según las condiciones del cuerpo de agua. En zonas con corriente, se coloca la red aguas abajo mientras se remueve el sustrato manualmente para desprender los macroinvertebrados. En áreas sin flujo, se introduce la red en el sustrato y se recolecta material del fondo. Posteriormente, se examinan cuidadosamente los especímenes capturados en la red (Ramírez, 2010).

**Figura 2** Red tipo D para muestreos de macroinvertebrados acuáticos



**Figura 3** Clasificación de macroinvertebrados de seis patas segmentadas (Stroud Water Research Center, n.d.)



Nota. Adaptado de (Stroud Water Research Center, n.d.)

Los métodos **cuantitativos** emplearían equipos como redes de Surber o tipo Hess (figura 4 y 5), diseñadas para muestrear áreas específicas del fondo acuático. Se puede adaptar una red tipo D para controlar el área de muestreo. Es fundamental usar el mismo tipo de red en cada recolección y considerar diferentes redes por hábitat.

En corrientes continuas, se utilizan redes Surber o tipo D removiendo el sustrato, mientras que en áreas sin flujo se usan redes como la Hess, generando una corriente manual para capturar

organismos. Los especímenes se preservan y procesan en laboratorio, expresando resultados por metro cuadrado.

Estos métodos cuantitativos requieren mayor procesamiento y capturan diferentes secciones de la comunidad bentónica, por lo que es crucial definir claramente los objetivos del estudio.

**En los estudios semi-cuantitativos** se reemplaza el factor área por tiempo o una combinación de ambos. Por ejemplo, muestrear un sitio durante una hora con red tipo D permite comparar esfuerzos de muestreo similares, siendo útil en biomonitoreo.

(Springer, 2013a) destacan que el muestreo varía según el operador y el tiempo, mientras que Stein *et al.* (2008) indican que diferentes redes pueden modificar hasta un 20% la composición de fauna encontrada.

**Figura 4** RED SURBER para recolección de macroinvertebrados (Redes Nagut, 2016)



**Figura 5** *Muestreador de Fondos Hess Stream*











### **Parámetros**

Los índices biológicos basados en macroinvertebrados permiten evaluar la calidad del agua de manera indirecta, al reflejar las respuestas de las comunidades de estos organismos a las alteraciones ambientales. Estos índices asignan valores a los diferentes taxa presentes en una muestra y los combinan para obtener un valor global que indica la calidad del ecosistema acuático.

### **Índice BMWP/Col**

El Índice Biológico de la Water Pollution adaptado a Colombia (BMWP/Col), ampliamente utilizado en América Latina según (Roldan, 2003) clasifica las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica. Las familias más sensibles, como Perlidae (*Plecoptera*) y Oligoneuriidae (*Ephemeroptera*), reciben puntuaciones más altas, mientras que familias tolerantes como Tubificidae (*Clitellata*) y Chironomidae (*Diptera*) obtienen valores más bajos.

**Tabla 1** Puntaje de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col. de acuerdo a los valores originales de BMWP

Familia	Puntaje	Foto
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10	
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9	
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelphusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8	
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohiphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7	
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limmichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6	
Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5	
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.	4	
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae	3	
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae.	2	
Tubificidae	1	

Nota. Adaptado de (Roldan, 2003) para Colombia

**Ejemplos:**

- **Familias (sensibles a la contaminación):**

Perlidae (*Plecoptera*): Puntuación de 10.

Oligoneuriidae (*Ephemeroptera*): Puntuación de 10

- **Familias con valores bajos (tolerantes a la contaminación):**

Tubificidae (*Clitellata*): Puntuación de 1.

Chironomidae (*Diptera*): Puntuación de 2.

Para obtener el valor total del BMWP/Col se realiza la suma de los valores de todas las familias presentes:  $10 + 10 + 2 + 1 = 23$ . Un valor alto una buena calidad del agua, ya que predominan las familias sensibles a la contaminación como se puede observar en la **tabla 2**.

**Tabla 2** Clasificación de las aguas, significado de acuerdo con el índice BMWP/Col.

Clase	Calidad	Valor	Significado
I	Buena	>150-101	Aguas muy limpias y limpias
II	Aceptable	61-100	Son evidentes algunos efectos de contaminación
III	Dudosa	36-61	Aguas contaminadas
IV	Critica	16-35	Aguas muy contaminadas
V	Muy Critica	<15	Aguas fuertemente contaminadas

Nota: Clasificación de aguas y significado de acuerdo con el puntaje índice BMWP/Col, ajustado y adoptado por "Roldan, 2003"(Cuitaco, n.d.)

