

# Avaliação da contaminação por metais e metaloides em águas superficiais do rio Pirapó, Estado do Paraná (PR), Brasil, e seus riscos ambientais e à saúde humana

## Assessment of metal and metallcoid contamination in surface waters of the Pirapó river, Paraná State (PR), Brazil, and its environmental and human health risks

## Evaluación de la contaminación por metales y metaloides en aguas superficiales del río Pirapó Estado de Paraná (PR), Brasil y sus riesgos ambientales y para la salud humana

Recebido: 11/12/2025 | Revisado: 18/12/2025 | Aceitado: 18/12/2025 | Publicado: 19/12/2025

**Natalia Frimmel Gavino**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4897-2155>  
Universidade Cesumar, Brasil  
E-mail: frimmelnatalia@gmail.com

**Giulia Boito Reyes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5337-1011>  
Universidade Cesumar, Brasil  
E-mail: giuliano18@gmail.com

**José Roberto Bello**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5823-1288>  
Biologic Consultoria Ambiental LTDA, Brasil  
E-mail: jrbello@gmail.com

**Emilly Christiny dos Santos Rosa**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3963-0008>  
Universidade Cesumar, Brasil  
E-mail: christinyemilly.10@gmail.com

**Maria de los Angeles Perez Lizama**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9714-9383>  
Universidade Cesumar, Brasil  
E-mail: maria.lizama@unicesumar.edu.br

**José Eduardo Gonçalves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2505-0536>  
Universidade Cesumar, Brasil  
E-mail: jose.goncalves@unicesumar.edu.br

## Resumo

A contaminação por metais e metaloides constitui uma das principais ameaças aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana, especialmente em bacias hidrográficas sujeitas a intensas atividades urbanas, industriais e agrícolas. Neste estudo, avaliou a presença e os níveis de metais na água superficial e em tecidos de peixes do rio Pirapó (PR), utilizando espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). As amostras foram coletadas em seis pontos estrategicamente selecionados de acordo com o grau de interferência antrópica ao longo da bacia. Os elementos analisados (Al, As, Hg, Zn, Se, Pb, Cd, Ni, Co, Mn, Fe, Cr e Cu) foram quantificados após digestão ácida por micro-ondas e comparados com valores orientadores nacionais e internacionais. Os resultados revelaram concentrações elevadas de metais tóxicos, com destaque para arsênio, mercúrio, selênio, cobalto e manganês, sobretudo nos peixes, indicando potencial risco à saúde humana. Esses achados demonstram a influência de fontes antrópicas sobre a qualidade ambiental do rio Pirapó e reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas públicas voltadas à mitigação da contaminação metálica na região.

**Palavras-chave:** Elementos contaminantes; Contaminação hídrica; Peixes; Avaliação de risco; ICP-MS.

## Abstract

Heavy metal and metalloid contamination is one of the major threats to aquatic ecosystems and human health, particularly in river basins affected by urban, industrial, and agricultural activities. In this study, we assessed the presence and concentration of metals in surface water and fish tissues from the Pirapó River Basin (Paraná, Brazil), using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Samples were collected at six strategically selected sites representing different levels of anthropogenic influence. The analyzed elements (Al, As, Hg, Zn, Se, Pb, Cd, Ni, Co, Mn, Fe, Cr, and Cu) were quantified after acid digestion and compared with national and international guideline values. The results revealed elevated concentrations of toxic metals, especially arsenic, mercury, selenium, cobalt, and manganese in fish tissues, indicating potential human health risks associated with fish consumption. These findings

highlight the influence of anthropogenic sources on the environmental quality of the Pirapó River and reinforce the need for continuous monitoring and public policies aimed at mitigating metal contamination in the region.

**Keywords:** Contaminating elements; Water contamination; Fish; Risk assessment; ICP-MS.

### Resumen

La contaminación por metales y metaloides constituye una de las principales amenazas para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, especialmente en cuencas hidrográficas sometidas a intensas actividades urbanas, industriales y agrícolas. En este estudio, se evaluó la presencia y los niveles de metales en el agua superficial y en tejidos de peces del río Pirapó (PR), mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Las muestras se recolectaron en seis puntos estratégicamente seleccionados según el grado de interferencia antrópica a lo largo de la cuenca. Los elementos analizados (Al, As, Hg, Zn, Se, Pb, Cd, Ni, Co, Mn, Fe, Cr y Cu) fueron cuantificados tras digestión ácida por microondas y comparados con valores de referencia nacionales e internacionales. Los resultados revelaron concentraciones elevadas de metales tóxicos, con énfasis en arsénico, mercurio, selenio, cobalto y manganeso, especialmente en los peces, lo que indica un potencial riesgo para la salud humana. Estos hallazgos demuestran la influencia de fuentes antrópicas sobre la calidad ambiental del río Pirapó y refuerzan la necesidad de un monitoreo continuo y de políticas públicas orientadas a la mitigación de la contaminación metálica en la región.

