

**UNIVERSIDADE SANTO AMARO**

**Ciências Biológicas**

**Caroline de Paula Batista**

**REVISÃO DOS COMPONENTES DA ICTIOFAUNA BRASILEIRA**

**COMO BIOINDICADORES**

**São Paulo**

**2023**

**Caroline de Paula Batista**

**REVISÃO DOS COMPONENTES DA ICTIOFAUNA BRASILEIRA  
COMO BIOINDICADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Santo Amaro – UNISA, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José da Costa Silva

**São Paulo  
2023**

B324r Batista, Caroline de Paula.

Revisão dos componentes da ictiofauna brasileira como bioindicadores / Caroline de Paula Batista. – São Paulo, 2023.

36 p.: il., color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) — Universidade Santo Amaro, 2023.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Guilherme José da Costa Silva.

1. Ecossistema aquático. 2. Degradação. 3. Biomarcadores. I. Silva, Guilherme José da Costa, orient. II. Universidade Santo Amaro. III. Título.

**Caroline de Paula Batista**

**REVISÃO DOS COMPONENTES DA ICTIOFAUNA BRASILEIRA  
COMO BIOINDICADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Santo Amaro – UNISA, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José da Costa Silva

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Banca Examinadora

---

---

---

**Conceito Final**

---

## RESUMO

A urbanização acelerada e o crescimento populacional nas últimas décadas têm aumentado a demanda por recursos naturais, levando a práticas exploratórias prejudiciais ao ambiente, afetando os ecossistemas aquáticos e resultando na perda de biodiversidade e na deterioração da qualidade da água. Para avaliar esses impactos ambientais, são utilizados biomarcadores e bioindicadores. Os biomarcadores são respostas biológicas a poluentes, oferecendo medidas sensíveis da contaminação e seus efeitos. Os bioindicadores são espécies que respondem aos efeitos de poluentes tóxicos e são utilizados para determinar a qualidade do ambiente. No ambiente aquático, os peixes são frequentemente escolhidos como bioindicadores, especialmente aqueles que ocupam posições mais altas na cadeia alimentar, acumulando contaminantes. Apesar de o Brasil ser o país com maior biodiversidade do mundo, as pesquisas relacionadas à utilização e validação da ictiofauna como bioindicador são frequentemente muito pontuais e não reúnem muitas espécies em um mesmo estudo. Devido à necessidade de reunir grupos e ferramentas capazes de determinar e avaliar as condições do ambiente aquático, decorrente de sua intensa utilização, o presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de reunir os peixes brasileiros que apresentam validação e/ou potencial de serem bioindicadores. A revisão bibliográfica permitiu observar a importância da diversidade de espécies de peixes brasileiros que podem ser utilizados como bioindicadores, porém, existe uma desigualdade na distribuição de estudos, com maior concentração nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. A bacia do Alto Paraná se destaca como a mais estudada, e se apresenta como uma região bastante afetada pela interferência humana. Outras regiões importantes, como a bacia Amazônica, carecem de estudos nesse contexto, apesar de sua riqueza ictiológica e da influência da mineração. Em meio à abundância de espécies nativas observadas durante o levantamento de dados, espécies introduzidas, como *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) e *Poecilia reticulata* (Peters, 1859) também foram citadas e validadas como bioindicadores, devido suas características fisiológicas e morfológicas. É perceptível que os tecidos oriundos de brânquias e fígado são frequentemente mais atribuídos a testes com bioindicadores e biomarcadores. Embora a revisão bibliográfica tenha evidenciado 78 espécies da ictiofauna brasileira como potencial bioindicadores, é de suma importância que mais pesquisas sobre bioindicadores da qualidade ambiental sejam desenvolvidas, em razão da crescente pressão sobre os ecossistemas aquáticos. A revisão bibliográfica apresentada fornece um banco de dados de espécies de peixes que foram testadas como bioindicadores, suas áreas de estudo e métodos de pesquisa, facilitando a realização de estudos futuros nessa área.

**Palavras-chave:** Peixes brasileiros. Degradação. Ecossistema aquático.

Biomarcadores.

## ABSTRACT

Accelerated urbanization and population growth in recent decades have increased demand for natural resources and led to environmentally destructive exploitation practices that degrade aquatic ecosystems and result in loss of biodiversity and degradation of water quality. Biomarkers and bioindicators are used to assess these environmental impacts. Biomarkers are biological responses to pollutants that provide sensitive measurement of contamination and its effects. Bioindicators are species that respond to the effects of toxic pollutants and are used to determine the quality of the environment. In aquatic environments, fish are often selected as bioindicators, especially those that occupy higher positions in the food chain and accumulate pollutants. Although Brazil is the most biodiverse country in the world, research related to the use and validation of ichthyofauna as bioindicators is often very specific and does not bring together many species in a single study. Given the need to bring together groups and tools capable of determining and assessing aquatic environmental conditions resulting from their intensive use, the present work was developed with the objective of reunite Brazilian fishes that have been validated as bioindicators and/or have the potential to be such. The review of the literature revealed the importance of the diversity of Brazilian fish species that can be used as bioindicators. However, the distribution of studies is uneven, with a greater concentration in the southern and southeastern regions of Brazil. The Alto Paraná Basin is the best studied basin and presents itself as a region heavily affected by human interventions. Other important regions, such as the Amazon Basin, presented only a few studies in this context, despite their ichthyological richness and the influence of mining. In addition to the abundance of native species observed during data collection, introduced species such as *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) and *Poecilia reticulata* (Peters, 1859) were also cited and validated as bioindicators based on their physiological and morphological characteristics. It is noticeable that tissues from gills and liver are most commonly used for bioindicator and biomarker testing. Although the literature review highlighted 78 species of the Brazilian ichthyofauna as potential bioindicators, it is extremely important that more research be conducted on bioindicators of environmental quality due to increasing pressures on aquatic ecosystems. The literature review presented here provides a database of fish species that have been tested as bioindicators, along with their study areas and research methods, facilitating future studies in this area.

**Keywords:** Brazilian fishes. Degradation. Aquatic ecosystem. Biomarkers.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 BIOMARCADORES E BIOINDICADORES .....</b>	<b>7</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>10</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>26</b>

## 1 Introdução

A contar do momento em que a população humana se tornou parte dominante dos sistemas, a maioria de suas ações tende a seguir sentido antagônico àquele que se refere o equilíbrio ambiental<sup>1</sup>. A degradação ambiental é um processo global<sup>1-4</sup> e vem sendo mencionada frequentemente desde a segunda metade do século 20, porém, com o constante crescimento populacional nos últimos 50 anos, a urbanização está cada vez mais acelerada e demandando recursos que são extraídos de maneira exploratória do ambiente<sup>5,6</sup>.

Notoriamente, o ambiente aquático é altamente complexo, diverso, aberto e dinâmico, composto por diferentes características bióticas e abióticas, compreendendo abundantes sistemas, nos quais se encontram rios, lagos, mares, estuários e oceanos<sup>7,8</sup>. Esse conjunto de sistemas é utilizado globalmente para economia e bem-estar humano<sup>2</sup>. Por esse motivo, está continuamente sofrendo mudanças e impactos em sua composição<sup>7,8</sup>.

Essas constantes mudanças e impactos no ambiente aquático são oriundos da degradação ambiental e estão diretamente atreladas à intensa curva de crescimento do desenvolvimento antrópico<sup>1,9-13</sup>. Se tratando de atividades humanas, existe um padrão de degradação, tendo em vista que a interferência antropocêntrica tende a se repetir: represamento de rios com construção de reservatórios e barragens, urbanização e agricultura (mudanças na manipulação do solo), mineração, descarte de resíduos industriais e domésticos sem devido tratamento, desmatamento, desvio do curso natural dos rios, pesca predatória e aquacultura<sup>5,9-13</sup>. Além disso, outros pontos de interferência estão ganhando destaque, como é o caso das mudanças climáticas e eventos pandêmicos<sup>5</sup>. Como produto dessas atividades e a falta de planejamento no desenvolvimento urbano<sup>14</sup>, a disparidade da composição física, química e biológica do ambiente começa a surgir de tal maneira que o ecossistema aquático é diretamente afetado, com a perda de biodiversidade<sup>4,13,15,16</sup> e qualidade da água<sup>8,10,14</sup>.

Quando a degradação do ambiente aquático é o tópico principal, a poluição por elementos tóxicos e a eutrofização tornam-se pontos cruciais<sup>17,18</sup>. A poluição desses ambientes possui três pontos básicos de partida: agrícola, composto por pesticidas, fertilizantes e conservantes de madeira carregados pela chuva no processo de

lixiviação<sup>12,19-21</sup>, doméstica, envolvendo descarte de esgoto não tratado; industrial, envolvendo descarte de resíduos químicos, resíduos de mineração<sup>18</sup> e resíduos de matadouros e granjas<sup>9</sup>.

Esses pontos básicos podem ser tratados como de natureza física, (ex.: mudança de temperatura, luminosidade, turbidez, velocidade da água, assoreamento, entre outros), química (ex.: mudança do pH, dos sais dissolvidos, da concentração natural de metais entre outros)<sup>9,18</sup> ou biológica (ex.: mudanças nos componentes da comunidade)<sup>9</sup>. Já a eutrofização é um processo de mudanças que coloca em risco a conservação das espécies, e por geralmente estar associada à poluição do ambiente, acaba afetando vários níveis tróficos<sup>9,17</sup>, podendo ainda acarretar mudanças no sabor, odor e coloração da água, diminuição do oxigênio dissolvido e redução da biodiversidade aquática<sup>22</sup>.

Para determinar e avaliar o impacto gerado pelos inúmeros tipos de degradação ambiental ocasionada pelo desenvolvimento antrópico, alguns organismos e suas capacidades de tolerância e adaptação são comumente utilizados<sup>17-19,23-26</sup>.

