

Avaliação da Integridade Ecológica de Ecossistemas Aquáticos por Meio de Macroinvertebrados Bentônicos

Assessment of the Ecological Integrity of Aquatic Ecosystems Using Benthic Macroinvertebrates

Evaluación de la Integridad Ecológica de los Ecosistemas Acuáticos mediante Macroinvertebrados Bentónicos

 <https://doi.org/10.5281/zenodo.21301689>

Recebido: 28 de junho de 2026

Aceito: 05 de julho de 2026

Publicado: 10 de julho de 2026

Lara Gonçalves Fernandes

Graduação em Ciências Biológicas

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)

✉ lalifofisayones@gmail.com

 <http://lattes.cnpq.br/6736292155868981>

 <https://orcid.org/0009-0005-0273-6710>

Resumo: Os ecossistemas aquáticos desempenham funções ecológicas essenciais, porém sofrem crescente degradação em decorrência de atividades antrópicas, tornando indispensável o desenvolvimento de ferramentas eficientes para o monitoramento ambiental. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a utilização dos macroinvertebrados bentônicos na avaliação da integridade ecológica de ecossistemas aquáticos, destacando seus fundamentos ecológicos, principais metodologias de biomonitoramento, aplicações e desafios. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa, desenvolvida a partir de publicações científicas indexadas nas bases Web of Science, Scopus, SciELO e Google Scholar, utilizando descritores relacionados ao tema. Os estudos evidenciam que os macroinvertebrados bentônicos apresentam elevada sensibilidade às alterações ambientais, refletindo os efeitos cumulativos da poluição orgânica, contaminação química, mudanças no uso do solo, degradação dos habitats, alterações hidrológicas e mudanças climáticas. Também foi verificada a evolução das metodologias de biomonitoramento, com destaque para índices bióticos, índices multimétricos, grupos alimentares funcionais e ferramentas moleculares, como DNA Barcoding e DNA Metabarcoding, que ampliaram a precisão das avaliações ecológicas. Conclui-se que os macroinvertebrados bentônicos constituem bioindicadores confiáveis da integridade ecológica, fornecendo informações fundamentais para programas de monitoramento ambiental, conservação da biodiversidade, gestão sustentável dos recursos hídricos e formulação de políticas públicas voltadas à proteção e recuperação dos ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: Macroinvertebrados bentônicos; Biomonitoramento; Integridade ecológica; Ecossistemas aquáticos; Bioindicadores.

Abstract: Aquatic ecosystems perform essential ecological functions but have been increasingly degraded by human activities, making the development of efficient environmental monitoring tools indispensable. In this context, the present study aimed to analyze the use of benthic macroinvertebrates in assessing the ecological integrity of aquatic ecosystems, emphasizing their ecological foundations, the main biomonitoring methodologies, applications, and challenges. This research is characterized as a qualitative literature review based on scientific publications indexed in the Web of Science, Scopus, SciELO, and Google Scholar databases. The findings indicate that benthic macroinvertebrates exhibit high sensitivity to environmental disturbances, reflecting the cumulative effects of organic pollution, chemical contamination, habitat degradation, land-use changes, and climate change. The review also highlights significant advances in biomonitoring methodologies, including biotic indices, multimetric indices, functional feeding groups, and molecular tools such as DNA Barcoding and DNA Metabarcoding. It is concluded that benthic macroinvertebrates are reliable bioindicators of ecological integrity, providing essential information for environmental monitoring programs, biodiversity conservation, sustainable water resource management, and the development of public policies aimed at protecting and restoring aquatic

ecosystems.

Keywords: Benthic macroinvertebrates; Biomonitoring; Ecological integrity; Aquatic ecosystems; Bioindicators.

Resumen: Los ecosistemas acuáticos desempeñan funciones ecológicas esenciales; sin embargo, han experimentado una creciente degradación debido a las actividades humanas, lo que hace indispensable el desarrollo de herramientas eficientes para el monitoreo ambiental. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el uso de los macroinvertebrados bentónicos en la evaluación de la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos, destacando sus fundamentos ecológicos, las principales metodologías de biomonitoreo, sus aplicaciones y desafíos. La investigación se caracteriza como una revisión bibliográfica con enfoque cualitativo, desarrollada a partir de publicaciones científicas indexadas en las bases de datos Web of Science, Scopus, SciELO y Google Scholar. Los resultados evidencian que los macroinvertebrados bentónicos presentan alta sensibilidad a las alteraciones ambientales, reflejando los efectos acumulativos de la contaminación orgánica, la contaminación química, la degradación del hábitat, los cambios en el uso del suelo y el cambio climático. Asimismo, se observaron importantes avances en las metodologías de biomonitoreo, destacándose los índices bióticos, los índices multimétricos, los grupos funcionales de alimentación y las herramientas moleculares, como el DNA Barcoding y el DNA Metabarcoding. Se concluye que los macroinvertebrados bentónicos constituyen bioindicadores confiables de la integridad ecológica, proporcionando información esencial para los programas de monitoreo ambiental, la conservación de la biodiversidad, la gestión sostenible de los recursos hídricos y la formulación de políticas públicas orientadas a la protección y restauración de los ecosistemas acuáticos.