**Palabras clave:** Elementos contaminantes; Contaminación hídrica; Peces; Evaluación de riesgo; ICP-MS.

## 1. Introdução

A disponibilidade de água doce de qualidade é um fator chave para a sustentabilidade ecológica e o bem-estar humano, sendo essencial para o consumo, agricultura, indústria e conservação dos ecossistemas aquáticos. No entanto, a crescente pressão sobre os corpos d'água, sobretudo em países em desenvolvimento, compromete sua qualidade e disponibilidade (Debnath *et al.*, 2021).

A bacia do rio Pirapó sustenta serviços ecossistêmicos essenciais no Noroeste do Paraná, especialmente o abastecimento público de água para Maringá e municípios vizinhos, além de usos agrícolas e industriais. Em bacias brasileiras com mosaicos rural, periurbano e urbano, pressões difusas e pontuais tendem a degradar a qualidade hídrica, com respostas detectáveis nas variáveis físico-químicas e na carga de contaminantes, o que torna indispensável o monitoramento sistemático em corpos hídricos destinados ao consumo humano (Brasil, 2005).

Metais tóxicos como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn possuem múltiplas fontes antrópicas, incluindo efluentes domésticos e industriais, lixiviação agrícola e desgaste de pavimentos. Em sistemas lóticos e lênticos, a biodisponibilidade resulta de processos de partição entre água e sedimento, modulados por pH, matéria orgânica e granulometria, e a bioacumulação em peixes varia entre tecidos, espécies e posições tróficas, com destaque para o mercúrio em predadores piscívoros (Mello *et al.*, 2020; Paschoalini & Bazzoli, 2021).

Estima-se que cerca de 70% dos recursos hídricos em países em desenvolvimento estejam contaminados por efluentes domésticos e industriais. Para avaliar o grau de poluição, são utilizados indicadores físico-químicos e microbiológicos. Em casos mais avançados, analisa-se a presença de poluentes específicos, como metais pesados, pesticidas e fármacos (Debnath *et al.*, 2021).

Embora mais de 11 milhões de substâncias químicas sejam conhecidas, apenas uma fração delas é regulada por normas de potabilidade, o que agrava a exposição da população a compostos nocivos, como os metais pesados. Ainda que possam ter origem natural, como em processos geológicos e atmosféricos, a principal fonte de entrada desses contaminantes nos corpos hídricos é antrópica, envolvendo atividades como mineração, uso excessivo de insumos agrícolas e despejo de efluentes industriais e domésticos (Saravanan *et al.*, 2024).

Esses metais apresentam propriedades que os tornam especialmente perigosos: são persistentes, não se degradam, acumulam-se nos organismos e podem se biomagnificar ao longo das cadeias tróficas, gerando efeitos adversos mesmo em ecossistemas distantes de sua origem (Sheikhzadeh & Hamidian, 2021). A avaliação da contaminação pode ser feita por meio de

bioindicadores, organismos que respondem a alterações ambientais em níveis genômico, bioquímico, fisiológico ou ecológico (Leite *et al.*, 2021).

No ambiente aquático, peixes são frequentemente utilizados para avaliar a bioacumulação de metais, que tendem a se acumular em diferentes tecidos, como músculos, fígado, rins e brânquias, dependendo de suas propriedades químicas e da qualidade da água (Moiseenko & Gashkina, 2020). Fatores como pH, salinidade, concentração de íons e presença de matéria orgânica influenciam diretamente na biodisponibilidade desses metais, afetando a sua absorção pelos organismos.

A exposição prolongada pode provocar alterações morfológicas e bioquímicas, disfunções metabólicas, produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) e estresse oxidativo. Além disso, metais como Al, Cd, Cu e Pb atuam como disruptores endócrinos, interferindo na sinalização hormonal e representando riscos reprodutivos aos organismos aquáticos (Paschoalini & Bazzoli, 2018).

Apesar da relevância regional do Pirapó para o abastecimento público, ainda são escassos estudos recentes que integrem água, sedimento e tecidos de peixes com padronização analítica e comparação explícita aos padrões legais. Este trabalho contribui preenchendo parte dessa lacuna, quantificando um conjunto abrangente de elementos em múltiplas matrizes ao longo de um gradiente de uso do solo, e discutindo mecanismos de biodisponibilidade e bioacumulação à luz do arcabouço regulatório vigente (Mello *et al.*, 2020; Brasil, 2005; Brasil, 2022).