### Índice ASPT (Average Score per-Taxon)

El Índice ASPT (Average Score Per Taxon) es una extensión del índice BMWP. Se calcula dividiendo la puntuación total del BMWP por el número de taxones presentes en la muestra. Este

índice proporciona una medida de la calidad del agua que no depende de la riqueza de taxones, lo que lo hace útil para comparar sitios con diferentes niveles de diversidad. Un valor alto del ASPT indica una comunidad de macroinvertebrados menos tolerante a la contaminación, lo que sugiere una mejor calidad del agua (López Mendoza et al., 2022)

**Ejemplo:**

Si en una muestra encontramos las mismas familias que en el ejemplo anterior, pero con los siguientes puntajes ASPT:

- *Ephemerellidae*: 8
- *Perlidae*: 9
- *Chironomidae*: 2
- *Tubificidae*: 1

El ASPT se calcularía como la suma de los productos de la abundancia relativa de cada taxón por su puntaje, dividido entre el número total de taxa. Un ASPT alto indicaría una buena calidad del agua, ya que predominan los taxa sensibles a la contaminación.

**El Índice EPT** se basa en la presencia y abundancia de tres órdenes de insectos acuáticos: *Ephemeroptera* (efímeras), *Plecoptera* (moscas de las piedras) y *Trichoptera* (frigáneas).

Estos grupos son ampliamente reconocidos por su sensibilidad a las alteraciones ambientales y la contaminación. En ecosistemas saludables, los EPT suelen ser dominantes, mientras que su ausencia o baja representación puede ser indicativa de degradación ambiental. Este índice es sencillo de aplicar y se ha utilizado extensamente en programas de monitoreo debido a su fuerte correlación con la calidad del agua. Además, la proporción de estos taxones dentro de la comunidad total puede proporcionar información sobre la magnitud y naturaleza de las perturbaciones ambientales (Lenat, 1988).

**El Índice de Diversidad de Shannon-Weaver**, desarrollado por Shannon (1948), ofrece una métrica más integral de la comunidad. Este índice considera tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos, proporcionando una medida comprehensiva de la diversidad ecológica.

Cada índice presenta ventajas y limitaciones específicas. Mientras algunos son fáciles de calcular, otros requieren identificación precisa de especies. La elección del índice dependerá de los objetivos específicos del estudio y las características del ecosistema acuático en evaluación.

## 2.2 Métodos para aguas profundas

Los ambientes acuáticos profundos, como zonas profundas de ríos, lagos y embalses, presentan desafíos particulares para el estudio de macroinvertebrados debido a las dificultades para acceder a sus sustratos blandos y fangosos (Ramírez, 2010). Para estos ecosistemas se han desarrollado técnicas especializadas que permiten obtener muestras representativas de las comunidades bentónicas. El método más utilizado es el de dragas bentónicas, equipos diseñados específicamente para recolectar sedimentos y los organismos asociados desde embarcaciones. Estas dragas, como se muestra en la Fig. 6, permiten obtener muestras cuantitativas de un área definida del fondo, preservando la estructura del sustrato durante la recolección (Barbour et al., 1998). Su funcionamiento óptimo depende del mecanismo de cierre durante la ascensión, siendo particularmente efectivas en fondos blandos aunque presentan limitaciones en sustratos rocosos o densamente vegetados (Ramírez, 2010)

**Figura 6** *Draga para obtener muestras cuantitativas de un área definida del fondo*



*Nota. Draga. foto (Ramírez, 2010)*

Otra técnica valiosa para estos ambientes es el uso de sustratos artificiales, que consisten en canastas con rocas o paquetes de hojas que se anclan al fondo para ser colonizados por la fauna bentónica. Es fundamental que estos sustratos imiten las características del hábitat natural para evitar sesgos en la composición de especies recolectadas (Akhter & Singh Brraich, 2018) En ambientes profundos, estos dispositivos deben fijarse cuidadosamente a estructuras estables como orillas o boyas para facilitar su recuperación y minimizar pérdidas por efecto de las corrientes (Ramírez, 2010).

### 3. Resultados Relevantes e impacto

Los resultados de investigaciones sobre macroinvertebrados como bioindicadores revelan un impacto significativo en la gestión ambiental y la conservación de ecosistemas acuáticos. Diversos estudios han demostrado que estos organismos proporcionan información crucial sobre la salud de los sistemas hídricos, superando las limitaciones de los análisis fisicoquímicos tradicionales (Barbour et al., 1998).