Palabras clave: Macroinvertebrados bentónicos; Biomonitoreo; Integridad ecológica; Ecosistemas acuáticos; Bioindicadores.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos são fundamentais na manutenção dos processos ecológicos e na oferta de serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo o abastecimento de água, a ciclagem de nutrientes, a manutenção da biodiversidade e a regulação dos ciclos biogeoquímicos (Costanza *et al.*, 1997). Entretanto, esses ambientes vêm sofrendo crescente degradação em decorrência das atividades antrópicas, como a urbanização desordenada, a expansão agrícola, o lançamento de efluentes, a construção de barragens e as alterações climáticas, fatores que comprometem sua estrutura e funcionamento ecológico (Allan, 2004; Crain; Kroeker; Halpern, 2008; Poff *et al.*, 2007; Parmesan, 2006). Nesse contexto, a avaliação da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos tornou-se indispensável para subsidiar ações de monitoramento, conservação e gestão sustentável dos recursos hídricos (Allan; Castillo, 2007).

Entre as ferramentas utilizadas para esse monitoramento, os macroinvertebrados bentônicos destacam-se como um dos grupos biológicos mais eficientes na avaliação da qualidade ambiental. Esses organismos habitam os sedimentos e substratos de rios, córregos, lagos e áreas alagadas, sendo representados principalmente por insetos aquáticos, moluscos, anelídeos e crustáceos, cuja composição e abundância refletem diretamente as condições ambientais locais (Rosenberg; Resh, 1992; Merritt; Cummins; Berg, 1996; Domínguez; Fernández, 2009). Além de apresentarem ampla distribuição geográfica, possuem baixa mobilidade, diferentes níveis de tolerância aos impactos ambientais e ciclos de vida relativamente longos, características que os tornam excelentes bioindicadores das alterações

na qualidade ecológica dos ambientes aquáticos (Hynes, 2001; Wallace; Webster, 1996; Cummins; Klug, 1979).

A utilização de macroinvertebrados bentônicos como indicadores biológicos teve início no começo do século XX, com os estudos pioneiros sobre organismos sapróbios desenvolvidos por Kolkwitz e Marsson (1908). Desde então, houve evolução nas metodologias de biomonitoramento, passando da simples análise da presença ou ausência de espécies para a utilização de índices bióticos, métricas multimétricas e protocolos padronizados capazes de avaliar a integridade ecológica de forma mais abrangente (Metcalf, 1989; Hilsenhoff, 1987; Lenat, 1993; Barbour *et al.*, 1996). Atualmente, esses métodos são amplamente empregados em programas de monitoramento ambiental em diferentes regiões do mundo, permitindo identificar alterações na qualidade da água, degradação de habitats e impactos decorrentes das atividades humanas (Engle; Summers, 1999; Chessman, 2003; Callisto *et al.*, 2002).

A integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos pode ser comprometida por diversos fatores ambientais, como o enriquecimento por nutrientes, a contaminação por compostos orgânicos, o assoreamento dos cursos d'água e a fragmentação dos habitats ripários. Essas alterações provocam modificações na composição taxonômica, na estrutura funcional e na diversidade das comunidades bentônicas, reduzindo a presença de organismos sensíveis e favorecendo espécies mais tolerantes à poluição (Smith; Tilman; Nekola, 1999; Wood; Armitage, 1997; Malaj *et al.*, 2014; Naiman; Décamps; McClain, 2006). Além disso, as mudanças climáticas e os efeitos cumulativos de múltiplos estressores ambientais têm intensificado a necessidade de aperfeiçoar as metodologias de biomonitoramento, tornando-as mais sensíveis às transformações ambientais contemporâneas (Durance; Ormerod, 2007; Crain; Kroeker; Halpern, 2008).

Nos últimos anos, avanços tecnológicos também têm ampliado as possibilidades de avaliação da biodiversidade aquática por meio de técnicas moleculares, como o DNA metabarcoding, que complementam as abordagens taxonômicas tradicionais e aumentam a precisão das análises ecológicas (Baird; Hajibabaei, 2012; Taberlet *et al.*, 2012). Entretanto, a identificação morfológica dos macroinvertebrados bentônicos continua sendo uma das metodologias mais difundidas em programas de monitoramento devido à sua eficiência, custo relativamente reduzido e ampla aplicabilidade em diferentes condições ambientais (Orozco-González; Ocasio-Torres, 2023; Fernandes, 2026).

Diante desse cenário, esta revisão tem como objetivo analisar o papel dos macroinvertebrados bentônicos na avaliação da integridade ecológica de ecossistemas

aquáticos, abordando seus fundamentos ecológicos, os principais métodos de biomonitoramento empregados, os índices biológicos utilizados e as respostas desses organismos aos diferentes impactos ambientais. Busca-se, ainda, discutir os avanços recentes da bioindicação e sua importância para a conservação, recuperação e gestão sustentável dos ecossistemas aquáticos, evidenciando a relevância desses organismos como ferramentas essenciais na avaliação da qualidade ambiental.

2. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa, desenvolvida por meio da análise e síntese da literatura científica sobre a utilização de macroinvertebrados bentônicos na avaliação da integridade ecológica de ecossistemas aquáticos (Braga; Braga, 2026). A pesquisa foi realizada nas bases de dados Web of Science, Scopus, SciELO e Google Scholar, utilizando os palavras-chave: macroinvertebrados bentônicos, bioindicadores, integridade ecológica, ecossistemas aquáticos, biomonitoramento, índices bióticos, qualidade da água, impactos antropogênicos e mudanças climáticas.

Foram considerados artigos científicos, livros e capítulos de livros publicados preferencialmente entre 2000 e 2026, além de obras clássicas fundamentais para a consolidação do biomonitoramento aquático, como os trabalhos de Kolkwitz e Marsson (1908), Hilsenhoff (1987), Metcalfe (1989) e Rosenberg e Resh (1992). Foram incluídos estudos que abordassem a utilização de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores da qualidade ambiental, desenvolvimento de índices biológicos, protocolos de biomonitoramento e respostas das comunidades bentônicas aos impactos ambientais. Foram excluídos trabalhos que tratassem exclusivamente de aspectos taxonômicos ou de distribuição geográfica sem relação com a avaliação ecológica.

Após a seleção, os estudos foram submetidos à leitura integral, sendo extraídas informações referentes aos objetivos, metodologias empregadas, índices biológicos utilizados, principais resultados e contribuições para o monitoramento ambiental. Posteriormente, os dados foram organizados e analisados por meio de síntese temática, contemplando os fundamentos ecológicos dos macroinvertebrados bentônicos, os principais métodos de biomonitoramento, as respostas aos diferentes estressores ambientais e os avanços recentes na avaliação da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ecossistemas Aquáticos e a Integridade Ecológica

Os ecossistemas aquáticos constituem componentes essenciais da biosfera, desempenhando funções indispensáveis para a manutenção da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e da disponibilidade de recursos hídricos. Esses ambientes fornecem importantes serviços ecossistêmicos, como abastecimento de água, ciclagem de nutrientes, produção primária, controle de cheias e suporte à fauna e flora aquáticas, sendo fundamentais para o equilíbrio ambiental e para o bem-estar humano (Costanza *et al.*, 1997). A elevada complexidade ecológica desses sistemas decorre da interação entre fatores físicos, químicos e biológicos, os quais determinam a estrutura e o funcionamento das comunidades aquáticas (Allan; Castillo, 2007).

Segundo Allan e Castillo (2007), rios e córregos apresentam grande diversidade de características hidrológicas, geomorfológicas e ecológicas, fazendo com que cada sistema possua atributos particulares. Apesar dessa variabilidade, os processos ecológicos que regulam o funcionamento desses ambientes seguem princípios comuns relacionados ao fluxo de energia, transporte de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e interação entre organismos e habitat. Essa compreensão tem contribuído significativamente para o desenvolvimento da ecologia de ambientes lóticos e para o aperfeiçoamento das estratégias de conservação dos recursos hídricos.

A integridade ecológica corresponde à capacidade de um ecossistema manter sua estrutura, composição biológica e processos ecológicos naturais, preservando sua funcionalidade mesmo diante de perturbações ambientais. Nesse contexto, a avaliação da integridade ecológica ultrapassa a simples análise dos parâmetros físico-químicos da água, incorporando componentes biológicos capazes de refletir os efeitos acumulativos das alterações ambientais ao longo do tempo (Metcalf, 1989; Rosenberg; Resh, 1992).

Entretanto, a crescente intensificação das atividades antrópicas tem provocado profundas modificações nos ecossistemas aquáticos em escala global. A expansão urbana, o desmatamento, as atividades agrícolas, o lançamento de efluentes domésticos e industriais, além da construção de barragens, alteram significativamente a qualidade da água, a dinâmica hidrológica e a heterogeneidade dos habitats aquáticos (Allan, 2004; Poff *et al.*, 2007). Allan (2004) destaca que o uso e a ocupação do solo exercem influência direta sobre a estrutura dos ecossistemas fluviais, modificando processos ecológicos em diferentes escalas espaciais. Entretanto, o autor ressalta que essas relações são complexas, uma vez que fatores naturais e

antrópicos frequentemente atuam de forma simultânea, dificultando a identificação dos mecanismos responsáveis pelas alterações observadas.

Além das mudanças no uso do solo, outros fatores ambientais também comprometem a integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos. O excesso de nutrientes provenientes das atividades agropecuárias favorece processos de eutrofização, reduzindo a concentração de oxigênio dissolvido e comprometendo a sobrevivência de diversas espécies aquáticas (Smith; Tilman; Nekola, 1999). Da mesma forma, a contaminação por compostos químicos emergentes representa uma das principais ameaças atuais à biodiversidade de água doce, causando alterações fisiológicas, reprodutivas e comportamentais em organismos aquáticos (Malaj *et al.*, 2014). Os efeitos dessas pressões tornam-se ainda mais intensos quando associados às mudanças climáticas, responsáveis por alterar padrões hidrológicos, regimes de precipitação e temperatura da água, influenciando diretamente a composição das comunidades biológicas (Parmesan, 2006; Durance; Ormerod, 2007).