### **1.1 Biomarcadores e bioindicadores**

Os biomarcadores são respostas biológicas a poluentes<sup>24</sup>. Oferecem medidas rápidas e altamente sensíveis para avaliar o ambiente, proporcionando informações cruciais sobre a intensidade da contaminação por poluentes, limites de tolerância dos organismos afetados, efeitos adversos e mecanismos de transferência e acumulação ao longo da cadeia trófica<sup>27,28</sup>.

Um aspecto notável dos biomarcadores é sua capacidade de determinar desvios homeostáticos nas condições fisiológicas<sup>29</sup>. Esses marcadores são aplicados em análises quantitativas de fluidos corporais, células ou tecidos, fornecendo indicações bioquímicas ou celulares da presença e efeito acumulativo de contaminantes<sup>30</sup>. A utilidade dos biomarcadores é evidente nos monitoramentos em nível bioquímico, permitindo detecção antecipada de efeitos a longo prazo e da presença de contaminantes no ambiente, antes mesmo que sejam um problema para os níveis organizacionais mais elevados, essa antecipação possibilita o planejamento eficaz de estratégias de biorremediação<sup>21,27,28,31-33</sup>.

Os biomarcadores podem ser categorizados de acordo com três classificações<sup>28,34,35</sup>:

- Biomarcadores de efeito: utilizados para documentar alterações pré-clínicas ou efeitos adversos à saúde devido à exposição externa e absorção de um produto químico;
- Biomarcadores de exposição: utilizados para confirmar e avaliar a exposição de indivíduos ou populações a uma determinada substância, fornecendo uma ligação entre a exposição externa e a situação interna;
- Biomarcadores de suscetibilidade: ajudam a esclarecer as variações no grau de respostas à exposição a substâncias tóxicas observadas entre diferentes indivíduos.

É importante destacar que a distinção entre os conceitos de biomarcadores de exposição e de efeito não é necessariamente uma oposição, mas sim uma diferenciação baseada na maneira de utilização, tendo em vista que, as respostas oferecidas pelos biomarcadores podem ser consideradas como efeitos biológicos ou bioquímicos após uma exposição à substância tóxica, o que acaba tornando esse biomarcador útil na indicação tanto de exposição como de efeito<sup>28</sup>. Tratando-se da utilização dos biomarcadores, embora as análises morfológicas sejam relevantes, uma abordagem complementar que incorpora tanto biomarcadores morfológicos quanto os bioquímicos se revela essencial para obtenção de informações mais abrangentes<sup>36</sup>.

A avaliação dos impactos ambientais se beneficia da utilização de diversos tipos de biomarcadores: histopatológicos<sup>24,31,37</sup>, hematológicos<sup>18</sup> e enzimáticos<sup>31,38,39</sup>. Entretanto, ao selecionar um biomarcador, é necessário atentar-se às necessidades principais da investigação<sup>29,40</sup>. Utilizar um biomarcador adequado é fundamental para obter informações mais precisas acerca da interação entre os contaminantes e os sistemas biológicos<sup>29,40</sup>.

Bioindicadores são organismos que possuem características de seu habitat e respondem aos efeitos agudos e crônicos decorrentes de poluentes tóxicos, se tornando capazes de carregar informações para determinação da qualidade ambiente<sup>23,33,41</sup>. No entanto, vale ressaltar que os bioindicadores muitas vezes são

denominados como biomarcadores<sup>33</sup>. Para que determinados organismos sejam considerados bioindicadores, alguns autores destacam alguns critérios<sup>41-43</sup>:

- Taxonomia clara e fácil reconhecimento por não especialistas: Instabilidades taxonômicas complicam monitoramentos de longo prazo e a interpretação entre locais de estudo;
- Distribuição ampla: permite comparações em estudos de escala regional, nacional e internacional;
- Ocorrência em número abundante: permite facilidade na amostragem e conclusões sobre padrões de distribuição quantitativos;
- Baixa variabilidade genética e ecológica: indicadores devem possuir demandas ecológicas relativamente simples;
- Tamanho corporal grande: facilita a amostragem e classificação;
- Baixa mobilidade e longo ciclo de vida: permite fácil integração entre escala temporal e espacial;
- Características ecológicas bem conhecidas: informações ficológicas e de integração do grupo com o meio devem estar amplamente disponíveis;
- Adequação para uso em análises laboratoriais: de fácil monitoramento *in situ*;
- Alta sensibilidade a substâncias específicas;
- Capacidade de bioacumulação.

No ambiente aquático organismos como os peixes<sup>21,26,28,37,44-47</sup>, crustáceos, plantas aquáticas, mamíferos, aves, algas, moluscos, zooplâncton<sup>17</sup>, são considerados bioindicadores<sup>12,24,48-50</sup>. Aqueles que se encontram em topo de cadeia são comumente mais utilizados como bioindicadores, em razão do consumo de organismos em níveis tróficos mais baixos, acumulando e centralizando substâncias contaminantes<sup>37,46,51</sup>.

Quando comparados com outros grupos, como os invertebrados, os peixes são capazes de fornecer mais informações sobre as condições do ambiente em que se encontram, além de serem facilmente identificáveis e capturáveis<sup>46</sup>. Entretanto, algumas espécies são mais sensíveis a alterações químicas e físicas, como o pH e oxigênio dissolvido<sup>46,47</sup>.

Embora o Brasil seja o país que reúne a maior biodiversidade do planeta<sup>52,53</sup>, as pesquisas relacionadas à utilização e validação da ictiofauna como bioindicador são frequentemente muito pontuais e não reúnem muitas espécies em um mesmo estudo. Devido à necessidade de reunir grupos e ferramentas capazes de determinar e avaliar as condições do ambiente aquático, decorrente de sua intensa utilização, o presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de agrupar os peixes brasileiros que apresentam validação e/ou potencial de serem bioindicadores.

## **2 Objetivo**

O presente trabalho possui como objetivo reunir em uma breve revisão bibliográfica, os peixes brasileiros que apresentam validação e /ou potencial de serem bioindicadores.

## **3 Material e Métodos**

A pesquisa do presente trabalho é caracterizada como um estudo de revisão bibliográfica e foi realizada de forma exploratória e descritiva sobre a ictiofauna brasileira que apresentou validação e/ou potencial bioindicador. O conjunto de dados foi construído a partir de artigos disponíveis nos mecanismos de busca Google Acadêmico e SciELO entre os anos de 2000 e 2022.

Os termos Bioindicadores, Peixes Brasileiros, Ecossistema Aquático, tanto em língua portuguesa quanto inglesa, foram empregados durante a pesquisa. Os termos foram utilizados em diversas combinações, aplicando as conjunções E/OU, de maneira a encontrá-los de forma singular, plural ou variações. Após obtenção da lista de artigos contendo os termos aplicados durante a pesquisa, uma conferência pelas citações e referências foi realizada de acordo com o andamento e necessidade do presente trabalho.

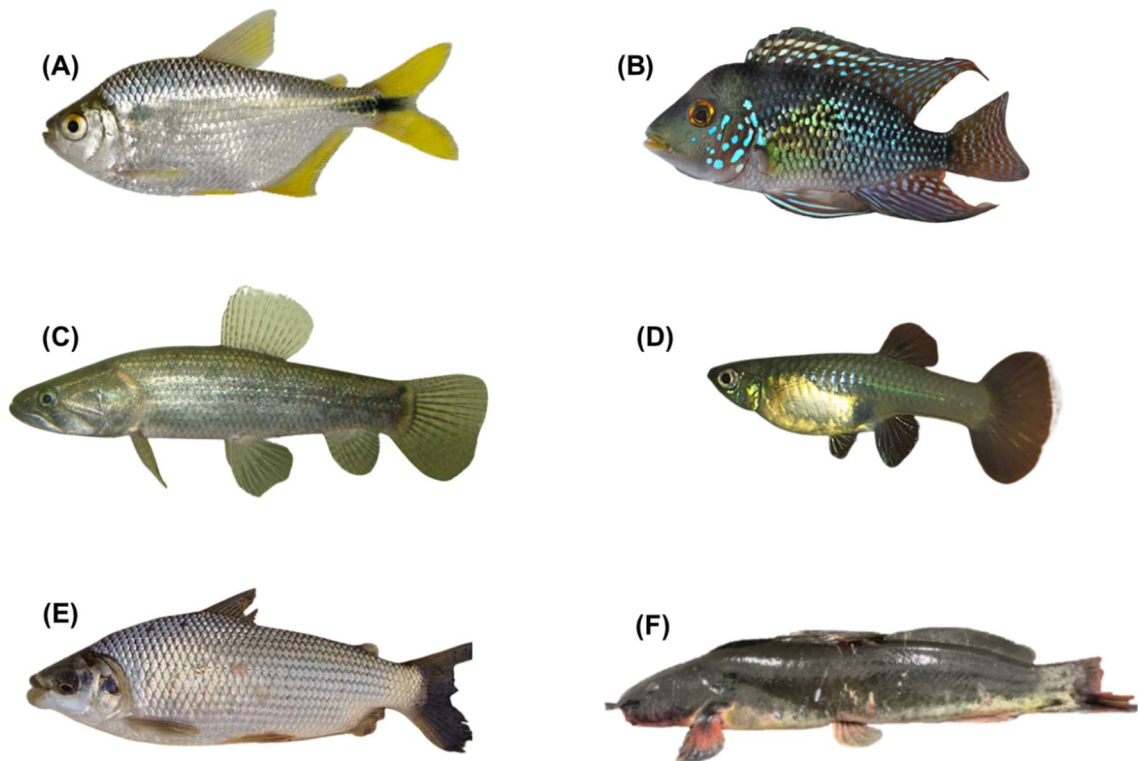
Parte dos resultados foi reunido em um mapa, elaborado através das ferramentas disponíveis nos *softwares QGIS, PAINT 3D e Google Earth Pro*. As definições das ecorregiões de ambientes aquáticos foram baseadas em Abell e colaboradores<sup>54</sup> (2008).