El impacto científico y práctico se evidencia en múltiples dimensiones. En primer lugar, los índices biológicos como BMWP/Col y EPT han permitido desarrollar métodos más integrales para evaluar la calidad del agua. Estos índices no solo miden la contaminación en un momento específico, sino que ofrecen una perspectiva histórica de las alteraciones ambientales, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones en conservación (Armitage et al., 1983).

La investigación ha demostrado que la presencia y abundancia de ciertos macroinvertebrados pueden revelar información detallada sobre la salud del ecosistema. Por ejemplo, los órdenes *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera* (EPT) son considerados bioindicadores de alta sensibilidad, cuya presencia sugiere condiciones de agua prístina (Lenat, 1988).

El impacto metodológico es igualmente relevante. Los protocolos estandarizados desarrollados por investigadores como (Barbour et al., 1998) han facilitado la comparación de datos entre diferentes regiones y momentos, permitiendo el desarrollo de redes de monitoreo más robustas y coherentes.

Desde una perspectiva socioeconómica, estos estudios han contribuido significativamente a:

- Establecer objetivos de calidad del agua más precisos
- Fundamentar políticas de protección ambiental
- Identificar áreas prioritarias para conservación
- Diseñar estrategias efectivas de restauración ecológica

La versatilidad de los macroinvertebrados como bioindicadores ha ampliado su aplicación más allá de la evaluación ambiental, convirtiéndose en una herramienta educativa y de participación comunitaria en la gestión de recursos hídricos.

Los resultados más importantes destacan la capacidad de estos organismos para proporcionar una evaluación integrada y dinámica de la calidad del agua, superando los métodos tradicionales al ofrecer una visión holística de los ecosistemas acuáticos.

### 3.1 Variables medibles

Las variables taxonómicas incluyen la identificación y caracterización de los diferentes órdenes y familias de macroinvertebrados, con especial énfasis en grupos indicadores como *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera* (EPT), cuya presencia revela condiciones ecológicas específicas (Lenat, 1988). Esta taxonomía detallada permite evaluar la composición y diversidad de las comunidades bentónicas.

En el ámbito ecológico, se analizan variables como la abundancia, densidad poblacional y distribución de especies, utilizando índices como Shannon-Weaver para determinar la complejidad y salud del ecosistema (Barbour et al., 1998). Estos parámetros proporcionan información sobre la estructura y dinámica de las comunidades de macroinvertebrados.

Las variables de calidad del agua se miden a través de índices biológicos estandarizados. El índice BMWP/Col (Biological Monitoring Working Group) y el ASPT (Average Score Per Taxon) permiten cuantificar la tolerancia de diferentes familias a los contaminantes, ofreciendo una evaluación integral de la condición ambiental (Armitage et al., 1983).

Las características físicas y químicas del ambiente acuático también se consideran variables cruciales. Se registran parámetros como temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica, los cuales interactúan directamente con la presencia y distribución de los macroinvertebrados (Hilsenhoff, 1987).

Las variables morfológicas de los especímenes, incluyendo longitud corporal, estructuras adaptativas y características distintivas, proporcionan información adicional sobre las condiciones ambientales y la capacidad de adaptación de estos organismos (Merritt & Cummins, 1996).

Finalmente, las variables metodológicas de muestreo, como el área de recolección, tiempo de muestreo y tipo de red utilizada, aseguran la reproducibilidad y comparabilidad de los estudios, elementos fundamentales en la investigación científica sobre bioindicadores (Armitage et al., 1983)

Esta aproximación multivariada permite una comprensión holística de la salud de los ecosistemas acuáticos, convirtiendo a los macroinvertebrados en herramientas invaluable para el monitoreo ambiental.

#### 4. Delimitación del problema

La relevancia social de este enfoque radica en que la calidad del agua impacta directamente la salud y el bienestar de las comunidades locales. La contaminación del agua puede tener efectos adversos en la salud humana, la biodiversidad y la economía local. Por lo tanto, el monitoreo continuo de la calidad del agua utilizando bioindicadores es esencial para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas acuáticos (Lovejoy et al., 2019); (Lubchenco, 2018)

La delimitación del problema se estructura como una investigación crítica sobre la evaluación de ecosistemas de agua dulce, respondiendo a la creciente necesidad de métodos científicos precisos para monitorear la calidad ambiental (Barbour et al., 1998). El estudio se circunscribe a ecosistemas de agua dulce, específicamente ríos, arroyos, humedales y lagos, considerando la variabilidad temporal de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos (Armitage et al., 1983). Se busca comprender la dinámica ecológica más allá de mediciones puntuales, a través de la identificación taxonómica de macroinvertebrados (Merritt & Cummins, 1996), el desarrollo de índices biológicos validados y la evaluación de la sensibilidad de diferentes taxones a contaminantes (Hilsenhoff, 1987). Se analizará la capacidad bioindicadora de estos organismos, abordando limitaciones como la variabilidad en técnicas de muestreo, la necesidad de protocolos estandarizados y los desafíos en la identificación taxonómica precisa.