Outro aspecto relevante refere-se à degradação das matas ciliares e das zonas ripárias. Esses ambientes exercem funções fundamentais na estabilização das margens, retenção de sedimentos, controle da temperatura da água e fornecimento de matéria orgânica aos ecossistemas aquáticos. A perda da vegetação ripária reduz a qualidade do habitat, aumenta os processos erosivos e compromete a manutenção da biodiversidade (Naiman; Décamps; McClain, 2006). Paralelamente, o assoreamento provocado pelo aumento da carga de sedimentos modifica a composição do substrato, reduzindo áreas favoráveis ao estabelecimento de organismos bentônicos e alterando o funcionamento ecológico dos cursos d'água (Wood; Armitage, 1997).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a conservação dos ecossistemas aquáticos depende da adoção de estratégias de monitoramento capazes de integrar diferentes componentes ambientais. Nesse sentido, indicadores biológicos assumem papel de destaque por refletirem os efeitos cumulativos das alterações ambientais e permitirem uma avaliação mais abrangente da condição ecológica dos ambientes aquáticos (Allan; Castillo, 2007; Rosenberg; Resh, 1992).

3.2 Macroinvertebrados Bentônicos como Indicadores da Integridade Ecológica

Entre os diversos organismos utilizados no biomonitoramento ambiental, os macroinvertebrados bentônicos destacam-se como um dos grupos mais eficientes para avaliar a integridade ecológica de ecossistemas aquáticos. Esses organismos vivem associados ao

sedimento, às rochas, à vegetação submersa e à matéria orgânica acumulada no fundo de rios, lagos e áreas alagadas, sendo representados principalmente por insetos aquáticos, moluscos, anelídeos e crustáceos (Merritt; Cummins; Berg, 1996; Domínguez; Fernández, 2009).

A ampla utilização desses organismos fundamenta-se em características ecológicas específicas, como baixa mobilidade, elevada diversidade taxonômica, ampla distribuição geográfica e diferentes níveis de sensibilidade às alterações ambientais. Essas características permitem que as comunidades bentônicas respondam de forma previsível às perturbações ambientais, refletindo tanto impactos recentes quanto processos de degradação acumulados ao longo do tempo (Wallace; Webster, 1996; Cummins; Klug, 1979; Giller; Malmqvist, 1998).

A utilização de macroinvertebrados como indicadores biológicos teve início com os estudos clássicos de Kolkwitz e Marsson (1908), que propuseram o sistema sapróbio para avaliar os níveis de poluição orgânica em ambientes aquáticos. Posteriormente, o desenvolvimento de índices bióticos ampliou significativamente a capacidade de avaliação da qualidade ambiental, destacando-se o Índice Biótico de Hilsenhoff (1987), os valores de tolerância propostos por Lenat (1993) e os protocolos multimétricos desenvolvidos por Barbour *et al.* (1996), atualmente utilizados em diversos programas de biomonitoramento ao redor do mundo.

Segundo Metcalfe (1989), a utilização de comunidades de macroinvertebrados representa uma das abordagens mais consistentes para avaliação da qualidade de ambientes lóticos, uma vez que esses organismos integram os efeitos de diferentes estressores ambientais durante seus ciclos de vida. Essa característica torna as avaliações biológicas mais representativas do que análises pontuais baseadas exclusivamente em parâmetros físico-químicos, os quais refletem apenas as condições momentâneas da água.

A eficiência desses organismos como bioindicadores está diretamente relacionada às diferentes tolerâncias apresentadas pelos grupos taxonômicos. Ordens como Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera, frequentemente conhecidas como grupo EPT, apresentam elevada sensibilidade à poluição e são normalmente associadas a ambientes preservados. Em contrapartida, organismos pertencentes às famílias Chironomidae, Oligochaeta e alguns moluscos apresentam maior tolerância às alterações ambientais, predominando em ambientes impactados (Merritt; Cummins; Berg, 1996; Domínguez; Fernández, 2009).

Nas últimas décadas, o biomonitoramento passou por importantes avanços metodológicos. Além dos tradicionais índices bióticos, passaram a ser empregados índices multimétricos, análises funcionais, estatística multivariada e, mais recentemente, ferramentas

moleculares como o DNA barcoding e o DNA metabarcoding. Essas tecnologias aumentam significativamente a resolução taxonômica, permitindo identificar organismos de difícil classificação morfológica e ampliando a precisão das avaliações ecológicas (Baird; Hajibabaei, 2012; Taberlet *et al.*, 2012).

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, desafios importantes permanecem, especialmente em regiões tropicais e neotropicais, onde a elevada biodiversidade ainda contrasta com a escassez de estudos taxonômicos e bancos de dados consolidados. A heterogeneidade dos habitats, a variabilidade hidrológica natural e a atuação simultânea de múltiplos estressores ambientais dificultam a padronização dos métodos de avaliação, exigindo o desenvolvimento de protocolos específicos para cada região (Chessman, 2003; Orozco-González; Ocasio-Torres, 2023).