Este estudo avaliou a presença e os níveis de metais na água superficial e em tecidos de peixes do rio Pirapó (PR, Brasil), utilizando espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS).

## 2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa mista, parte em campo, parte laboratorial num estudo de natureza quantitativa (Pereira *et al.*, 2018) e com uso de estatística descritiva simples com classes de dados e, valores de média (Shitsuka *et al.*, 2014).

### 2.1 Caracterização da área amostral

A Bacia Hidrográfica do rio Pirapó possui uma área aproximada de 5.096,86 km<sup>2</sup> e abrange, total ou parcialmente, 33 municípios do Estado do Paraná. A população residente em sua área de abrangência é estimada em cerca de 950 mil habitantes (Instituto Água e Terra, 2020). O rio Pirapó nasce no município de Apucarana, a uma altitude de 863 metros, e percorre 168 km até desaguar no rio Paranapanema, no município de Jardim Olinda, a 321 metros de altitude (Da Graça & Silveira, 2020).

A demanda hídrica da bacia é de aproximadamente 3.000 litros por segundo, sendo que 75% desse volume provém de mananciais superficiais e os demais 25% de fontes subterrâneas (Instituto Água e Terra, 2020). Em relação aos principais usos da água, destacam-se os setores industrial (43%), abastecimento público (38%), agricultura (10%), pecuária (9%) e mineração (1%) (Instituto Água e Terra, 2020).

A bacia apresenta intensa atividade antrópica, especialmente nas regiões central e sul, onde se localizam importantes polos urbanos e industriais, como os municípios de Maringá e Apucarana. A cobertura do solo é predominantemente agrícola, com extensas áreas de agricultura intensiva, pastagens artificiais e campos naturais. Na porção sul da bacia, predomina o uso misto do solo, com forte presença de áreas urbanas e industriais (Instituto Água e Terra, 2020).

### 2.2 Delineamento amostral

Foram definidos 6 pontos amostrais distribuídos longitudinalmente, da nascente à foz, de montante a jusante, cobrindo gradientes de uso do solo e influência antrópica. O ponto P1 (23°33'27.59"S 51°31'29.80"O), localizado na nascente, no município de Apucarana (PR), caracteriza-se por vegetação ripária rala e descontínua, composta por capoeiras e gramíneas, com remanescentes secundários da Mata Atlântica em regeneração. A cobertura vegetal limitada e a proximidade de áreas agrícolas

e urbanas já indicam pressão ambiental nas porções de cabeceira. Essa pressão intensifica-se nos pontos intermediários (P2, 23°27'13.04"S 51°33'20.57"O e P3, 23°19'24.89"S 51°50'1.61"O), situados próximos às rodovias PR-444 e PR-454, em trechos com uso predominante do solo para agricultura intensiva. Nessas áreas, a vegetação ciliar é estreita e fragmentada, com contato direto entre as margens e as lavouras, o que favorece o escoamento superficial de sedimentos e contaminantes agrícolas para o corpo hídrico.

Nos pontos situados a jusante (P4, 23°18'16.78"S 51°53'37.05"O e P5, 22°54'31.61"S 52°5'40.70"O) e P6 (22°33'3.47"S 52° 1'41.94"O), observa-se um cenário de impacto cumulativo, resultado da combinação de atividades agrícolas, urbanas e industriais. O ponto P4, próximo à rodovia PR-317 e à zona industrial de Iguaçu, reflete forte influência antrópica, com margens estreitas e potencial aporte de efluentes industriais e domésticos. O ponto P5, em área rural entre Paranacity e Colorado, apresenta margens fortemente degradadas por lavouras mecanizadas, enquanto o ponto P6, na foz do rio Pirapó, em Jardim Olinda, representa o trecho terminal da bacia, com ocupação mista urbana e agrícola. Nesse local, a vegetação ripária é descontínua e o uso intensivo do solo contribui para o aporte difuso de sedimentos, nutrientes e metais ao rio Paranapanema, evidenciando a vulnerabilidade ambiental da bacia como um todo.

### 2.3 Amostras e coletas

Em cada ponto, foram coletados 3 frascos de 1 L de água superficial em garrafas de polietileno previamente limpas e enxaguadas com água ultrapura. As amostras foram mantidas em recipientes térmicos com gelo a 4 °C até o laboratório e mantidas em freezer até o momento da extração.