## 4 Resultados

A coleta de dados bibliográficos encontrados nos 69 artigos analisados entre os anos de 2000 e 2022 permitiu identificar 78 espécies da ictiofauna brasileira já reconhecidas como potenciais bioindicadores, sendo 73 espécies validadas por diversos tipos de testes e 5 espécies que apenas apresentaram potencial de serem bioindicadores, de acordo com critérios estabelecidos (Quadro 1). Cabe mencionar que trabalhos não publicados (teses e dissertações) foram descartados durante a composição de análise e coleta de dados do presente trabalho, apesar da grande quantidade de estudos desse tipo que foram encontrados. Foi possível identificar que os tecidos mais utilizados nas análises são oriundos de brânquias, músculo e fígado.

Os dados apresentados apontam que as espécies *Geophagus brasiliensis* (Quoy & Gaimard, 1824), *Hoplias malabaricus* (Bloch, 1794), *Rhamdia quelen* (Quoy & Gaimard, 1824), *Poecilia reticulata* (Peters, 1859), *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837) e *Astyanax* sp. são frequentemente citados como bioindicadores (Figura 1).

**Figura 1 – Espécies frequentemente citadas como bioindicadores.**



**(A)** *Astyanax* sp. (Lambari); **(B)** *Geophagus brasiliensis* (Acará); **(C)** *Hoplias malabaricus* (Traira); **(D)** *Poecilia reticulata* (Barrigudinho); **(E)** *Prochilodus lineatus* (Curimatá); **(F)** *Rhamdia quelen* (Jundiá).

Fontes: FishBase 2023 **(A-E)** e acervo pessoal **(F)**.



Quadro 1 - Espécies bioindicadoras por ecorregião de água doce, validação e abordagem de pesquisa.

Espécie	Nome popular	Ecorregiões	Potencial validado	Abordagem de pesquisa	Referências
<i>Anchoa spinifer</i>	Manjuba	323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Ancistrus multispinis</i>	Barbadinho	330	Sim	Análise da atividade enzimática	(56)
<i>Astyanax altiparanae</i>	Lambari	344	Sim	Sensibilidade à metais e agrotóxicos; análise histológica (brânquias) e fisiológica (plasma, glicemia, conteúdo da hemoglobina); monitoramento genético	(37)
		344	Sim	Análise de diversidade	(25)
		344	Sim	Análise histológica das brânquias e parâmetros fisiológicos do sangue	(57)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Astyanax bimaculatus</i>	Lambari do rabo amarelo	329	Sim	Atividade enzimática no tecido hepático	(59)
		328	Sim	Determinação de metais pesados em tecido muscular	(60)
<i>Astyanax aff. bimaculatus</i>	Lambari do rabo amarelo	329	Sim	Análise da concentração de zinco em brânquias, músculo e ossos; análise histológica de tecido branquial	(61)
<i>Astyanax lacustris</i>	Tambiú	330	Sim	Análise toxicológica e ensaio cometa em células hepáticas, branquiais e sanguíneas, testes de micronúcleos e atividade enzimática	(38)
<i>Astyanax sp.</i>	Lambari, Piaba	346	Sim	Análise histopatológica das brânquias e fígado	(62)
		321	Sim	Teste de micronúcleo	(63)
<i>Bagre bagre</i>	Bagre	325	Sim	Análise histológica das brânquias	(64)
<i>Bagre marinus</i>	Bagre-bandeira	326	Sim	Avaliação dos níveis de metais traço em tecido hepático e muscular	(65)
<i>Bairdiella ronchus</i>	Cangauá	326	Sim	Análises histopatológicas de tecido hepático e branquial	(66)
<i>Brachyplatystoma filamentosum</i>	Piraíba	321	Sim	Concentração de mercúrio em tecido muscular e hepático	(67)
<i>Brachyplatystoma rousseauxii</i>	Dourada	321	Sim	Concentração de mercúrio em tecido muscular	(68)
		321	Sim	Concentração de mercúrio em tecido muscular	(69)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Brachyplatystoma vaillantii</i>	Piramutaba	323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Bryconamericus iheringii</i>	Lambari	334	Sim	Análise histopatológica das brânquias; testes de micronúcleo; análise da concentração de metais em tecido muscular	(70)
		334	Sim	Análise histopatológica das brânquias; análise da concentração de metal em tecido muscular; testes de micronúcleo	(71)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Callichthys callichthys</i>	Camboatá, Tamboatá	344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Caranx latus</i>	Xaréu	326	Sim	Análises histopatológicas de tecido hepático e branquial	(66)
<i>Cathorops agassizii</i>	Bagre-gaivota	323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Cathorops spixii</i>	Bagre-amarelo	330	Sim	Atividade enzimática no tecido cerebral	(39)
		330	Sim	Análise dos níveis de metais	(72)
		330	Sim	Análise da concentração de mercúrio, metil-mercúrio e metais traço	(73)
		330	Sim	Avaliação dos níveis de metais traço em tecido hepático e muscular	(65)
<i>Centropomus parallelus</i>	Robalo-peva	326	Sim	Análises histopatológicas de tecido hepático e branquial	(66)
<i>Centropomus undecimalis</i>	Robalo	326	Sim	Análises histopatológicas de tecido hepático e branquial	(66)
<i>Characidium zebra</i>	Piquira, Mocinha	344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Cichla</i> sp.	Tucunaré	324	Sim	Análise da acumulação de metais em tecido muscular e hepático; teste de micronúcleo; análise bioquímica do sangue; análise histopatológica de tecido branquial e hepático	(74)
		322	Sim	Avaliação da presença de metais nos tecidos	(75)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Colossoma macropomum</i>	Tambaqui	314	Sim	Análise de atividade enzimática e danos no DNA de células sanguíneas	(76)
<i>Corydoras paleatus</i>	Coridora, Limpa-fundo	346	Sim	Análise histopatológica das brânquias e fígado	(62)
<i>Curimata inornata</i>	Branquinha	323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Cyphocharax voga</i>	Biru	334	Sim	Análise da concentração de metais no fígado	(77)
<i>Eigenmannia virescens</i>	Peixe-espada	344	Sim	Análise de conteúdo estomacal	(78)
		314	Sim	Avaliação da mutagênese e genotoxicidade a partir da exposição ao benzeno	(79)
<i>Geophagus brasiliensis</i>	Acará	329	Sim	Análise morfológica, análise da atividade enzimática e contagem de micronúcleos	(21)
		329	Sim	Biomarcadores fisiológicos: índice hepatossomático – HSI e fator de condição – CF	(80)
		329	Sim	Análise de atividade enzimática e teste de micronúcleos	(81)
		330	Sim	Análise toxicológica e ensaio cometa em células hepáticas, branquiais e sanguíneas, testes de micronúcleos e atividade enzimática	(38)
		330	Sim	Análise da concentração de metais em tecido branquial, hepático e muscular; análise histopatológica de brânquias e fígado	(82)
		328	Sim	Análise da concentração de metais em tecido muscular; testes de micronúcleo anomalias nucleares em eritrócitos	(83)
		344	Sim	Análise e amostragem de sangue e análise morfológica de brânquias, fígado, rins e gônadas	(84)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Geophagus iporangensis</i>	Acará Iporanga	344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)
<i>Geophagus proximus</i>	Acaratinga	323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Gobionellus stomatus</i>	Amoré	326	Sim	Análises histopatológicas de tecido hepático e branquial	(66)
<i>Gymnotus carapo</i>	Tuvira, Sarapó	344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Hoplias malabaricus</i>	Traíra	344	Sim	Análise de diversidade	(25)
		344	Sim	Análises químicas, fisiológicas, histopatológicas e imunológicas dos tecidos musculares e hepáticos	(86)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
		344	Sim	Análise e amostragem de sangue e análise morfológica de brânquias, fígado, rins e gônadas	(84)
		328	Sim	Análise da concentração de metais em pele, músculo e ossos	(87)
		328	Sim	Determinação de metais pesados em tecido muscular	(60)
<i>Hoplosternum littorale</i>	Caborja	344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)
<i>Hyphessobrycon eques</i>	Mato-grosso	328	Sim	Ensaio ecotoxicológico com agrotóxicos	(88)
		344	Sim	Análise da ecotoxicidade da vinhaça	(89)
		344	Sim	Ensaio ecotoxicológico	(90)
<i>Hypostomus affinis</i>	Cascudo areia	329	Sim	Biomarcadores fisiológicos: índice hepatossomático (HSI) e fator de condição (CF)	(80)
<i>Hypostomus ancistroides</i>	Cascudo pintado	344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
		344	Sim	Análise histopatológica de tecido hepático	(91)
<i>Hypostomus auroguttatus</i>	Cascudo	329	Sim	Biomarcadores fisiológicos: índice hepatossomático (HSI) e fator de condição (CF)	(80)
<i>Iheringichthys labrosus</i>	Mandi-beiçudo	344	Sim	Análise de conteúdo estomacal	(78)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Leporinus amblyrhynchus</i>	Chimbore	344	Sim	Análise de conteúdo estomacal	(78)
<i>Leporinus obtusidens</i>	Piapara	334	Sim	Níveis de agrotóxicos nos tecidos hepático, cerebral e muscular	(92)
<i>Lithodoras dorsalis</i>	Bacu de pedra	323	Sim	Análise histológica e determinação de atividade enzimática em tecido hepático	(31)
		323	Sim	Análise histopatológica do fígado associada a análise de índices de integridade: curva de dominância abundância-biomassa (ABC), índice de saúde biológica (BHI), índices de integridade biológica em comunidades de peixes estuarinos	(93)
		323	Sim	Análise da frequência de ocorrência e diversidade da espécie	(94)
		323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Lutjanus synagris</i>	Ariocó	328	Sim	Avaliação dos níveis de metais traço em tecido hepático e muscular	(65)
<i>Micropogonias furnieri</i>	Corvina	334	Sim	Atividade enzimática no tecido cerebral	(39)
		334	Sim	Avaliação dos níveis de metais traço em tecido hepático e muscular	(65)
<i>Mylossoma duriventre</i>	Pacupeba	324	Sim	Análise de micronúcleos, anomalias morfológicas nucleares e dados biométricos	(95)
			Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Mylossoma sp.</i>	Pacu	321	Sim	Concentração de mercúrio em tecido muscular	(69)
<i>Netuma barba</i>	Bagre-branco	329	Sim	Avaliação dos níveis de mercúrio no tecido muscular, sangue total, soro e hemácias	(96)
<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilápia	329	Sim	Análise morfológica, atividade enzimática e contagem de micronúcleos	(21)
		328	Sim	Determinação de metais pesados em tecido muscular	(60)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Oreochromis niloticus</i> (continuação)	Tilápia (continuação)	344	Sim	Análise de atividade enzimática e níveis de metalotioneína no fígado, brânquias e músculo branco	(44)
<i>Pellona castelnaeana</i>	Apapá amarelo		Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Phallocerus caudimaculatus</i>	Guaru	328	Sim	Ensaio ecotoxicológico com agrotóxicos	(88)
<i>Phallocerus harpagos</i>	Guaru	344	Sim	Fator de condição relativa (Kn), estado de bem-estar	(97)
<i>Phallocerus</i> sp.	Guaru	346	Sim	Análise do número de indivíduos	(98)
<i>Piaractus mesopotamicus</i>	Pacu-caranha	328	Sim	Ensaio ecotoxicológico com agrotóxicos	(88)
		344	Sim	Ensaio ecotoxicológico	(90)
<i>Pimelodus maculatus</i>	Bagre-pintado	329	Sim	Análise de atividade enzimática e testes de micronúcleos	(81)
		329	Sim	Análise de frequência de micronúcleos, índice hepatossomático, índice gonodossomático, fator de condição e análise de atividade enzimática	(99)
<i>Plagioscion squamosissimus</i>	Pescada do Piauí	323	Sim	Análise histológica e determinação de atividade enzimática em tecido hepático	(31)
		323	Sim	Análise histopatológica do fígado associada a análise de índices de integridade: curva de dominância abundância-biomassa (ABC), índice de saúde biológica (BHI), índices de integridade biológica em comunidades de peixes estuarinos	(93)
		323	Sim	Análise da frequência de ocorrência e diversidade da espécie	(94)
		323	Sim	Concentrações de metais em tecido muscular e branquial	(55)
<i>Poecilia reticulata</i>	Barrigudinho	344	Sim	Análise do conteúdo gastrointestinal	(100)
		328	Sim	Análise de atividade enzimática	(101)
		344	Sim	Fator de condição relativa (Kn), estado de bem-estar	(97)
		344	Sim	Análise de diversidade	(25)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Poecilia reticulata</i> (continuação)	Barrigudinho (continuação)	344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Poecilia vivipara</i>	Guaru	344	Sim	Análise morfométrica do epitélio branquial exposto a extrato de pequi	(102)
<i>Potamorhina altamazonica</i>	Mocinha		Não	Crterios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Potamorhina</i> sp.	Mocinha	322	Sim	Avaliação da presença de metais nos tecidos	(75)
<i>Prochilodus lineatus</i>	Curimatá	344	Sim	Sensibilidade a metais e agrotóxicos	(37)
		344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)
		344	Sim	Análises histológicas, atividades enzimáticas, testes de toxicidade e análise sanguínea	(103)
		344	Sim	Análise das concentrações de cromo em rins, músculo e fígado; análise bioquímica com atividade enzimática; ensaio cometa em eritrócitos para análise de dano em DNA	(104)
		344	Sim	Níveis de agrotóxicos no tecido hepático	(105)
<i>Prochilodus nigricans</i>	Corimatá		Não	Crterios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
* <i>Psalidodon fasciatus</i>	Lambari do rabo vermelho	344	Sim	Análise histológica (brânquias) e fisiológica (plasma, glicemia, conteúdo da hemoglobina); monitoramento genético	(37)
		344	Sim	Análise histológica das brânquias e parâmetros fisiológicos do sangue	(57)
		334	Sim	Análise dos parâmetros relacionados à reprodução: diâmetro do ovócito, índice gonadal, relação gonadal-somática e fator de condição	(106)
<i>Pseudoplatystoma</i> sp.	Pintado	320	Sim	Níveis de agrotóxicos nos tecidos hepático, cerebral e muscular	(107)
<i>Pterygoplichthys ambrosettii</i>	Cascudo	344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>*Pterygoplichthys pardalis</i>	Acarí-bodó	316	Sim	Avaliação da concentração de mercúrio em tecido hepático, muscular e branquial	(108)
			Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Pygocentrus nattereri</i>	Piranha vermelha		Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Rhamdia quelen</i>	Jundiá	332	Sim	Efeito da amônia e pH em parâmetros metabólicos e histologia das brânquias	(109)
		344	Sim	Análise da concentração de metais em brânquias e músculos da região dorsal	(85)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
		334	Sim	Níveis de agrotóxicos nos tecidos hepático, cerebral e muscular	(110)
		333	Sim	Níveis de agrotóxicos em tecido hepático	(111)
<i>Salminus franciscanus</i>	Dourado	327	Sim	Análise de índice gonodossomático e hepatossomático, análise histológica de fígado e baço	(112)
<i>Schizodon intermedius</i>	Piava	344	Sim	Monitoramento genético	(37)
<i>Schizodon nasutus</i>	Timboré	344	Sim	Monitoramento genético	(37)
<i>Sciades herzbergii</i>	Bagre	325	Sim	Análise histológica das brânquias	(64)
<i>Serrasalmus brandtii</i>	Piranha branca	328	Sim	Análise da concentração de metais em pele, músculo e ossos	(87)
<i>Serrasalmus aff. eigenmanni</i>	Pirambeba	314	Sim	Concentrações de mercúrio no tecido muscular	(113)
<i>Serrasalmus rhombeus</i>	Piranha preta	314	Sim	Concentrações de mercúrio no tecido muscular	(113)
		323	Sim	Análise histopatológica de tecido branquial e concentrações de metais traço em tecido muscular	(114)
		323	Sim	Análise histopatológica de tecido hepático e análise de concentrações de mercúrio em tecido muscular e hepático	(115)