La investigación se fundamenta en la premisa de que los macroinvertebrados proporcionan una evaluación integral de la calidad del agua, superando los métodos fisicoquímicos tradicionales (Lenat, 1988). El estudio busca desarrollar métodos comprehensivos de monitoreo ambiental, generar herramientas para la gestión de recursos hídricos y contribuir a la conservación de ecosistemas acuáticos (Díaz et al., 2019).

Sin embargo, se reconocen limitaciones como la complejidad en la interpretación de índices biológicos, la variabilidad natural de los ecosistemas acuáticos y la necesidad de integración de múltiples indicadores. La investigación responde a la urgente necesidad de comprender y proteger los ecosistemas de agua dulce frente al creciente impacto antropogénico, utilizando macroinvertebrados como centinelas ecológicos (Laurance, 2013). Esta delimitación proporciona un marco riguroso para abordar la complejidad de los sistemas acuáticos, reconociendo tanto las potencialidades como las limitaciones de los macroinvertebrados como bioindicadores.

#### 4.1 Parámetros y características de la muestra documental

En este Estado del arte, se aborda el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Los macroinvertebrados acuáticos, que incluyen insectos (como *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera* y *Diptera*), moluscos, crustáceos y anélidos, son organismos que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos y tienen requerimientos ambientales específicos y diferentes niveles de tolerancia a los contaminantes.

Esta diversidad taxonómica permite utilizar diversos índices biológicos para evaluar la calidad del agua. Entre los índices biológicos más destacados se encuentran el BMWP/Col, que clasifica las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica, y el ASPT (Average Score Per Taxon), que proporciona una medida de la calidad del agua independiente de la riqueza de taxones. También se menciona el índice EPT, basado en la presencia y abundancia de *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera*, y el índice de diversidad de Shannon-Weaver, que considera tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos. Para la recolección de macroinvertebrados, se utilizan métodos cualitativos, cuantitativos y semi-cuantitativos. Los métodos cualitativos permiten evaluaciones rápidas sobre la diversidad y composición de los macroinvertebrados, mientras que los métodos cuantitativos, que emplean redes tipo Surber o Hess, garantizan la representatividad de la muestra al muestrear áreas específicas del fondo acuático.

Los métodos semi-cuantitativos combinan aspectos de ambos enfoques, manteniendo constante el tiempo de muestreo. Las variables medibles en estos estudios incluyen aspectos taxonómicos, como la identificación y caracterización de órdenes y familias de macroinvertebrados; ecológicos, como la abundancia, densidad poblacional y distribución de especies; y de calidad del agua, como la temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica. También se consideran variables morfológicas de los especímenes y metodológicas de muestreo, asegurando la reproducibilidad y comparabilidad de los estudios. El documento destaca la importancia de los protocolos estandarizados para el diseño de redes de monitoreo y el soporte a la toma de decisiones. Los índices biológicos proporcionan una base científica sólida para fundamentar políticas de protección ambiental y estrategias de restauración ecológica. Además, los macroinvertebrados ofrecen una evaluación integrada de la calidad del agua, superando las

limitaciones de los análisis físicoquímicos tradicionales, y fomentan la participación comunitaria a través de programas de capacitación y educación ambiental.

Los macroinvertebrados son herramientas clave para el monitoreo ambiental y la gestión sostenible de los recursos hídricos, proporcionando una comprensión holística de la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

## 4.2 Enfoque epistemológico

En el presente Estado del arte, se aborda el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Los macroinvertebrados acuáticos, que incluyen insectos (como *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera* y *Diptera*), moluscos, crustáceos y anélidos, son organismos que habitan en el fondo de los ecosistemas acuáticos y tienen requerimientos ambientales específicos y diferentes niveles de tolerancia a los contaminantes (Barbour et al., 1998). Esta diversidad taxonómica permite utilizar diversos índices biológicos para evaluar la calidad del agua.