Essas observações corroboram as conclusões apresentadas por Fernandes (2026), que destaca os macroinvertebrados bentônicos como um dos mais confiáveis indicadores biológicos da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos. O autor ressalta que esses organismos permitem avaliar os efeitos cumulativos da poluição orgânica, da degradação dos habitats, da contaminação química, das alterações hidrológicas e das mudanças climáticas, constituindo ferramentas indispensáveis para o monitoramento ambiental e para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Além disso, enfatiza que o aperfeiçoamento dos programas de biomonitoramento depende da integração entre indicadores biológicos, análises físico-químicas, avaliação dos habitats e novas tecnologias moleculares, possibilitando diagnósticos mais precisos e subsidiando políticas públicas voltadas à conservação e recuperação dos ecossistemas aquáticos (Fernandes, 2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os macroinvertebrados bentônicos constituem um dos grupos biológicos mais eficientes para a avaliação da integridade ecológica de ecossistemas aquáticos. A literatura demonstra consenso ao afirmar que esses organismos apresentam elevada sensibilidade às alterações ambientais, permitindo identificar impactos decorrentes da poluição orgânica, degradação dos habitats, alterações hidrológicas, contaminação química e mudanças climáticas (Rosenberg; Resh, 1992; Allan; Castillo, 2007; Fernandes, 2026).

Há a evolução significativa das metodologias de biomonitoramento ao longo das últimas décadas. Inicialmente, as avaliações concentravam-se na identificação de organismos indicadores e na utilização de índices bióticos baseados na tolerância à poluição orgânica

(Kolkwitz; Marsson, 1908; Hilsenhoff, 1987). Posteriormente, foram desenvolvidos índices multimétricos capazes de integrar diferentes atributos ecológicos das comunidades bentônicas, aumentando a precisão das avaliações da qualidade ambiental (Barbour *et al.*, 1996; Engle; Summers, 1999).

Sob essa perspectiva, Allan (2004) destaca que a integridade dos ecossistemas fluviais está diretamente relacionada às características da paisagem e ao uso do solo em diferentes escalas espaciais. Entretanto, o autor ressalta que essa relação não ocorre de forma linear, uma vez que fatores naturais e antrópicos atuam simultaneamente sobre os ecossistemas, dificultando a identificação isolada dos mecanismos responsáveis pelas alterações observadas. Essa interpretação é reforçada por Allan e Castillo (2007), ao afirmarem que a estrutura e o funcionamento dos ambientes lóticos dependem da interação entre fatores hidrológicos, geomorfológicos, climáticos e biológicos, tornando indispensável a utilização de indicadores capazes de integrar essas múltiplas variáveis ambientais.

Nesse contexto, os macroinvertebrados bentônicos apresentam vantagens em relação às análises exclusivamente físico-químicas da água. Enquanto parâmetros químicos representam apenas condições momentâneas do ambiente, as comunidades bentônicas refletem alterações acumuladas ao longo de seus ciclos de vida, funcionando como indicadores da qualidade ecológica em médio e longo prazo (Metcalf, 1989; Hynes, 2001; Wallace; Webster, 1996). Essa característica explica sua ampla utilização em programas nacionais e internacionais de monitoramento ambiental.

Outro aspecto refere-se à resposta diferencial dos grupos taxonômicos aos impactos ambientais. Diversos autores relatam que organismos pertencentes às ordens Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera (EPT) apresentam elevada sensibilidade à degradação ambiental, enquanto representantes de Chironomidae, Oligochaeta e alguns moluscos tendem a predominar em ambientes impactados (Lenat, 1993; Merritt; Cummins; Berg, 1996; Domínguez; Fernández, 2009). Essas diferenças fisiológicas permitem que a composição das comunidades bentônicas seja utilizada como indicador confiável da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos.

A literatura também evidencia que os principais fatores responsáveis pela alteração dessas comunidades são decorrentes das atividades humanas. A intensificação da agricultura, a urbanização, o lançamento de efluentes, o desmatamento das matas ciliares, a construção de barragens e a introdução de contaminantes químicos modificam significativamente a estrutura dos habitats aquáticos, reduzindo a diversidade biológica e favorecendo organismos tolerantes

à poluição (Smith; Tilman; Nekola, 1999; Poff *et al.*, 2007; Malaj *et al.*, 2014). De forma semelhante, Wood e Armitage (1997) demonstram que o aumento da deposição de sedimentos compromete a disponibilidade de micro-habitats utilizados pelos macroinvertebrados, reduzindo a riqueza taxonômica e alterando o funcionamento ecológico dos ambientes lóticos.

Além dos impactos tradicionais, estudos recentes apontam que as mudanças climáticas representam um dos principais desafios para o biomonitoramento aquático. Alterações na temperatura da água, na intensidade das precipitações e na dinâmica hidrológica modificam diretamente a distribuição e a abundância das comunidades bentônicas, exigindo metodologias de avaliação cada vez mais sensíveis às múltiplas pressões ambientais (Parmesan, 2006; Durance; Ormerod, 2007; Crain; Kroeker; Halpern, 2008).

Outro avanço refere-se à incorporação de técnicas moleculares aos programas de biomonitoramento. Ferramentas como DNA Barcoding e DNA Metabarcoding aumentaram significativamente a resolução taxonômica das análises, reduzindo limitações relacionadas à identificação morfológica e ampliando a capacidade de detectar alterações na biodiversidade aquática (Baird; Hajibabaei, 2012; Taberlet *et al.*, 2012). Entretanto, diversos autores ressaltam que essas metodologias ainda devem ser utilizadas de forma complementar às abordagens tradicionais, sobretudo em regiões megadiversas, onde a escassez de bancos de dados taxonômicos representa uma limitação importante (Bowman; Bailey, 1997; Orozco-González; Ocasio-Torres, 2023).