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Ecorregiões</b>	<b>Potencial validado</b>	<b>Abordagem de pesquisa</b>	<b>Referências</b>
<i>Serrasalmus rhombeus</i> (continuação)	Piranha preta (continuação)		Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)
<i>Serrasalmus</i> sp.	Piranha	322	Sim	Avaliação da presença de metais nos tecidos	(75)
<i>Steindachnerina insculpta</i>	Fernete	344	Sim	Monitoramento genético	(37)
<i>Synbranchus marmoratus</i>	Mussum	344	Sim	Análise de diversidade	(25)
		344	Sim	Diversidade, equitabilidade e dominância de espécies	(58)
<i>Triportheus angulatus</i>	Sardinha		Não	Critérios propostos por Johnson e colaboradores em 1993	(46)

\*Nomenclatura conferida no catálogo Eschmeyer 2023 para verificação de possíveis sinônimos.

Fonte: A autora

## 5 Discussão

A literatura destaca que a pesquisa científica contribui, em um âmbito nacional, para o processo de inovação e desenvolvimento econômico, entretanto, estudos recentes apontam que o desenvolvimento científico no Brasil se encontra mal distribuído, com foco principal nas regiões Sul e Sudeste deste país<sup>116</sup>. Essa concentração resulta em um desenvolvimento regional não homogêneo e demonstra que essa distribuição de recursos está relacionada com a capacidade econômica da região<sup>116,117</sup>. A centralização de desenvolvimento científico pode acabar afetando negativamente diversos nichos de pesquisa científica, entre eles, estudos sobre biodiversidade e distribuição de ictiofauna.

A bacia do Alto Paraná é aquela que reúne a maior quantidade de espécies bioindicadoras validadas na literatura científica (Figura 2). Essa bacia, entretanto, é uma das que possui maior interferência antrópica<sup>118,119</sup>. Além disso, sabe-se que essa região apresenta uma ictiofauna, além de vulnerável, bastante diversa e desconhecida<sup>11,120</sup>, tal como relatam trabalhos de levantamento e de identificação moleculares<sup>121</sup>. Por outro lado, ecorregiões extremamente importantes do ponto de vista ictiológico são até o presente, pouco ou totalmente inexploradas quanto ao potencial de sua ictiofauna no que concerne a bioindicação (Figura 2).

A bacia Amazônica, com suas diversas ecorregiões, é berço de muitas espécies endêmicas, e essas comunidades ictiológicas estão amplamente distribuídas pelo território brasileiro<sup>122</sup>. Na região amazônica a atividade de mineração é uma das principais fontes de recursos econômicos da população<sup>123</sup>, e a sua exploração acaba se tornando um dos principais pontos na poluição do ambiente por metais<sup>115,124,125</sup>. Porém, apesar da existência dessa grande perturbação ambiental, essa região de grande importância no meio ictiológico não se destaca nos estudos produzidos acerca de bioindicadores (Figura 2), evidenciando que as regiões mais afetadas pela acelerada urbanização e que possuem maior volume de pessoas, na sua grande maioria, são os principais alvos de estudos científicos da ictiologia bioindicadora.