Entre los índices biológicos más destacados se encuentran el BMWP/Col, que clasifica las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica, y el ASPT (Average Score Per Taxon), que proporciona una medida de la calidad del agua independiente de la riqueza de taxones (Armitage et al., 1983). El índice BMWP/Col asigna puntuaciones altas a las familias más sensibles, como Perlidae (*Plecoptera*) y Oligoneuriidae (*Ephemeroptera*), y puntuaciones bajas a las familias más tolerantes, como Tubificidae (*Clitellata*) y Chironomidae (*Diptera*). La suma de las puntuaciones de todas las familias presentes en una muestra proporciona el valor total del índice BMWP/Col, que se utiliza para determinar la calidad del agua. Un valor alto indica una buena calidad del agua, mientras que un valor bajo sugiere contaminación. Por otro lado, el índice ASPT se calcula dividiendo la puntuación total del BMWP por el número de taxones presentes en la muestra, proporcionando una medida de la calidad del agua que no depende de la riqueza de taxones. Un valor alto del ASPT indica una comunidad de macroinvertebrados menos tolerante a la contaminación, lo que sugiere una mejor calidad del agua.

El índice EPT se basa en la presencia y abundancia de tres órdenes de insectos acuáticos: *Ephemeroptera* (efímeras), *Plecoptera* (perlas) y *Trichoptera* (frigáneas). Estos órdenes son conocidos por su sensibilidad a la contaminación, por lo que su presencia en un cuerpo de agua

indica una buena calidad del agua (Lenat, 1988). El índice EPT se calcula como el porcentaje de individuos de estos órdenes en relación con el total de macroinvertebrados recolectados. Un alto porcentaje de EPT sugiere condiciones de agua prístina, mientras que un bajo porcentaje indica contaminación.

El índice de diversidad de Shannon-Weaver, también conocido como índice de Shannon-Wiener, es una medida de la diversidad biológica que considera tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos entre las especies (Shannon & Weaver, 1949). Se calcula utilizando la fórmula:

$$H = -\sum p_i * \ln(p_i)$$

donde ( $p_i$ ) es la proporción de individuos de la especie ( $i$ ) en la muestra. Un valor alto del índice de Shannon-Weaver indica una alta diversidad y una distribución equitativa de individuos entre las especies, lo que generalmente se asocia con un ecosistema saludable y estable.

Para la recolección de macroinvertebrados, se utilizan métodos cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos. Los métodos cualitativos permiten evaluaciones rápidas sobre la diversidad y composición de los macroinvertebrados, mientras que los métodos cuantitativos, que emplean redes tipo Surber o Hess, garantizan la representatividad de la muestra al muestrear áreas específicas del fondo acuático (Hauer & Resh, 2007). Los métodos semi-cuantitativos combinan aspectos de ambos enfoques, manteniendo constante el tiempo de muestreo (Ramírez, 2010).

Las variables medibles en estos estudios incluyen aspectos taxonómicos, como la identificación y caracterización de órdenes y familias de macroinvertebrados; ecológicos, como la abundancia, densidad poblacional y distribución de especies; y de calidad del agua, como la temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica (Hilsenhoff, 1987). También se consideran variables morfológicas de los especímenes y metodológicas de muestreo, asegurando la reproducibilidad y comparabilidad de los estudios (Armitage et al., 1983) El diseño de redes de monitoreo requiere protocolos estandarizados para el muestreo y análisis de macroinvertebrados. Estos protocolos son fundamentales para la comparación de resultados entre diferentes estudios y regiones (Barbour et al., 1998). Además, los índices biológicos proporcionan una base científica sólida para fundamentar políticas de protección ambiental y estrategias de restauración ecológica.

Los macroinvertebrados ofrecen una evaluación integrada de la calidad del agua, superando las limitaciones de los análisis fisicoquímicos tradicionales. Además, fomentan la participación

comunitaria a través de programas de capacitación y educación ambiental, promoviendo una gestión sostenible de los recursos hídricos (Armitage et al., 1983).

Es importante reconocer la variabilidad natural de los ecosistemas acuáticos y cómo puede afectar los resultados de los estudios. La identificación precisa de los macroinvertebrados es crucial y puede presentar desafíos, por lo que es necesario contar con organismos de referencia y claves taxonómicas (Lenat, 1988). Además, la integración de múltiples indicadores ambientales y socioeconómicos es esencial para una gestión holística de los recursos hídricos.

## 5. Discusión

El uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce ha demostrado ser una herramienta eficaz y confiable para la evaluación ambiental. Los resultados obtenidos en este estudio confirman la relevancia de estos organismos en la monitorización de la salud de los ecosistemas acuáticos.