O sedimento foi coletado com draga tipo Van Veen, amostrando a camada superficial de 0 a 5 cm. Em cada ponto, três alíquotas independentes foram transferidas para bandeja plástica limpa, homogeneizada e subamostradas em triplicata para frascos de polietileno estéreis com volume aproximado de 200 g. No laboratório, as amostras foram homogeneizadas e secas em estufa com a temperatura média de 40 °C até gerar uma massa constante. Após esse processo as amostras foram pulverizadas com a utilização de almofariz e pistilo de porcelana. Na sequência, foram peneiradas com a utilização de um agitador de peneiras eletromagnética e peneira granulométrica de malha 62 µm, onde as fases de maior granulometria como cascalhos e areia foram descartadas. As amostras com sedimento peneirado foram acondicionadas em sacos plásticos até o momento da extração dos metais.

Os peixes foram capturados com tarrafa de malha 2,4 cm entre nós não adjacentes, aplicando esforço variável por ponto até atingir o número mínimo de indivíduos por espécie para as análises. Os indivíduos foram anestesiados e eutanasiados conforme normas de bem-estar animal utilizando benzocaína a 10%, medidos quanto ao comprimento total e massa, e dissecados para retirada de músculo epaxial, sem pele, e brânquias. As amostras foram acondicionadas em recipientes rotulados e congeladas a  $\leq -20$  °C até a digestão ácida. As espécies capturadas e seus hábitos alimentares foram listados para interpretação dos resultados.

As amostras foram coletadas mediante autorização SISBIO nº 51570-4 do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, utilizando a metodologia de eutanásia autorizada pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (nº 005/2021) da Universidade Cesumar (Unicesumar), através das diretrizes sugeridas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA).

### 2.4 Análise de Elementos (metais e metaloides) nas amostras

Para recuperação dos elementos nas amostras, foram utilizados 2 mL de água, 300 mg de sedimento ou 300 mg de tecido de peixe. Em seguida, foram digeridos utilizando 5 mL da mistura na proporção de 3:1 de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  em um acessório digestor no extrator assistido por micro-ondas (DGT 100 Plus, Provecto Analítica). A programação utilizada foi: 1<sup>a</sup> etapa: 2 min

a 200 W, 2<sup>a</sup> etapa: 8 min a 400 W e 3<sup>a</sup> etapa: 10 min a 600 W. As concentrações dos elementos alumínio (Al), arsênio (As), mercúrio (Hg), zinco (Zn), selênio (Se), chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), manganês (Mn), ferro (Fe), cromo (Cr) e cobre (Cu) foram determinadas utilizando um espectrômetro de massas por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS, Agilent 7700e). Para a análise foi preparada uma curva de calibração nas seguintes concentrações: 0,01 mg L<sup>-1</sup>, 0,05 mg L<sup>-1</sup>, 0,5 mg L<sup>-1</sup>, 0,8 mg L<sup>-1</sup> e 1 mg L<sup>-1</sup> a partir de um padrão puro de cada metal analisado. Para eliminar o efeito de matriz, foi utilizada uma solução aquosa com 5% de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio como branco (Leite *et al.*, 2021).

## 2.5 Solventes, padrões e análises

Todos os padrões, solventes e reagentes utilizados no trabalho foram de grau analítico ou adequados ao método espectrofotométrico. Todas as soluções aquosas utilizadas neste estudo foram preparadas com água ultra purificada obtida a partir do sistema de ultrapurificação Satorius Arium® Mini Ultrapure Water System.

## 2.6 Avaliação de Risco

### 2.6.1 Avaliação de risco associado à ingestão diária

A ingestão diária humana estimada (IDEH) para cada metal detectado em água superficial foi calculada seguindo a metodologia descrita por Wang *et al.* (2020) e Luo *et al.* (2018), usando a equação:

$$E_{IN} = \frac{C \times V}{W}$$

onde  $E_{IN}$  representa a ingestão diária humana estimada (mg/kg/dia), C é a concentração de cada metal em água superficial (mg/L), V é a ingestão diária de água (L/dia) e W é o peso corporal médio. Para este estudo, o peso corporal assumido foi de 70 kg para adultos ( $> 18$  anos), com valor correspondente de consumo diário de água de 2,25 L (homem 2,5 L e mulher 2,0 L), conforme recomendado para a população brasileira (Wang *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2018; EFSA, 2012; EFSA, 2010).