Alguns autores destacam que os organismos carnívoros, de topo de cadeia, são mais suscetíveis a maiores concentrações de mercúrio<sup>126-130</sup>. Entretanto, o levantamento de dados torna evidente que nem todas as espécies que passaram por

validações com abordagem de pesquisa voltadas para concentrações de mercúrio são exclusivamente carnívoras. Lacerda e colaboradores<sup>83</sup> (2020) destacam que, espécies com hábitos alimentares bentopelágicos, como é o caso do *Geophagus brasiliensis*, são capazes de responder a variações ambientais da mesma maneira que um organismo de topo de cadeia, devido sua grande interação com a coluna d'água e sedimento, evidenciando diversas fontes de poluentes em sua dieta.

Estudos que analisam a relação de diversidade e abundância de uma espécie ou grupo como bioindicador se tornam relevantes para determinação da qualidade de um determinado ambiente em períodos estipulados de tempo (ex.: dias, estações do ano, meses, entre outros)<sup>25,58</sup>. Entretanto, esse tipo de abordagem é influenciável tanto pela sazonalidade do ambiente, tornando o esforço de coleta ainda maior, quanto pelo método de abordagem utilizado<sup>25,131</sup>.

Em meio à abundância de espécies nativas observadas durante o levantamento de dados, espécies como *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) e *Poecilia reticulata* também foram citadas e validadas como bioindicadores. *Oreochromis nilotus* é uma espécie introduzida e amplamente distribuída, possui grandes capacidades de resistência a ambientes poluídos e alterados<sup>44,132-134</sup>. Além disso, é um peixe que está presente na alimentação de diversos brasileiros<sup>60,132</sup>. *Poecilia reticulata* é uma espécie oportunista que se alimenta, sobretudo de detritos, é amplamente introduzida e possui grande capacidade de resistência e sobrevivência em ambientes alterados<sup>135-137</sup>. Por ser um peixe muito utilizado em aquarismo, é de fácil manutenção e manipulação em laboratório<sup>136</sup>. Portanto, apesar dessas duas espécies não serem nativas do território brasileiro, ainda sim são muito utilizadas como bioindicadores<sup>44,135,138</sup>.

A utilização de órgãos e tecidos para verificar a ocorrência de distúrbios morfológicos e fisiológicos em decorrência de alterações ambientais são muito eficazes em estudos que visam determinar bioindicadores e biomarcadores<sup>139</sup>. Entretanto, no momento da análise, é preciso levar em consideração a função de cada órgão ou tecido<sup>84</sup>. Os tecidos oriundos de brânquias e fígado são frequentemente atribuídos a testes com bioindicadores e biomarcadores<sup>28,47</sup>. As brânquias estão diretamente expostas às substâncias presentes no meio aquático e são as primeiras a sofrerem os impactos negativos de uma contaminação<sup>59,140,141</sup>. O fígado é o órgão que está intimamente envolvido na desintoxicação e biotransformação das substâncias presentes no organismo, tornando o tecido hepático o local de maior

acumulação de substâncias poluentes e por consequência, mais propício para ocorrência de danos<sup>28,47,59,141</sup>. Outros tecidos também demonstraram sua importância nesse tipo de análise, porém foram menos utilizados quando comparados aos anteriormente citados (Quadro 1).

É importante destacar que Feranti e colaboradores<sup>142</sup> (2015), desenvolveram uma técnica de videocelioscopia para realização de biópsia hepática de indivíduos da espécie *Rhamdia quelen*. O desenvolvimento desse tipo de metodologia influencia na utilização destes animais para testes de indicação ambiental sem a necessidade de eutanásia, ocasionando uma menor perda econômica em sistemas de cultivo e produção, bem como a preservação da diversidade e abundância de espécie<sup>139</sup>.

## **6 Considerações Finais**

Ainda que a busca bibliográfica evidencie 78 espécies da ictiofauna brasileira como bioindicadores, nos últimos 22 anos, os estudos realizados acerca da temática abordada são muito carentes e pontuais. Abordam poucas espécies e normalmente estão restritas às mesmas regiões, tornando a avaliação de outras áreas pouco ou totalmente inexploradas. O desenvolvimento de maiores pesquisas acerca de bioindicadores da qualidade ambiental se torna aconselhável, tendo em vista o crescimento populacional acompanhado dos impactos da urbanização. A revisão bibliográfica aqui apresentada contribui para que novas pesquisas e estudos com essa temática sejam desenvolvidos, uma vez que reúne um banco de dados de diversas espécies presentes no território brasileiro que já foram testadas como bioindicadores, sua abordagem de pesquisa para determinação e ecorregiões onde foram reportadas.

## REFERÊNCIAS

1. Moraes DS de L, Jordão BQ. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Rev Saude Publica*. 2002;36(3):370–4.
2. Grill G, Lehner B, Thieme M, Geenen B, Tickner D, Antonelli F, et al. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*. 2019;569(7755):215–21.
3. Moore AA, Palmer MA. Invertebrate biodiversity in agricultural and urban headwater streams: implications for conservation and management. *Ecol Appl*. 2005;15(4):1169–77.
4. Moore MN, Depledge MH, Readman JW, Paul Leonard DR. An integrated biomarker-based strategy for ecotoxicological evaluation of risk in environmental management. *Mutat Res*. 2004;552:247–68.
5. Pelicice FM, Bialezki A, Camelier P, Carvalho FR, García-Berthou E, Pompeu PS, et al. Human impacts and the loss of neotropical freshwater fish diversity. *Neotrop Ichthyol*. 2021;19(3):1–15.
6. Paschoalini AL, Bazzoli N. Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquat Toxicol*. 2021;237:1–11.
7. Rand GM, Wells PG, Mccarty LS. Introduction to aquatic toxicology. In: RAND GM, editor. *Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment*. 2nd ed. Washington: Taylor & Francis; 1995. p. 3–66.
8. Costa CR, Olivi P, Botta CMR, Espindola ELG. A toxicidade em ambientes aquáticos: Discussão e métodos de avaliação. *Quim Nova*. 2008;31(7):1820–30.
9. Filippo R De. Impactos ambientais sobre os ecossistemas aquáticos. *Informe Agropecuário*. 2000;21(202):45–53.
10. Goulart MDC., Callisto M. Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental. *Revista da FAPAM*. 2003;2(1).
11. Langeani F, Castro RMC e, Oyakawa OT, Shibatta OA, Pavanelli CS, Casatti L. Diversidade da ictiofauna do Alto Rio Paraná : composição atual e perspectivas futuras. *Biota Neotrop*. 2007;7(3):181–97.
12. Baptista DF, Buss DF, Egler M. Macroinvertebrados como bioindicadores de ecossistemas aquáticos contaminados por agrotóxicos. In: Peres F, Moreira J, editors. *É veneno ou é remédio?: agrotóxicos, saúde e ambiente*. Rio de Janeiro: Fiocruz; 2003. p. 157–75.
13. Reis RE, Albert JS, Di Dario F, Mincarone MM, Petry P, Rocha LA. Fish biodiversity and conservation in South America. *J Fish Biol*. 2016;89(1):12–47.
14. de Andrade LC, Rodrigues LR, Andrezza R, Camargo FA de O. Lake guaíba: A historical and cultural analysis of water pollution in Porto Alegre, RS, Brazil. *Eng Sanit e Ambient*. 2019;24(2):229–37.
15. Clements WH. Integrating effects of contaminants across levels of biological organization: An overview. *J Aquat Ecosyst Stress Recover*. 2000;7(2):113–6.
16. Abdel-Moneim AM, Al-Kahtani MA, Elmenshawy OM. Histopathological biomarkers in gills and liver of *Oreochromis niloticus* from polluted wetland environments, Saudi Arabia. *Chemosphere*. 2012;88(8):1028–35.

17. Gazonato Neto AJ, Silva LC da, Saggio AA, Rocha O. Zooplankton communities as eutrophication bioindicators in tropical reservoirs. *Biota Neotrop*. 2014;14(4):1–12.
18. Ventura AS. Hematologia como biomarcador de contaminação ambiental em peixes. *Nutr Time*. 2015;12(6):4500–7.
19. Ribeiro NUF, Américo-Pinheiro JHP. Peixes como bioindicadores de agrotóxicos em ambientes aquáticos. *Rev Científica An Bras*. 2018;11(22):65–75.
20. Cerejeira MJ, Viana P, Batista S, Pereira T, Silva E, Valério MJ, et al. Pesticides in Portuguese surface and ground waters. *Water Res*. 2003;37(5):1055–63.
21. Arias ARL, Buss DF, De Albuquerque C, Inácio AF, Freire MM, Egler M, et al. Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. *Cienc e Saude Coletiva*. 2007;61–72.
22. Smith VH, Schindler DW. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol Evol*. 2009;24(4):201–7.
23. Markert B. Biomonitoring - Quo Vadis. *UWSF - Z Umweltchem Ökotox*. 1994;6(3):145–9.
24. Lins JAPN, Kirschnik PG, Queiroz V da S, Cirio SM. Uso de peixes como biomarcadores para monitoramento ambiental aquático. *Rev Acad Ciênc Agrár Ambient*. 2010;8(4):469–84.
25. Santos AR de J, Santos LH dos. Riqueza, abundância e distribuição temporal da anurofauna e levantamento da ictiofauna em uma área de reflorestamento no norte do Paraná. *Educ - Educ Soc e Meio Ambient Humait, Amaz Bras*. 2019;23(2):489–504.
26. Muñoz-Nájera MA, Barrera-Escorcia G, Ramírez-Romero P, Tapia-Silva FO, Rosas-Cedillo R. Heavy metal bioaccumulation in *Oreochromis niloticus* from Tenango Dam, Puebla, Mexico. *Environ Monit Assess*. 2018;190(280):1–11.
27. Depledge MH, Fossi MC. The role of biomarkers in environmental assessment (2). *Invertebrates. Ecotoxicology*. 1994;3:161–72.
28. van der Oost R, Beyer J, Vermeulen NPE. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2003;13:57–149.
29. Depledge MH, Amaral-Mendes JJ, Daniel B, Halbrook RS, Kloepper-Sams P, Moore MN, et al. The Conceptual Basis of the Biomarker Approach. In: Peakall DB, Shugart L., editors. *Biomarkers*. 68th ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1993. p. 15–29.
30. Livingstone DR. Biotechnology and pollution monitoring: Use of molecular biomarkers in the aquatic environment. *J Chem Technol Biotechnol*. 1993;57(3):195–211.
31. Viana AP, Frédou FL, Montes C da S, Rocha RM. Fish histopathology and catalase activity as biomarkers of the environmental quality of the industrial district on the Amazon estuary, Brazil. *Acta Sci - Biol Sci*. 2013;35(3):395–401.