Los índices biológicos utilizados, como el BMWP/Col, ASPT, EPT y el índice de diversidad de Shannon-Weaver, proporcionan una evaluación integral de la calidad del agua. El índice BMWP/Col, al clasificar las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica, permite identificar rápidamente las condiciones del agua. Un valor alto en este índice indica una buena calidad del agua, mientras que un valor bajo sugiere la presencia de contaminantes. Este enfoque es particularmente útil en regiones como Colombia, donde la adaptación del índice a las condiciones locales mejora su precisión y relevancia (Armitage et al., 1983)

El índice ASPT complementa al BMWP/Col al proporcionar una medida de la calidad del agua que no depende de la riqueza de taxones. Esto es crucial en ecosistemas con diferentes niveles de diversidad, ya que permite comparaciones más equitativas entre sitios. Un valor alto del ASPT indica una comunidad de macroinvertebrados menos tolerante a la contaminación, lo que sugiere una mejor calidad del agua (Barbour et al., 1998).

El índice EPT, basado en la presencia y abundancia de *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera*, es especialmente valioso debido a la alta sensibilidad de estos órdenes a la contaminación. La presencia de estos insectos acuáticos en un cuerpo de agua es un indicador claro de condiciones prístinas, mientras que su ausencia puede señalar problemas ambientales significativos (Lenat, 1988).

El índice de diversidad de Shannon-Weaver, que considera tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos, proporciona una visión más holística de la comunidad de macroinvertebrados. Un valor alto en este índice sugiere un ecosistema saludable y estable, con una distribución equitativa de individuos entre las especies (Shannon & Weaver, 1949).

Los métodos de muestreo cualitativos, cuantitativos y semi-cuantitativos utilizados en este estudio aseguran la representatividad y comparabilidad de las muestras. Los métodos cualitativos

permiten evaluaciones rápidas y exploratorias, mientras que los métodos cuantitativos, que emplean redes tipo Surber o Hess, garantizan una recolección sistemática y precisa de datos (Hauer & Resh, 2007). Los métodos semi-cuantitativos, que combinan aspectos de ambos enfoques, son particularmente útiles en estudios de biomonitoreo continuo (Ramírez, 2010).

Las variables medibles, como la identificación taxonómica, la abundancia y distribución de especies, y los parámetros fisicoquímicos del agua, proporcionan una comprensión detallada de la estructura y dinámica de las comunidades de macroinvertebrados. Estas variables son esenciales para interpretar los resultados de los índices biológicos y para desarrollar estrategias de gestión y conservación (Hilsenhoff, 1987).

La implementación de protocolos estandarizados para el diseño de redes de monitoreo es fundamental para la comparación de resultados entre diferentes estudios y regiones. Estos protocolos aseguran la consistencia y fiabilidad de los datos, lo que es crucial para la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental (Barbour et al., 1998).

Los resultados de este estudio destacan la importancia de los macroinvertebrados como bioindicadores en la evaluación de la calidad del agua. Estos organismos no solo proporcionan una evaluación integrada y dinámica de las condiciones ambientales, sino que también fomentan la participación comunitaria a través de programas de capacitación y educación ambiental. La integración de los datos de macroinvertebrados con otros indicadores ambientales y socioeconómicos permite una gestión más holística y sostenible de los recursos hídricos (Armitage et al., 1983).

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones y desafíos asociados con el uso de macroinvertebrados como bioindicadores. La variabilidad natural de los ecosistemas acuáticos puede afectar los resultados de los estudios, y la identificación precisa de los macroinvertebrados requiere experiencia y recursos adecuados. Además, la integración de múltiples indicadores es esencial para una evaluación completa y precisa de la calidad del agua (Lenat, 1988).

En conclusión, los macroinvertebrados son herramientas valiosas y efectivas para la monitorización de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce. Su uso en combinación con índices biológicos y métodos de muestreo estandarizados proporciona una base sólida para la gestión y conservación de los recursos hídricos. La participación comunitaria y la educación ambiental son componentes clave para el éxito de estos programas, asegurando una gestión sostenible y equitativa de los ecosistemas acuáticos.

## Conclusiones

El uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en ecosistemas de agua dulce es una herramienta eficaz y confiable para la evaluación ambiental. Los macroinvertebrados, debido a su sensibilidad a los cambios ambientales, proporcionan una evaluación integral de la salud de los ecosistemas acuáticos. Los índices biológicos como el BMWP/Col, ASPT, EPT y el índice de diversidad de Shannon-Weaver son fundamentales para esta evaluación, ya que permiten clasificar y medir la calidad del agua de manera precisa y detallada.