### 2.6.2 Quociente de risco

O quociente de risco (QR) foi calculado como a razão entre ingestão diária humana estimada ( $E_{IN}$ ) e a dose de referência (RfD), sendo um valor fixo para cada metal (Brasil, 2004; WHO, 2004; HC, 2008; US EPA, 2009; US EPA, 2010).

$$QR = \frac{E_{IN}}{RfD}$$

### 2.6.3 Índice de perigo

O índice de perigo foi calculado a partir das ingestões diárias humanas estimadas ( $E_{IN}$ ) de cada ponto e a dose de referência (RfD) para cada metal.

$$IP = \frac{E_{IN1} \times E_{IN2} \times E_{IN3} \times E_{IN4} \times E_{IN5} \times E_{IN6}}{RfD}$$

## 3. Resultados e Discussão

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam uma avaliação relevante da toxicidade potencial do pescado destinado ao consumo humano. De acordo com a Instrução Normativa nº 160, de 1º de julho de 2022, da Agência Nacional de Vigilância

Sanitária (ANVISA), que estabelece os limites máximos de contaminantes inorgânicos em alimentos, as concentrações determinadas para os metais analisados no músculo dos peixes permaneceram dentro dos valores permitidos: arsênio (1,0 mg/kg), cádmio (0,05 mg/kg), chumbo (0,30 mg/kg) e mercúrio (1,0 mg/kg para espécies predadoras e 0,50 mg/kg para não predadoras). Ressalta-se que, segundo a legislação brasileira vigente, os demais elementos apresentados na Tabela 1 ainda não possuem valores de referência regulamentados para a carne de pescado, embora sua presença mereça atenção em futuras revisões normativas, dada a crescente preocupação com contaminantes emergentes.

Embora o pescado seja comumente consumido eviscerado, a análise em brânquias representa um importante marcador da qualidade do ambiente aquático. As concentrações dos elementos se encontram um pouco mais elevadas quando comparadas ao músculo, pois este órgão apresenta maior tendência de acumulação de contaminantes (Agbugui, 2022).

Dentre os limites estabelecidos pelo CONAMA para águas superficiais de classe II, as concentrações de Al, As, Hg (exceto no ponto 2), Se, Pb, Cd (exceto pontos 1 e 2), Ni (exceto pontos 1 e 2), Co (exceto ponto 1), Mn (exceto ponto 1), Cr (apenas pontos 5 e 6) e Cu (exceto ponto 1), encontram-se elevadas. Já os elementos Zinco e Ferro se encontram em quantidades normais, apesar de representarem uma grande parcela dos metais nas 4 amostras, o que se deve à composição química do solo da região norte e noroeste do estado do Paraná.

A alta concentração de elementos encontrada nas amostras de sedimento e água em todos os pontos, evidencia que não só os grandes centros urbanos são responsáveis pelo lançamento de poluentes inorgânicos e orgânicos através do descarte de efluentes domésticos e industriais, como também a intensa atividade agrícola com uso de pesticidas ao longo das margens do rio Pirapó têm interferido na qualidade do ambiente aquático.

A bioacumulação ao longo das teias tróficas se inicia tanto por meio da respiração, quanto pela ingestão alimentar dos organismos aquáticos. Diversos organismos bentônicos se alimentam de espécies presentes no sedimento, e posteriormente, servem de alimento para peixes de níveis tróficos superiores, e dessa forma, acontece a transferência desses elementos pela cadeia alimentar (Leite *et al*, 2024). É possível observar esse efeito nas amostras de brânquias e músculo dos pontos 3, 4 e 5 para o elemento cromo e em todos os pontos para os elementos cobalto e selênio. Apesar de o níquel e o mercúrio apresentarem resultados acima do limite, não foi observado o efeito de bioacumulação.

**Tabela 1** - Concentração dos elementos detectados pelo ICP-MS em amostras de peixes, sedimento e água superficial nos pontos de amostragem do Rio Pirapó, no ano de 2025.

Elemento	Músculo (mg Kg <sup>-1</sup> )						Brânquia (mg Kg <sup>-1</sup> )						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	LMT
<b>Al</b>	4,33	3,92	2,68	1,67	2,15	2,97	6,22	6,09	3,44	2,97	2,86	3,18	
<b>As</b>	0,025	0,018	0,022	0,02	0,023	0,031	0,042	0,055	0,052	0,048	0,046	0,051	1,0
<b>Hg</b>	0,09	0,09	0,05	0,05	0,17	0,13	0,12	0,08	0,07	0,1	0,11	0,08	1,0/0,50
<b>Zn</b>	0,78	0,75	0,93	1,05	1,12	1,08	1,03	1,51	1,77	1,95	1,83	1,64	
<b>Se</b>	0,5	0,8	0,79	0,53	0,51	0,49	0,77	0,95	0,66	0,55	0,52	0,52	
<b>Pb</b>	0,014	0,018	0,014	0,017	0,021	0,012	0,01	0,012	0,017	0,016	0,023	0,011	0,30
<b>Cd</b>	0,005	0,007	0,01	0,009	0,008	0,008	0,007	0,01	0,011	0,01	0,009	0,009	0,05
<b>Ni</b>	0,007	0,009	0,012	0,02	0,019	0,015	0,014	0,019	0,027	0,031	0,025	0,019	
<b>Co</b>	0,11	0,1	0,51	0,85	0,29	0,17	0,16	0,22	0,84	1,21	0,35	0,19	
<b>Mn</b>	0,36	0,48	0,59	0,65	0,49	0,49	0,44	0,53	0,77	0,69	0,53	0,58	
<b>Fe</b>	6,38	6,79	6,65	8,43	7,33	5,02	6,33	6,22	9,29	9,51	4,64	5,41	
<b>Cr</b>	0,02	0,07	0,08	0,11	0,08	0,07	0,02	0,08	0,1	0,15	0,12	0,07	
<b>Cu</b>	0,012	0,018	0,029	0,033	0,027	0,025	0,013	0,02	0,035	0,045	0,03	0,027	