32. Monserrat JM, Martínez PE, Geracitano LA, Lund Amado L, Martinez Gaspar Martins C, Lopes Leães Pinho G, et al. Pollution biomarkers in estuarine animals: Critical review and new perspectives. *Comp Biochem Physiol - C Toxicol Pharmacol.* 2007;146(1–2):221–34.
33. Melancon MJ. Bioindicators of contaminant exposure and effect in aquatic and terrestrial monitoring. In: Hoffman DJ, Rattner BA, Jr. GAB, Jr. JC, editors. *Handbook of Ecotoxicology, Second Edition.* 2nd ed. Boca Raton, FL: Lewis Publishers; 2003. p. 257–78.
34. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Biomarkers and risk assessment: Concepts and principles. In: *Environmental Health Criteria 155.* Geneva: World Health Organization; 1993. p. 12–3.
35. Committee on Biological Markers of the National Research Council (NRC). Biological markers in environmental health research. In: *Environmental Health Perspectives.* 1987. p. 3–9.
36. Akaishi FM, Silva De Assis HC, Jakobi SCG, Eiras-Stofella DR, St.-Jean SD, Courtenay SC, et al. Morphological and Neurotoxicological Findings in Tropical Freshwater Fish (*Astyanax* sp.) after Waterborne and Acute Exposure to Water Soluble Fraction (WSF) of Crude Oil. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2004;46(2):244–53.
37. Martinez CBRR, Cólus IMSS. Biomarcadores em peixes neotropicais para o monitoramento da poluição aquática na bacia do rio Tibagi. In: Medri ME, Bianchini E, Shibatta OA, Pimenta JA, editors. *A bacia do rio Tibagi. Londrina - Paraná;* 2002. p. 551–77.
38. Disner GR, Calado SLM, Silva Assis HC, Cestari MM. Toxicity of naphthalene in the Neotropical Fish *Astyanax Lacustris* (Characiformes: Characidae) and *Geophagus Brasiliensis* (Perciformes: Cichlidae). *Evidência - Ciência e Biotecnol.* 2017;17(1):7–22.
39. Tortelli V, Colares EP, Robaldo RB, Nery LEM, Pinho GLL, Bianchini A, et al. Importance of cholinesterase kinetic parameters in environmental monitoring using estuarine fish. *Chemosphere.* 2006;65(4):560–6.
40. Fossi MC. Nondestructive biomarkers in ecotoxicology. *Environ Health Perspect.* 1994;102:49–54.
41. Johnson RK, Wiederholm T, Rosenberg DM. Freshwater Biomonitoring Using Individual Organisms, Populations, and Species Assemblages of Benthic Macroinvertebrates. In: Rosenberg DM, Resh VH, editors. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates.* New York: Chapman & Hall; 1993. p. 40–158.
42. Füreder L, Reynolds JD. Is *Austropotamobius pallipes* a good bioindicator? *Bull Fr Pêche Piscic.* 2003;(370–371):157–63.
43. Hilty J, Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biol Conserv.* 2000;92(2):185–97.
44. Carvalho C dos S, Bernusso VA, Araújo HSS de, Espíndola ELG, Fernandes MN. Biomarker responses as indication of contaminant effects in *Oreochromis niloticus*. *Chemosphere.* 2012;89:60–9.
45. De La Torre FR, Ferrari L, Salibián A. Biomarkers of a native fish species

- (*Cnesterodon decemmaculatus*) application to the water toxicity assessment of a peri-urban polluted river of Argentina. *Chemosphere*. 2005;59(4):577–83.
46. Freitas CEC, Siqueira-Souza FK. O uso de peixes como bioindicador ambiental em áreas de várzea da bacia amazônica. *Revista Agrogeoambiental*. 2009;39–45.
  47. Chovanec A, Hofer R, Schiemer F. Fish as bioindicators. In: Markert BA, Breure AM, Zechmeister HG, editors. *Bioindicators and biomonitors*. Elsevier Science Ltd; 2003. p. 639–76.
  48. Vital JF, Varella AMB, Porto DB, Malta JC de O. Sazonalidade da fauna de metazoários de *Pygocentrus nattereri* (Kner, 1858) no lago Piranha (Amazonas, Brasil) e a avaliação de seu potencial como indicadora da saúde do ambiente. *Biota Neotrop*. 2011;11(1):199–204.
  49. Mackenzie K, Williams HH, Williams B, Mcvicar AH, Siddall R. Parasites as Indicators of Water Quality and the Potential Use of Helminth Transmission in Marine Pollution Studies. In: Baker JR, Muller R, Rollinson D, editors. *Advances in Parasitology*. Academic Press Limited; 1995. p. 85–144.
  50. Printes LB, Callaghan A. Intraclonal variability in *Daphnia* acetylcholinesterase activity: The implications for its applicability as a biomarker. *Environ Toxicol Chem*. 2003;22(9):2042–7.
  51. Viarengo A, Lowe D, Bolognesi C, Fabbri E, Koehler A. The use of biomarkers in biomonitoring: A 2-tier approach assessing the level of pollutant-induced stress syndrome in sentinel organisms. *Comp Biochem Physiol*. 2007;146(3):281–300.
  52. Calixto JB. Biodiversidade como fonte de medicamentos. *Cienc Cult*. 2003;55(3):37–9.
  53. Mittermeier RA, Fonseca GAB Da, Rylands AB, Brandon K. Uma breve história da conservação da biodiversidade no Brasil. *Megadiversidade*. 2005;1(1):14–21.
  54. Abell R, Thieme ML, Revenga C, Bryer M, Kottelat M, Bogutskaya N, et al. Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *Bioscience*. 2008;58(5):403–14.
  55. Serrão CRG, Pontes AN, Dantas KDGF, Filho HAD, Pereira JB, Nunes PO, et al. Biomonitoring metallic elements in freshwater fish of Amazon. *Rev Virtual Quim*. 2014;6(6):1661–76.
  56. Klemz C, Cristina da Silva de Assis H. Efeitos do endossulfano na atividade da acetilcolinesterase de cascudo (*Ancistrus multispinnis*, fish, teleostei). *Rev Acadêmica Ciência Anim*. 2005;3(4):51–8.
  57. Winkaler EU, Silva G, Galindo HC. Biomarcadores histológicos e fisiológicos para o monitoramento da saúde de peixes de ribeirões de Londrina, Estado do Paraná. *Acta Sci Biol Sci*. 2001;23(2):507–14.
  58. Vieira DB, Shibatta OA. Peixes como indicadores da qualidade ambiental do ribeirão Esperança, município de Londrina, Paraná, Brasil. *Biota Neotrop*. 2007;7(1):57–65.

59. Batista MTO, Junior ER, Feijó-Oliveira M, Ribeiro AC, Rodrigues E, Suda CNK, et al. Tissue levels of the antioxidant enzymes superoxide dismutase and catalase in fish *Astyanax bimaculatus* from the Una River Basin. *Rev Ambient e Agua*. 2014;9(4):621–31.
60. Nunes V de J, Jesus TB de. Determinação de metais pesados (Mn, Cd, Cr, Cu, Pb) em peixes das espécies *Astyanax bimaculatus*, *Hoplias malabaricus* e *Oreochromis niloticus* presente na Lagoa Salgada - Rio Subaé - Feira de Santana (Bahia). *Rev Bras Meio Ambient*. 2019;5(1):2–13.
61. Santos DCM dos, Matta SLP da, Oliveira JA de, Santos JAD dos. Histological alterations in gills of *Astyanax aff. bimaculatus* caused by acute exposition to zinc. *Exp Toxicol Pathol*. 2012 Nov;64(7–8):861–6.
62. Boeger WA, Guimarães ATB, Romão S, Ostrensky A, Zamberlan E, Falkiewicz FH. Histopathology as an Approach to Evaluate the Effect of an Oil Spill on Fishes of the Arroio Saldanha and Rio Iguaçu (Brazil). *Int Oil Spill Conf Proc*. 2003;(1):955–61.
63. Cristo NP de, Silva BR da, Moreira EG, Silva FC da. Avaliação ecotoxicológica da água do Igarapé 2 de Abril utilizando o lambari (*Astyanax sp*) como organismo bioindicador. *South Am J Basic Educ Tech Technol*. 2017;4(2):51–60.
64. Sousa DBP, Almeida ZS, Carvalho-Neta RNF. Biomarcadores histológicos em duas espécies de bagres estuarinos da Costa Maranhense, Brasil. *Arq Bras Med Vet e Zootec*. 2013;65(2):369–76.
65. Niencheski LF, Machado E da C, Silveira IMO, Montes M de JF. Metais traço em peixes e filtradores em quatro estuários da costa brasileira. *Trop Oceanogr*. 2014;42(1):94–106.
66. Santos IGS, Lira AS, Montes C da S, Frédoú FL, Rocha RM. Histopathological Biomarkers as Indicators of the Environmental Quality of Two Estuaries in Northeastern Brazil. *Res Sq*. 2021;1–26.
67. de Queiroz JV, Vieira JCS, de Oliveira G, Braga CP, da Cunha Bataglioli I, da Silva JM, et al. Identification of Biomarkers of Mercury Contamination in *Brachyplatystoma filamentosum* of the Madeira River, Brazil, Using Metalloproteomic Strategies. *Biol Trace Elem Res*. 2019;187:291–300.
68. Braga CP, Bittarello AC, Padilha CCF, Leite AL, Moraes PM, Buzalaf MAR, et al. Mercury fractionation in dourada (*Brachyplatystoma rousseauxii*) of the Madeira River in Brazil using metalloproteomic strategies. *Talanta*. 2014;(1–25):239–44.
69. Moraes PM, Santos FA, Padilha CCF, Vieira JCS, Zara LF, De M. Padilha P. A preliminary and qualitative metallomics study of mercury in the muscle of fish from amazonas, Brazil. *Biol Trace Elem Res*. 2012;150(1–3):195–9.
70. Dalzochio T, Ressel Simões LA, Santos de Souza M, Prado Rodrigues GZ, Petry IE, Andriguetti NB, et al. Water quality parameters, biomarkers and metal bioaccumulation in native fish captured in the Ilha River, southern Brazil. *Chemosphere*. 2017 Dec;189:609–18.
71. Dalzochio T, Rodrigues GZP, Simões LAR, de Souza MS, Petry IE, Andriguetti NB, et al. In situ monitoring of the Sinos River, southern Brazil: water quality