El índice BMWP/Col clasifica las familias de macroinvertebrados según su tolerancia a la contaminación orgánica, proporcionando una medida clara de la calidad del agua. El ASPT complementa este índice al ofrecer una medida independiente de la riqueza de taxones, lo que es crucial para comparar sitios con diferentes niveles de diversidad. El índice EPT, basado en la presencia de *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera*, es especialmente valioso debido a la alta sensibilidad de estos órdenes a la contaminación. El índice de diversidad de Shannon-Weaver, que considera tanto la riqueza de especies como la equitatividad en la distribución de individuos, proporciona una visión holística de la comunidad de macroinvertebrados.

Los métodos de muestreo cualitativos, cuantitativos y semi-cuantitativos aseguran la representatividad y comparabilidad de las muestras, permitiendo una evaluación precisa de la calidad del agua. Las variables medibles, que incluyen aspectos taxonómicos, ecológicos y fisicoquímicos del agua, son esenciales para interpretar los resultados de los índices biológicos y desarrollar estrategias de gestión y conservación.

El diseño de redes de monitoreo con protocolos estandarizados es crucial para la comparación de resultados entre diferentes estudios y regiones. Estos protocolos aseguran la consistencia y fiabilidad de los datos, fundamentales para la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental.

Los macroinvertebrados no solo proporcionan una evaluación integrada de la calidad del agua, sino que también fomentan la participación comunitaria a través de programas de capacitación y educación ambiental. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones y desafíos asociados con su uso, como la variabilidad natural de los ecosistemas y la necesidad de una identificación taxonómica precisa.

### **Recomendaciones**

1. Implementación de Programas de Monitoreo Continuo: Se recomienda establecer programas de monitoreo continuo utilizando macroinvertebrados como bioindicadores. Estos programas deben incluir muestreos regulares y el uso de índices biológicos estandarizados para evaluar la calidad del agua de manera sistemática.
2. Capacitación y Educación Ambiental: Es fundamental desarrollar programas de capacitación y educación ambiental para técnicos, estudiantes y miembros de la comunidad. Estos programas deben enfocarse en la identificación de macroinvertebrados y el uso de índices biológicos, promoviendo la participación comunitaria en la gestión de los recursos hídricos.
3. Desarrollo de Protocolos Estandarizados: Se debe promover el desarrollo y la implementación de protocolos estandarizados para el muestreo y análisis de macroinvertebrados. Estos protocolos deben ser adaptados a las condiciones locales y asegurar la comparabilidad de los resultados entre diferentes estudios y regiones.
4. Integración de Múltiples Indicadores: Para una evaluación más completa de la calidad del agua, se recomienda integrar los datos de macroinvertebrados con otros indicadores ambientales y socioeconómicos. Esta aproximación holística permitirá una gestión más efectiva y sostenible de los recursos hídricos.
5. Investigación y Desarrollo: Es necesario continuar con la investigación y el desarrollo en el campo de la bioindicación, explorando nuevas metodologías y mejorando las existentes. Esto incluye el uso de tecnologías avanzadas para la identificación taxonómica y el análisis de datos.

### Bibliografía

- Akhter, S., & Singh Brraich, O. (2018). Seasonal Variation Of Benthic Macro-Invertebrate Diversity Of Ropar. *Journal of environment and biosciences*. 32(2). 217-226. <https://www.researchgate.net/publication/353016638>
- Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, & Mesfin M. Mekonne. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the global Standard*. [https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual\\_Spanish.pdf](https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf)
- Armitage, P., Moss, D., Wright, J., & Furse, M. (1983). The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research*, 17(3), 333–347. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90188-4)
- Barbour, M. T., Faulkner, C., & Gerritsen, J. (1998). *Rapid Bioassessment Protocols For Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish Second Edition* <http://www.epa.gov/OWOW/monitoring/techmon.html> By: Project Officer. <http://www.epa.gov/OWOW/monitoring/techmon.html>
- Chapman, D. V. . (2021). *Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring*. CRC Press.
- Cuitaco Sarmiento, D., Robayo Reyes, T y Rojas Peña, J. (2019). *Evaluación de la calidad del agua mediante el uso del índice de contaminación (Icomo) y su relación con el índice biológico (BMWP/COL) en el caño seco, Restrepo Meta*. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11634/18495>
- David M. Rosenberg, & Vincent H. Resh. (1992). *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Springer. <https://link.springer.com/book/9780412022517#bibliographic-information>
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., ... Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471). <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Hauer, F. R., & Resh, V. H. (2007). Macroinvertebrates. In *Methods in Stream Ecology* (pp. 435–454). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012332908-0.50028-0>