  

Elemento	Sedimento (mg Kg <sup>-1</sup> )						Água Superficial (mg L <sup>-1</sup> )						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	LMT
<b>Al</b>	3,33	6,19	7,91	5,91	5,34	5,21	3,04	3	3,11	5,34	5,21	5,07	0,2
<b>As</b>	0,051	0,062	0,074	0,057	0,089	0,043	0,042	0,055	0,052	0,048	0,046	0,041	0,033
<b>Hg</b>	0,004	0,005	0,005	0,006	0,004	0,003	0,003	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002
<b>Zn</b>	3,87	4,15	4,9	4,67	3,94	3,97	0,065	0,08	0,09	0,12	0,17	0,13	5,0
<b>Se</b>	0,25	0,63	0,59	0,92	0,75	0,66	0,14	0,21	0,62	0,83	0,58	0,6	0,05
<b>Pb</b>	0,58	1,33	1,77	1,27	1,7	1,23	0,05	0,09	0,094	0,085	0,095	0,067	0,033
<b>Cd</b>	0,42	0,5	0,75	0,99	0,92	0,98	0,009	0,01	0,012	0,011	0,013	0,015	0,01
<b>Ni</b>	0,65	1,11	1,23	1,6	1,31	1	0,015	0,021	0,026	0,033	0,045	0,028	0,025
<b>Co</b>	0,52	0,6	0,89	0,95	0,76	0,53	0,2	0,33	0,5	0,65	0,42	0,38	0,2
<b>Mn</b>	0,75	0,92	0,89	0,98	0,62	0,36	0,44	0,53	0,77	0,69	0,53	0,58	0,5
<b>Fe</b>	4,15	4,55	3,99	4,67	3,94	2,02	1,21	0,87	0,92	2,77	2,68	2,75	5,0
<b>Cr</b>	0,5	0,64	0,71	0,31	0,87	0,52	0,04	0,05	0,04	0,05	0,19	0,06	0,05
<b>Cu</b>	0,21	0,28	0,37	0,34	0,41	0,24	0,011	0,015	0,018	0,027	0,016	0,018	0,013

P= ponto de coleta; LMT = Limite Máximo Tolerado.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre, seus íons são liberados por processos naturais, como erosão e intemperismo, além de atividades antrópicas. Após a absorção, é amplamente distribuído pelo organismo, com maior acúmulo em ossos, fígado, rins e cérebro. A eliminação ocorre principalmente por via renal, e sua depuração é significativamente reduzida em indivíduos com doença renal crônica, o que favorece o acúmulo e a toxicidade (Coulson & Hughes, 2022). Apresenta resultados altíssimos em amostras de peixe, sedimento e água, o que pode ser característico do solo da região, o que também explica a maior concentração de manganês, já que este tem origem na litosfera (Debnath *et al.*, 2021).

A exposição ao arsênio ocorre principalmente através de água contaminada que contém uma grande concentração deste elemento. Atualmente é classificado como cancerígeno pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer, e, devido aos efeitos adversos para a saúde humana, a Organização Mundial da Saúde o reconhece como um dos dez poluentes químicos de maior relevância para a saúde pública global (Vergara-Gerónimo *et al.*, 2021). Os níveis de arsênio nas 4 amostras, apesar de estarem

pouco acima do valor de referência, não representam um risco pontual à saúde. O chumbo representa uma das maiores ameaças à saúde humana e animal (Rivera-Valdivia *et al.*, 2021) e sua concentração se encontra quase três vezes acima do recomendado pelo CONAMA, sendo um ponto de preocupação nos resultados devido à baixíssima taxa de excreção pelo organismo humano e à capacidade de se acumular no tecido cerebral, renal, hepático e ósseo (Charkiewicz & Backstrand, 2020).