- parameters, biomarkers, and metal bioaccumulation in fish. *Environ Sci Pollut Res.* 2018 Apr 20;25(10):9485–500.
72. Barbieri E, Marinho D, Brusius BK. Bagre estuarino *Cathorops spixii* como bioindicador de metais pesados: um estudo de caso. In: Cordeiro CAM, Sampaio D de S, Holanda FCAF, editors. *Engenharia de Pesca: aspectos teóricos e práticos - Volume 3*. 1st ed. Guarujá - SP: Científica Digital; 2022. p. 105–16.
  73. Azevedo JS, Fernandez WS, Farias LA, Fávaro DTI, Braga ES. Use of *Cathorops spixii* as bioindicator of pollution of trace metals in the Santos Bay, Brazil. *Ecotoxicology.* 2009;18(5):577–86.
  74. Lima LBD de, Morais PB de, Andrade RLT de, Mattos LV, Moron SE. Use of biomarkers to evaluate the ecological risk of xenobiotics associated with agriculture. *Environ Pollut.* 2018;237:611–24.
  75. Barros B de C V., Pereira S d. FP, Palheta D da C, Silva C da S. Determinação de Cd, Cr e al em tecido de peixes provenientes do Rio Gelado/Apa, Floresta de Carajás-PA. *Holos Environ.* 2010;10(2):195–208.
  76. Sadauskas-Henrique H, Duarte RM, Gagnon MM, Almeida-Val VMF. Validation of a suite of biomarkers of fish health in the tropical bioindicator species, tambaqui (*Colossoma macropomum*). *Ecol Indic.* 2017;73:443–51.
  77. Weber P, Behr ER, Knorr CDL, Vendruscolo DS, Flores EMM, Dressler VL, et al. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchem J.* 2013;106:61–6.
  78. Tupinambás T, Pompeu P, Gandini C, Hughes R, Callisto M. Fish stomach contents in benthic macroinvertebrate assemblage assessments. *Brazilian J Biol.* 2015;75(1):157–64.
  79. Bücken A, Carvalho W, Alves-Gomes JA. Avaliação de mutagenicidade e gentotoxicidade em *Eigenmannia virescens* (Teleostei: Gymnotiformes) exposto to benzene. *Acta Amaz.* 2006;36(3):357–64.
  80. Morado CN, Araújo FG, Gomes ID. The use of biomarkers for assessing effects of pollutant stress on fish species from a tropical river in Southeastern Brazil. *Acta Sci - Biol Sci.* 2017;39(4):431–9.
  81. Morado CN, Parente TEM, Araújo FG, Paumgarten FJR, Gomes ID. Induced CYP1A activity and DNA damage in fish from the middle Paraíba do Sul River Basin, southeastern Brazil. *Acta Sci - Biol Sci.* 2018;40(1).
  82. Doria HB, Voigt CL, Campos SX de, Randi MAF. Metal pollution assessment in a Brazilian hydroelectric reservoir: *Geophagus brasiliensis* as a suitable bioindicator organism. *Rev Ambient e Agua.* 2017;12(4):575–90.
  83. Lacerda D, Vergilio C dos S, da Silva Souza T, Viana Costa LH, Rangel TP, Vaz de Oliveira BC, et al. Comparative metal accumulation and toxicogenetic damage induction in three neotropical fish species with distinct foraging habits and feeding preferences. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020;195(1–9).
  84. Romão S, Donatti L, Freitas MO, Teixeira J, Kusma J. Blood parameter analysis and morphological alterations as biomarkers on the health of *Hoplias malabaricus* and *Geophagus brasiliensis*. *Brazilian Arch Biol Technol.* 2006;49(3):441–8.

85. Rodrigues KFS, Smith WS. Assessment of potentially toxic metals in water, sediment, and the tissues of seven important fish species from neotropical brazilian river. *Neotrop Ichthyol.* 2022;20(4):1–16.
86. Miranda AL, Roche H, Randi MAF, Menezes ML, Ribeiro CAO. Bioaccumulation of chlorinated pesticides and PCBs in the tropical freshwater fish *Hoplias malabaricus*: Histopathological, physiological, and immunological findings. *Sci Direct Environmental Int.* 2008;34:939–49.
87. De Jesus IS, Da Silva Medeiros RL, Cestari MM, De Almeida Bezerra M, De Mello Affonso PRA. Analysis of metal contamination and bioindicator potential of predatory fish species along Contas River basin in northeastern Brazil. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2014;92(5):551–6.
88. Cruz C, Silva AF, Shiogiri NS, Garlich N, Pitelli RA. Imazapyr herbicide efficacy on floating macrophyte control and ecotoxicology for non-target organisms. *Planta Daninha.* 2015;33(1):103–8.
89. da Silva AF, Carraschi SP, Gírio ACF, Neto AN, da Cruz C, Pitelli RA. Ecotoxicity of vinasse for fish tetra-serpae (*Hyphessobrycon eques*) and macrophyte duckweed (*Lemna minor*). *Bol do Inst Pesca.* 2015;41(3):557–65.
90. Florêncio T, Carraschi SP, Da Cruz C, Da Silva AF, Marques AM, Pitelli RA. Neotropical bioindicators of ecotoxicity and environmental risk of drugs with aquaculture interest. *Bol do Inst Pesca.* 2014;40(4):569–76.
91. Amadeo RM, Godinho JP, Ghisi N de C, Oliveira EC. Histopatologias em tecido hepático do peixe cascudo *Hypostomus ancistroides* (Ihering, 1911) como indicadores de contaminação aquática no rio Pirapó. *Semin Iniciação Científica e Tecnol da UTFPR.* 2013;
92. Glusczak L, Loro VL, Pretto A, Moraes BS, Raabe A, Duarte MF, et al. Acute exposure to glyphosate herbicide affects oxidative parameters in piava (*Leporinus obtusidens*). *Arch Environ Contam Toxicol.* 2011;61(4):624–30.
93. Viana AP, Frédoú FL, Frédoú T. Measuring the ecological integrity of an industrial district in the Amazon estuary, Brazil. *Mar Pollut Bull.* 2012;64(3):489–99.
94. Viana A, Lucena Frédoú F. Ichthyofauna as bioindicator of environmental quality in an industrial district in the amazon estuary, Brazil. *Brazilian J Biol.* 2014;74(2):315–24.
95. Stragliotto LKD, Paz FS da, Paz DS da, Tchaicka L, Neta RNFC, Sousa DBP. Genotoxic Biomarkers in Fishes of the Chapada Das Mesas National Park, Brazil. *Natl Park - Manag Conserv.* 2018;
96. Rodrigues APC, Castilhos ZC, Silva LCCP da, Albuquerque C, Inácio AF, Agostini LN, et al. Avaliação de risco ecológico em ecossistemas aquáticos contaminados por mercúrio. Estudo de caso: Netuma barba (*Lacepède, 1803*) (*Siluriformes, Ariidae*), Ilha das Enxadas, Baía de Guanabara, RJ. *Mineralis.* Rio de Janeiro: CETEM/MCTI; 2003. p. 11.
97. Barrilli GHC, Rocha O, Negreiros NF, Verani JR. Influence of environmental quality of the tributaries of the Monjolinho River on the relative condition factor (Kn) of the local ichthyofauna. *Biota Neotrop.* 2015;15(1):1–9.
98. Godefroid RS, Cassio R. Utilização dos peixes do rio Bacacheri como