No contexto neotropical, ainda existem lacunas relacionadas ao conhecimento taxonômico, à padronização dos protocolos de amostragem e ao desenvolvimento de índices biológicos específicos para diferentes bacias hidrográficas. Essas limitações reforçam a necessidade de ampliar investimentos em pesquisas ecológicas de longo prazo e na formação de especialistas capazes de atender às demandas do biomonitoramento ambiental (Callisto *et al.*, 2002; Domínguez; Fernández, 2009).

Os resultados corroboram as conclusões apresentadas por Fernandes (2026), que destaca os macroinvertebrados bentônicos como um dos mais confiáveis indicadores da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos. Segundo o autor, a integração entre indicadores biológicos, avaliação dos habitats, parâmetros físico-químicos e tecnologias moleculares representa a estratégia mais eficiente para subsidiar programas de monitoramento ambiental, orientar ações de conservação da biodiversidade e fortalecer políticas públicas voltadas ao manejo sustentável dos recursos hídricos.

Quadro 1. Síntese dos principais estudos utilizados na revisão bibliográfica

Autor(es)	Objetivo do estudo	Principais contribuições
Kolkwitz e Marsson (1908)	Desenvolver o sistema sapróbio	Primeira utilização de organismos aquáticos para avaliação da qualidade da água.
Hilsenhoff (1987)	Criar índice biótico	Desenvolvimento do Índice Biótico de Hilsenhoff para poluição orgânica.
Metcalfe (1989)	Revisar biomonitoramento europeu	Consolidação do uso de macroinvertebrados na avaliação da qualidade da água.
Rosenberg e Resh (1992)	Biomonitoramento de água doce	Referência clássica sobre macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores.
Lenat (1993)	Valores de tolerância	Definição de critérios para avaliação da qualidade da água utilizando macroinvertebrados.
Barbour <i>et al.</i> (1996)	Protocolos biológicos	Desenvolvimento de índices multimétricos para rios.
Merritt, Cummins e Berg (1996)	Insetos aquáticos	Ecologia, identificação e grupos funcionais dos macroinvertebrados.
Wallace e Webster (1996)	Função ecológica	Importância dos macroinvertebrados na dinâmica dos ecossistemas lóticos.
Costanza <i>et al.</i> (1997)	Serviços ecossistêmicos	Demonstra o valor ecológico e econômico dos ecossistemas aquáticos.
Allan (2004)	Uso do solo e rios	Relação entre paisagem, uso do solo e integridade dos ecossistemas aquáticos.
Allan e Castillo (2007)	Ecologia de rios	Integra processos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos na avaliação dos ambientes aquáticos.
Poff <i>et al.</i> (2007)	Barragens e biodiversidade	Evidencia impactos hidrológicos sobre comunidades aquáticas.
Durance e Ormerod (2007)	Mudanças climáticas	Demonstra alterações nas comunidades bentônicas decorrentes do aquecimento global.
Crain, Kroeker e Halpern (2008)	Múltiplos estressores	Discussão sobre efeitos cumulativos de impactos ambientais.
Malaj <i>et al.</i> (2014)	Contaminantes químicos	Avalia os efeitos de compostos orgânicos na biodiversidade de água doce.
Orozco-González e Ocasio-Torres (2023)	Bioindicadores tropicais	Confirma a eficiência dos macroinvertebrados na avaliação da qualidade da água em rios tropicais.
Fernandes (2026)	Revisão sobre macroinvertebrados bentônicos	Atualiza o conhecimento sobre bioindicação, tecnologias moleculares, desafios e perspectivas futuras para o biomonitoramento.

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A análise conjunta no quadro 1 demonstra que a avaliação da integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos evoluiu de abordagens centradas exclusivamente na qualidade físico-química da água para modelos que incorporam respostas biológicas capazes de refletir alterações ambientais em diferentes escalas temporais e espaciais. Nesse contexto, os macroinvertebrados bentônicos destacam-se por integrarem os efeitos cumulativos das perturbações ambientais, permitindo identificar modificações na estrutura ecológica antes mesmo que alterações físico-químicas sejam detectadas. Além disso, observa-se uma tendência crescente em associar informações biológicas às características da paisagem, da hidrologia e do uso e ocupação do solo, proporcionando diagnósticos mais abrangentes sobre o estado de conservação dos ecossistemas aquáticos. Outro aspecto evidenciado na literatura refere-se à necessidade de aperfeiçoar protocolos de biomonitoramento para regiões tropicais, especialmente devido à elevada biodiversidade e à escassez de informações taxonômicas, fatores que dificultam a padronização dos índices biológicos. Nesse cenário, a incorporação de ferramentas moleculares, geotecnologias e modelos estatísticos representa um avanço importante para aumentar a precisão das avaliações ambientais. Entretanto, os autores convergem ao afirmar que essas tecnologias devem complementar, e não substituir, o conhecimento ecológico tradicional, reforçando que a integração entre indicadores biológicos, variáveis físico-químicas e avaliação dos habitats constitui a estratégia mais consistente para subsidiar ações de conservação, recuperação ambiental e gestão sustentável dos recursos hídricos.