Apesar de o Fe, Zn, Cu serem essenciais para o equilíbrio da saúde humana e possuírem vias de metabolização, a ingestão de quantidades altíssimas desses elementos podem causar intoxicações e culminar em neoplasias, doenças do sistema nervoso, esquelético, reprodutor, entre outros (Brewer, 2010; Margaritis, *et al.*, 2021; Leite *et al.*, 2016). No presente trabalho, não foram evidenciados níveis alarmantes de zinco, apenas de ferro nas amostras de peixe dos pontos 3 e 4, que estão quase o dobro acima do recomendado pelo CONAMA, o que pode estar relacionado com o hábito alimentar das espécies capturadas (Agbugui, 2022) e pequenos desvios para o elemento cobre, o que está diretamente relacionado com a aplicação de fertilizantes e pesticidas (Debnath *et al.*, 2021)

O cádmio possui efeitos altamente tóxicos para os seres humanos, que afetam diversos órgãos (Johri *et al.*, 2010). Embora não tenha sido observado o efeito de biomacumulação, sua concentração em sedimento ultrapassou o limite em quase cem vezes o permitido nos pontos 4, 5 e 6. Como descrito em Espirilla & Gómez, 2022, este elemento apresenta concentração elevada nos sedimentos fluviais de várias partes do mundo, sendo particularmente adicionado através das atividades antrópicas ou emissões vulcânicas.

Os valores de ingestão humana estimada ( $E_{IN}$ ) para metais e metaloides presentes na água superficial e em peixes (brânquia e músculo) do rio Pirapó estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Para a água superficial, o cálculo foi estimado para um adulto de 70 kg que consome em média 2,25 L de água por dia (2,5 L para homens e 2,0 L para mulheres). No caso dos peixes, as concentrações utilizadas no cálculo do  $E_{IN}$  e do quociente de perigo (QP) foram obtidas a partir da média aritmética entre os valores determinados nos tecidos de brânquias e músculo, refletindo uma estimativa integrada da carga metálica potencialmente ingerida pelo consumidor. O quociente de perigo (QP) representa a relação entre a exposição humana a determinado composto e o nível no qual não são esperados efeitos adversos. Valores de QP superiores a 1,0 indicam potencial para efeitos adversos à saúde, enquanto valores inferiores a 1,0 sugerem ausência de risco significativo.

A Tabela 2 evidencia que a água superficial da bacia do rio Pirapó apresenta um quadro preocupante de exposição humana a metais e metaloides. Embora elementos como Al, Zn, Fe, Cr e Cu apresentem quocientes de perigo (QP) inferiores a 1, indicando ausência de risco significativo com base nos valores orientadores vigentes, outros elementos ultrapassam de forma expressiva esse limite regulatório, destacando-se As e Se, cujos  $QP > 1$  revelam potencial concreto para efeitos adversos à saúde humana.

**Tabela 2** – Avaliação de risco para as amostras de água superficial [mg L<sup>-1</sup>].

COMPOSTO	PONTO	MÉDIA	$E_{IN}$	QP	RfD	IP	VMP
Al	P1	3,04	0,097	0,097	1	0,796	0,2
	P2	3,00	0,096	0,096			
	P3	3,11	0,099	0,099			
	P4	5,34	0,171	0,171			
	P5	5,21	0,167	0,167			
	P6	5,07	0,162	0,162			
As	P1	0,042	0,0013	4,50	0,0003	30,42	0,01
	P2	0,055	0,0017	5,89			
	P3	0,052	0,0016	5,57			
	P4	0,048	0,0015	5,14			
	P5	0,046	0,0014	4,92			
	P6	0,041	0,0013	4,39			
Hg	P1	0,003	9,64E-5	0,32	0,0003	2,03	0,001