- indicadores da qualidade ambiental. *Rev Meio Ambient e Sustentabilidade*. 2015;8(4):99–114.
99. Araújo FG, Morado CN, Parente TTE, Paumgartten FJR, Gomes ID. Biomarkers and bioindicators of the environmental condition using a fish species (*Pimelodus maculatus* Lacepède, 1803) in a tropical reservoir in Southeastern Brazil. *Brazilian J Biol*. 2018;78(2):351–9.
  100. Alves GHZ, Tófoli RM, Ganassin MJM, Hahn NS. Diet of *Poecilia reticulata* peters, 1959 in streams from Paraná River basin: Influence of the urbanization. *Acta Sci - Biol Sci*. 2016;38(3):313–8.
  101. Stringuetti C, Guilhermino L, Silva EM. Cholinesterase Activity in the Head of Wild *Poecilia reticulata* from Bahia, Brazil: Biochemical Characterization, Effects of Sample Storage and Normal Range of Activity. *J Brazilian Soc Ecotoxicol*. 2008;3(1):57–63.
  102. Silva LD, Rosa EV, Santos SC, Sabóia-Morais SMT de. Análise morfológica do epitélio de revestimento branquial do guaru (*Poecilia vivipara*) exposto a frações do extrato da folha e casca do caule de pequi (*Caryocar brasiliensis*). *Arq Ciências da Saúde da Unipar*. 2002;6(3):101–6.
  103. Winkaler EU, Santos TRM, Machado-Neto JG, Martinez CBR. Acute lethal and sublethal effects of neem leaf extract on the neotropical freshwater fish *Prochilodus lineatus*. *Comp Biochem Physiol*. 2007;145:236–44.
  104. Lunardelli B, Cabral MT, Vieira CED, Oliveira LF, Risso WE, Meletti PC, et al. Chromium accumulation and biomarker responses in the Neotropical fish *Prochilodus lineatus* caged in a river under the influence of tannery activities. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2018;153:188–94.
  105. Modesto KA, Martinez CBR. Roundup® causes oxidative stress in liver and inhibits acetylcholinesterase in muscle and brain of the fish *Prochilodus lineatus*. *Chemosphere*. 2010;78:294–9.
  106. Schulz UH, Martins-Junior H. *Astyanax fasciatus* as bioindicator of water pollution of Rio dos Sinos, RS, Brazil. *Brazilian J Biol*. 2001;61(4):615–22.
  107. Sinhorin VDG, Sinhorin AP, Teixeira JM dos S, Miléski KML, Hansen PC, Moreira PSA, et al. Effects of the acute exposition to glyphosate-based herbicide on oxidative stress parameters and antioxidant responses in a hybrid Amazon fish surubim (*Pseudoplatystoma* sp). *Ecotoxicol Environ Saf*. 2014;106:181–7.
  108. Silva SF da, Oliveira DC, Pereira JPG, Castro SP, Costa BNS, Lima M de O. Seasonal variation of mercury in commercial fishes of the Amazon Triple Frontier, Western Amazon Basin. *Ecol Indic*. 2019;106:1–8.
  109. Miron D dos S, Moraes B, Becker AG, Crestani M, Spanevello R, Loro VL, et al. Ammonia and pH effects on some metabolic parameters and gill histology of silver catfish, *Rhamdia quelen* (Heptapteridae). *Aquaculture*. 2008;277:192–6.
  110. de Menezes CC, Loro VL, da Fonseca MB, Cattaneo R, Pretto A, Miron D dos S, et al. Oxidative parameters of *Rhamdia quelen* in response to commercial herbicide containing clomazone and recovery pattern. *Pestic Biochem Physiol*. 2011;100(2):145–50.
  111. Ferreira D, Motta AC da, Kreutz LC, Toni C, Loro VL, Barcellos LJG.

- Assessment of oxidative stress in *Rhamdia quelen* exposed to agrichemicals. *Chemosphere*. 2010;79(9):914–21.
112. Savassi LA, Paschoalini AL, Arantes FP, Rizzo E, Bazzoli N. Heavy metal contamination in a highly consumed Brazilian fish: immunohistochemical and histopathological assessments. *Environ Monit Assess*. 2020;192(542):1–14.
  113. Dórea JG, Barbosa AC, Souza J, Fadini P, Jardim WF. Piranhas (*Serrasalmus* spp.) as markers of mercury bioaccumulation in Amazonian ecosystems. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2004;59(1):57–63.
  114. da Silva Montes C, Pantoja Ferreira MA, Giarrizzo T, Amado LL, Rocha RM. Evaluation of metal contamination effects in piranhas through biomonitoring and multi biomarkers approach. *Heliyon*. 2020;6(8):1–10.
  115. Borges AC, Da Silva Montes C, Barbosa LA, Ferreira MAP, Berrêdo JF, Martins Rocha R. Integrated use of histological and ultrastructural biomarkers for assessing mercury pollution in piranhas (*Serrasalmus rhombeus*) from the Amazon mining region. *Chemosphere*. 2018;202:788–96.
  116. Melo JN de, Santana JR de, Silva GF da. Ciência , tecnologia e inovação no brasil : uma análise inter-regional por meio de indicadores. *Rev Bras Gestão e Desenvol Reg*. 2019;15(1):76–90.
  117. Mowery DC, Sampat BN. *Universities in National Innovation Systems*. Oxford Handb Innov. 2009;1–38.
  118. Agostinho AA, Gomes LC, Suzuki HI, Júlio Jr. HF. Migratory Fishes of the Upper Pará River Basin, Brazil. In: *Migratory Fishes of South America: Biology, Fisheries and Conservation Status*. 2003. p. 19–98.
  119. Castro RMC e, Arcifa MS. Comunidades de peixes de reservatórios no sul do Brasil. *Rev Bras Biol*. 1987;47(4):493–500.
  120. Agostinho AA, Jr. HFJ. Peixes da Bacia do Alto Rio Paraná. In: Lowe-McConnell RH, editor. *Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; 1999. p. 374–400.
  121. Pereira LHG, Hanner R, Foresti F, Oliveira C. Can DNA barcoding accurately discriminate megadiverse Neotropical freshwater fish fauna? *BMC Genet*. 2013;14(20):1–14.
  122. Albert JS, Reis RE. Introduction to Neotropical Freshwaters. In: Albert JS, Reis RE, editors. *Historical Biogeography of Neotropical Freshwater Fishes*. University of California Press; 2011. p. 3–16.
  123. Arrifano GPF, Martín-Doimeadios RCR, Jiménez-Moreno M, Ramírez-Mateos V, da Silva NFS, Souza-Monteiro JR, et al. Large-scale projects in the amazon and human exposure to mercury: The case-study of the Tucuruí Dam. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2018;147:299–305.
  124. Rabitto I da S, Bastos WR, Almeida R, Anjos A, de Holanda ÍBB, Galvão RCF, et al. Mercury and DDT exposure risk to fish-eating human populations in Amazon. *Environ Int*. 2011;37:56–65.
  125. Gorayeb A, Lombardo MA, Pereira LCC. Condições Ambientais em Áreas Urbanas da Bacia Hidrográfica do Rio Caeté – Amazônia Oriental - Brasil. *Rev*

- Gestão Costeira Integr. 2009;9(2):59–70.
126. Gama C de S, Silva LMA da. Bioaccumulation of mercury in predatory fish from Amapá State, Brazil. *Rev Arq Científicos*. 2021;3(2):120–8.
  127. Dórea JG, Barbosa AC, Silva GS. Fish mercury bioaccumulation as a function of feeding behavior and hydrological cycles of the Rio Negro, Amazon. *Comp Biochem Physiol Part C Toxicol Pharmacol*. 2006;142(3–4):275–83.
  128. Bastos WR, Gomes JPO, Oliveira RC, Almeida R, Nascimento EL, Bernardi JVE, et al. Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *Sci Total Environ*. 2006;368(1):344–51.
  129. Hinton JJ, Veiga MM. The influence of organic acids on mercury bioavailability: Insight from an earthworm assessment protocol. *Environ Bioindic*. 2008;3:47–67.
  130. de Queiroz JV, Cavecci-Mendonça B, Vieira JCS, Martins RA, de Almeida Assunção AS, Cavallini NG, et al. Metalloproteomic Strategies for Identifying Proteins as Biomarkers of Mercury Exposure in *Serrasalmus rhombeus* from the Amazon Region. *Biol Trace Elem Res*. 2021;199(2):712–20.
  131. Viana AP, Lucena Frédou F, Frédou T, Torres MF, Bordalo AO. Fish fauna as an indicator of environmental quality in an urbanised region of the Amazon estuary. *J Fish Biol*. 2010;76:467–86.
  132. Fitzsimmons KM. Tilapia : the most important aquaculture species of the 21st century. In: *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tilapia Aquaculture*. 2000. p. 3–8.
  133. El-Sayed AFM. *Tilapia culture*. Tilapia Culture. [place unknow]: CABI Publishing; 2006. 277 p.
  134. Popma T, Masser M. *Tilapia Life History and Biology*. South Reg Aquac Cent. 1999;(283).
  135. Souza F de, Tozzo RA. *Poecilia reticulata* Peters 1859 (Cyprinodontiformes, Poeciliidae) Como Possível Bioindicador De Ambientes Degradados. *Rev Meio Ambient e Sustentabilidade*. 2013;3(2):162–75.
  136. Graça WJ da, Pavanelli CS. *Peixes da Planície de Inundação do Alto Rio Paraná e Áreas Adjacentes*. Maringá: Editora da Universidade Estadual de Maringá; 2007. 235 p.
  137. Oliveira DC de, Bennemann ST. Ictiofauna, recursos alimentares e relações com as interferências antrópicas em um riacho urbano no sul do Brasil. *Biota Neotrop*. 2005;5(1):95–107.
  138. Widianarko B, Van Gestel CAM, Verweij RA, Van Straalen NM. Associations between trace metals in sediment, water, and guppy, *Poecilia reticulata* (Peters), from urban streams of Semarang, Indonesia. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2000;46(1):101–7.
  139. Lizama MDLAP, Zavaski F, Santos Junior HM, Florêncio GA dos S, Petrolí MLC, Angelo GL del. Uso de peixes como indicadores biológicos? O estudo destes animais para o monitoramento dos recursos hídricos dentro da área das ciências ambientais. *Open Sci Res*. 2022;413–26.
  140. Stagg RM, Shuttleworth TJ. The accumulation of copper in *Platichthys flesus* L.

and its effects on plasma electrolyte concentrations. *J Fish Biol.* 1982;20(4):491–500.

141. Fanta E, Rios FS, Romão S, Vianna ACC, Freiburger S. Histopathology of the fish *Corydoras paleatus* contaminated with sublethal levels of organophosphorus in water and food. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2003;54:119–30.
142. Feranti JPS, Guimarães LD, De Oliveira MT, Hartmann HF, De Souza FW, Corrêa LFD, et al. Celioscopic liver biopsy in silver catfish (*Rhamdia quelen*). *Pesqui Vet Bras.* 2015;35(1):19–22.