5. CONCLUSÃO

Os macroinvertebrados bentônicos é uma ferramenta para a avaliação da integridade ecológica de ecossistemas aquáticos, devido à sua elevada diversidade, ampla distribuição, baixa mobilidade e diferentes níveis de tolerância às alterações ambientais. Essas características permitem que suas comunidades respondam de maneira consistente às modificações na qualidade da água, na estrutura dos habitats e nos processos ecológicos, tornando-os indicadores confiáveis do estado de conservação dos ambientes aquáticos.

A evolução das metodologias de biomonitoramento possibilitou avaliações mais abrangentes da qualidade ambiental por meio da incorporação de índices bióticos, índices multimétricos, grupos alimentares funcionais e, mais recentemente, de ferramentas moleculares, ampliando a precisão dos diagnósticos ecológicos. Entretanto, essas abordagens apresentam melhores resultados quando utilizadas de forma integrada às análises físico-

químicas da água e à caracterização dos habitats, permitindo uma compreensão mais completa das condições ambientais.

Os impactos decorrentes das atividades antrópicas, como mudanças no uso e ocupação do solo, lançamento de efluentes, construção de barragens, contaminação química e alterações climáticas, modificam significativamente a composição e a estrutura das comunidades bentônicas, comprometendo o equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos. Nesse cenário, o biomonitoramento baseado em macroinvertebrados bentônicos constitui um importante instrumento para identificar processos de degradação ambiental, subsidiar ações de recuperação de áreas impactadas e orientar estratégias de conservação e manejo dos recursos hídricos.

Embora os avanços científicos e tecnológicos tenham ampliado a eficiência das avaliações ecológicas, ainda existem desafios relacionados à padronização dos protocolos de amostragem, à limitação do conhecimento taxonômico, especialmente em regiões tropicais, e ao desenvolvimento de índices biológicos adaptados às diferentes realidades ambientais. Dessa forma, torna-se necessário fortalecer pesquisas voltadas ao monitoramento de longo prazo, ampliar investimentos em estudos sobre biodiversidade aquática e incentivar a integração entre diferentes metodologias de avaliação ambiental.

Conclui-se que a utilização de macroinvertebrados bentônicos na avaliação da integridade ecológica constitui uma abordagem consolidada e indispensável para o monitoramento dos ecossistemas aquáticos. Sua aplicação fornece informações essenciais para a conservação da biodiversidade, a gestão sustentável dos recursos hídricos e a formulação de políticas públicas ambientais, contribuindo para a proteção e recuperação dos ecossistemas de água doce frente às crescentes pressões ambientais.

6. CONFLITO DE INTERESSES

A autora declara que não possui conflitos de interesse de natureza pessoal, financeira, acadêmica, profissional ou institucional relacionados à condução desta pesquisa, à análise dos dados, à interpretação dos resultados ou à elaboração deste manuscrito.

7. REFERÊNCIAS

ALLAN, J. D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, 35, 257-284. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>

ALLAN, J. D.; CASTILLO, M. M. Stream ecology: structure and function of running waters.

Springer Nature. 2, Number of Pages, XIV, 436, 2007 DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6>

BARBOUR, M. T. *et al.* A Framework for Biological Criteria for Florida Streams Using Benthic Macroinvertebrates. **Journal of the North American Benthological Society**, Vol. 15, No. 2 Jun., 1996. DOI: <https://doi.org/10.2307/1467948>

BATZER, D. P.; WISSINGER, S. A. Ecology of Insect Communities in Nontidal Wetlands. **Annual Review Entomology**. V.41:75-100. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.000451>

BOWMAN, M. F.; BAILEY, R. C. Does taxonomic resolution affect the multivariate description of the structure of freshwater benthic macroinvertebrate communities? **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, 54(8), 1802-1807. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1139/f97-085>

BRAGA, E. G.; BRAGA, A. N. Procedimentos Metodológicos na Pesquisa Científica: Tipos, Abordagens e Uso Ético da IA segundo o CNPq. **Revista Egan**, v. 1, n. 4, p. e0024, 2026. Disponível em: <https://revistaegan.com.br/index.php/revistaegan/article/view/28>. Acesso em: jun. 2026.

CALLISTO, M. *et al.* Aplicação de um protocolo de avaliação rápida da diversidade de habitats em atividades de ensino e pesquisa (MG-RJ). **Acta Limnologica Brasiliensia**, (Online), vol.14, n1, p.91-98, 2002. Disponível em: <https://www.actalb.org/article/627b10d8782aad05cb235d75/pdf/alb-14-1-91.pdf>. Acesso em: jun. 2026.