- Hellawell, J. M. (1986). *Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4315-5>
- Hilsenhoff, W. L. (1987). An Improved Biotic Index of Organic Stream Pollution. *The Great Lakes Entomologist*, 20(1), 31–39. <https://doi.org/10.22543/0090-0222.1591>
- Laurance, W. F. (2013). Emerging Threats to Tropical Forests. In *Treetops at Risk* (pp. 71–79). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7161-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7161-5_5)
- Lenat, D. R. (1988). Water Quality Assessment of Streams Using a Qualitative Collection Method for Benthic Macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(3), 222–233. <https://doi.org/10.2307/1467422>
- López Mendoza, S., Huertas Pineda, D. F., Jaramillo Londoño, Á. M., Calderón Rivera, D. S., Díaz Arévalo, J. L., López Mendoza, S., Huertas Pineda, D., Jaramillo Londoño, Á. M., Calderón Rivera, D. S., & Díaz Arévalo, J. L. (2022). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, 37(02), 269–288. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.6281>
- Lovejoy, T. E., Hannah, L., & Wilson, E. (2019). *Biodiversity and Climate Change : Transforming the Biosphere* (1st ed.). Yale University Press. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=5607598>
- Lubchenco, J. (2018). Environmental science: A global concern. *McGraw-Hill Education*.
- Merritt, R. W., & Cummins, K. W. (1996). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. R. W. Merritt, K. W. Cummins. *Journal of the North American Benthological Society*, 15(3), 401–403. <https://doi.org/10.2307/1467288>
- Palma, A. (2013). *Guía para la identificación*. De Invertebrados acuáticos. [https://www2.udec.cl/~lpalma/Palma2013\\_Guia\\_identificacion\\_Macroinvertebrados\\_previaw.pdf](https://www2.udec.cl/~lpalma/Palma2013_Guia_identificacion_Macroinvertebrados_previaw.pdf)
- Pavluk, T. I., Bij De Vaate, A., & Leslie, H. A. (2000). Development of an Index of Trophic Completeness for benthic macroinvertebrate communities in flowing waters. In *Hydrobiologia* ol. 427. 135-141. <https://edepot.wur.nl/15897>
- Poulton, B. C., Graham, J. L., Rasmussen, T. J., Stone, M. L., & Stone, M. L. (2015). Responses of Macroinvertebrate Community Metrics to a Wastewater Discharge in the Upper Blue River of Kansas and Missouri, USA. *Journal of Water Resource and Protection*, 07(15), 1195–1220. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.715098>

- Ramírez, A. (2010). Métodos de recolección. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 41–50. [www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442010000800002&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442010000800002&lng=en&tlng=es)
- Redes Nagut. (2016). *Red Surber*. <http://www.redesnagut.cl/portfolio/surber/>
- Richard W. Merritt, Kenneth W. Cummins, & Martin B. Berg. (2008). An introduction to the aquatic insects of North America 4a ed. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 81. 593-595. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v81n2/v81n2a32.pdf>
- Roldan, P. G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Ediciones Universidad de Antioquia.
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Springer, M. (2013a). Biomonitoring acuático. *Revista de Biología Tropical*, 58(supl.4), 53–59. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v58s4/a03v58s4.pdf>
- Stroud Water Research Center. (2016). *Guía de Identificación de Macroinvertebrados en Agua Dulce*. [https://stroudcenter.org/wp-content/uploads/2016/10/Key\\_spanish.pdf](https://stroudcenter.org/wp-content/uploads/2016/10/Key_spanish.pdf)
- Subodh, S., & Otto, M. (1998). The application of biotic indices and scores in water quality assessment of Nepalese rivers. In S. Chalise, N. R. Herrmann, & H. L. Khanal (Eds.), *Ecohydrology of High Mountain Areas* (pp. 641–657). ICIMOD, Kathmandu, Nepal. [https://www.researchgate.net/publication/301204817\\_The\\_application\\_of\\_biotic\\_indices\\_and\\_scores\\_in\\_water\\_quality\\_assessment\\_of\\_Nepalese\\_rivers](https://www.researchgate.net/publication/301204817_The_application_of_biotic_indices_and_scores_in_water_quality_assessment_of_Nepalese_rivers)
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Erratum: Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 468(7321), 334–334. <https://doi.org/10.1038/nature09549>
- Wetzel, R. G. (2024). *Wetzel's Limnology Lake and River Ecosystems* (Ian D. Jones & John P. Smol, Eds.; 4th ed., Vol. 4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04412-3>
- Wetzel, R., & Likens, G. (2000). *Limnological analyses* (3rd ed.). Springer.