CHESSMAN, B. C. New sensitivity grades for Australian river macroinvertebrates. **Marine & Freshwater Research**, 54(8), 95-105. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF02114>

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, 387(6630), 253-260. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1038/387253a0>

CRAIN, C. M.; KROEKER, K.; HALPERN, B. S. Interactive and cumulative effects of multiple stressors in marine systems. **Ecology Letters**, 11(12), 1304-1315. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01253.x>

CUMMINS, K. W.; KLUG, M. J. Feeding ecology of stream invertebrates. **Annual Review of Ecology and Systematics**, 10(1), 147-172. 1979. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2096788>. Acesso em: jun. 2026.

DOMÍNGUEZ, E.; FERNÁNDEZ, H. R. **Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología**. Fundación Miguel Lillo. Publicaciones especiales, 2009.

DARWALL, W. *et al.* Freshwater Biodiversity – A Hidden Resource Under Threat Review of The IUCN **Red List of Threatened Species**. IUCN, Gland, Switzerland. 2008. Disponível em: [https://www.avijl.org/docs/IUCN Red List/freshwater biodiversity a hidden resource under threat.pdf](https://www.avijl.org/docs/IUCN%20Red%20List/freshwater%20biodiversity%20a%20hidden%20resource%20under%20threat.pdf). Acesso em: jun. 2026.

DURANCE, I.; ORMEROD, S. J. Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over

a 25-year period. **Global Change Biology**, 13: 942-957. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01340.x>

ENGLE, V. D.; SUMMERS, J. K. Refinement, validation, and application of a benthic condition index for Northern Gulf of Mexico estuaries. **Estuaries** 22:624-635. 1999. DOI: <https://doi.org/10.2307/1353050>

FERNANDES, L. G. Benthic Macroinvertebrates as Indicators of Ecological Integrity in Aquatic Ecosystems. **Revista Egan**, [S. l.], p. e0044, 2026. Disponível em: <https://revistaegan.com.br/index.php/revistaegan/article/view/51>. Acesso em: jul. 2026.

GILLER, P. S.; MALMQVIST, B., **The Biology of Streams and Rivers**. Oxford; online edn, Oxford Academic, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198549789.001.0001>

BAIRD, D. J.; HAJIBABAEI, M. Biomonitoring 2.0: a new paradigm in ecosystem assessment made possible by next-generation DNA sequencing. **Molecular Ecology**, 21: 2039-2044. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05519.x>

HILSENHOFF, W. L. An Improved Biotic Index of Organic Stream Pollution. **The Great Lakes Entomologist**, vol 20 (1), 1987. DOI: <https://doi.org/10.22543/0090-0222.1591>

HYNES, H. B. N. **The ecology of running waters**. University of Toronto Press. Editora: Blackburn Press, 2001.

KOLKWITZ, R.; MARSSON, M. Ökologie der pflanzlichen Saprobien. **Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft**, 26: 505-519. 1908. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1908.tb06722.x>

LENAT, D. R. A Biotic Index for the Southeastern United States: Derivation and List of Tolerance Values, with Criteria for Assigning Water-Quality Ratings. **Society for Freshwater Science**, 12(3), 279-290. 1993. DOI: <https://doi.org/10.2307/1467463>

MALAJ, E. *et al.* Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. Vol. 111, No. 26, 9549-9554. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1321082111>

MERRITT, R. W.; CUMMINS, K. W.; BERG, M. B. **An introduction to the aquatic insects of North America**. 3rd ed. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2307/1467288>

METCALFE, J. L. Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: History and present status in Europe. **Environmental Pollution**, Volume 60, Issues 1-2, Pages 101-139, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(89\)90223-6](https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90223-6)

NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H.; MCCLAIN, M. E. Riparia: Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities. **BioScience**, Volume 56, Issue 4, April 2006, Pages 353-354, DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[353:FL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[353:FL]2.0.CO;2).

OROZCO-GONZÁLEZ, C. E.; OCASIO-TORRES, M. E. Aquatic Macroinvertebrates as Bioindicators

of Water Quality: A Study of an Ecosystem Regulation Service in a Tropical River. **Ecologies**, 4(2), 209-228, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecologies4020015>

PALMER, M. A. *et al.* Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring. **Restoration Ecology**, 8(2): 210-210, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80028-2.x>

PARMESAN, C. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, 37, 637-669. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>

POFF, N. L. *et al.* Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 104(14), 5732-5737. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0609812104>

ROSENBERG, D. M.; RESH, V. H. **Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates**. Springer New York, NY. X, 488, 1992.

SMITH, V. H.; TILMAN, G. D.; NEKOLA, J. C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. **Environmental Pollution**, 100(1-3), 179-196. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)

TABERLET, P. *et al.* Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding. **Molecular Ecology**, 21(8), 2045-2050. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2012.05470.x>

VOULVOULIS, N.; ARPON, K. D. GIAKOUMIS, T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. **Science of The Total Environment**, Volume 575, 1 January, Pages 358-366, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.228>

WALLACE, J. B.; WEBSTER, J. R. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. Annual review of entomology, **Annual review of entomology**, 41, 115-139. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.000555>

WIEDERHOLM, T. Use of benthic invertebrates in lake monitoring. **Water Environment Federation**, 52(3), 537-547. 1980. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25040750>. Acesso em: jun. 2026.

WOOD, P. J.; ARMITAGE, P. D. Biological Effects vixeof Fine Sediment in the Lotic Environment. **Environmental management**, 21(2), 203-217. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002679900019>