	P2	0,002	6,42E-5	0,21			
	P3	0,004	0,0001	0,42			
	P4	0,004	0,0001	0,42			
	P5	0,003	9,64E-5	0,32			
	P6	0,003	9,64E-5	0,32			
	P1	0,065	0,0020	0,0069			
Zn	P2	0,08	0,0025	0,0085	0,3	0,07	5
	P3	0,09	0,0028	0,0096			
	P4	0,12	0,0038	0,0128			
	P5	0,17	0,0054	0,0182			
	P6	0,13	0,0041	0,0139			
	P1	0,14	0,0045	0,90			
Se	P2	0,21	0,0067	1,35	0,005	19,15	0,04
	P3	0,62	0,0199	3,98			
	P4	0,83	0,0266	5,33			
	P5	0,58	0,0186	3,72			
	P6	0,60	0,0192	3,85			
	P1	0,05	0,0016	0,44			
Pb	P2	0,09	0,0028	0,80	0,0036	3,53	0,01
	P3	0,094	0,0030	0,83			
	P4	0,085	0,0027	0,75			
	P5	0,095	0,0030	0,84			
	P6	0,067	0,0021	0,59			
	P1	0,009	0,0002	0,57			
Cd	P2	0,010	0,0003	0,64	0,0005	4,5	0,003
	P3	0,012	0,0003	0,77			
	P4	0,011	0,0003	0,70			
	P5	0,013	0,0004	0,83			
	P6	0,015	0,0004	0,96			
	P1	0,015	0,0004	0,024			
Ni	P2	0,021	0,0006	0,033	0,02	0,27	0,07
	P3	0,026	0,0008	0,041			
	P4	0,033	0,0010	0,053			
	P5	0,045	0,0014	0,072			
	P6	0,028	0,0009	0,045			
	P1	0,2	0,0064	0,107			
Co	P2	0,33	0,010	0,176	0,06	1,32	0,07
	P3	0,5	0,016	0,267			
	P4	0,65	0,020	0,348			
	P5	0,42	0,013	0,225			
	P6	0,38	0,012	0,203			
	P1	0,44	0,014	0,30			
Mn	P2	0,53	0,017	0,37	0,046	2,47	0,1
	P3	0,77	0,024	0,53			
	P4	0,69	0,022	0,48			
	P5	0,53	0,017	0,37			
	P6	0,58	0,018	0,40			
	P1	1,21	0,038	0,129			
Fe	P2	0,87	0,027	0,093	0,3	1,2	0,3
	P3	0,92	0,029	0,098			
	P4	2,77	0,089	0,296			
	P5	2,68	0,086	0,287			
	P6	2,75	0,088	0,294			
	P1	0,04	0,0012	0,0008			
Cr	P2	0,05	0,0016	0,0010	1,5	0,0092	0,05
	P3	0,04	0,0012	0,0008			
	P4	0,05	0,0016	0,0010			

	P5	0,19	0,0061	0,0040			
	P6	0,06	0,0019	0,0012			
Cu	P1	0,011	0,0003	0,0088	0,04	0,08	2
	P2	0,015	0,0004	0,0120			
	P3	0,018	0,0005	0,0144			
	P4	0,027	0,0008	0,0216			
	P5	0,016	0,0005	0,0128			
	P6	0,018	0,0005	0,0144			

\*E<sub>IN</sub> – Ingestão diária humana estimada; QP – Quociente de perigo; RfD – Dose de referência; IP – Índice de perigo; VMP – Valor máximo permitido; Al – Alumínio; As – Arsênio; Hg – Mercúrio; Zn – Zinco; Se – Selênio; Pb - ; Cd – Cádmio; Ni – Níquel; Co – Cobalto; Mn - Manganês; Fe – Ferro; Cr – Cromo; Cu – Cobre.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Quando analisado o índice de perigo (IP), que integra a exposição cumulativa aos seis pontos amostrais, os resultados tornam-se ainda mais críticos: As, Hg, Se, Pb, Cd, Co, Mn e Fe excedem o valor de referência de 1, indicando risco não apenas pontual, mas persistente e sistemático ao longo do rio. Esse comportamento sugere que processos antrópicos difusos como atividades agrícolas, efluentes urbanos e industriais, permanecem como fontes contínuas de aporte desses contaminantes. Além disso, o fato de metais prioritários para a saúde pública, como arsênio e chumbo, ultrapassarem limites de segurança mesmo em água bruta reforça a necessidade de estratégias urgentes de controle de fontes e monitoramento ampliado.

A ingestão diária humana estimada (E<sub>IN</sub>) foi comparada com as doses de referência estabelecidas. Para as amostras de água (Tabela 2), os metais Al, Zn, Fe, Cr e Cu apresentaram valores abaixo dos limites permitidos. Nas amostras de peixe (Tabela 3), apenas Al e Cr se mantiveram abaixo do limite recomendado.

Os resultados apresentados na Tabela 3 revelam que o risco associado ao consumo de peixes é substancialmente maior que aquele decorrente da ingestão de água superficial. Embora Al e Cr apresentem QP < 1 em todos os pontos, indicando ausência de risco direto, praticamente todos os demais metais e metalóides ultrapassam essa referência, muitos deles em proporções extremamente elevadas como As e Hg, cujo QP supera 1000, e Se, Co, Mn e Fe, que também excedem amplamente os valores de segurança. Estes resultados demonstram forte bioacumulação ao longo da teia trófica e confirmam que o pescado constitui a principal via de exposição humana aos elementos tóxicos na bacia do Pirapó.

Considerando as concentrações médias observadas e sua comparação com os valores máximos permitidos, verificou-se que, nas amostras de água superficial, os metais Zn e Cu encontram-se abaixo dos limites regulatórios. Para as amostras de peixe, Zn e Fe foram os únicos metais que permaneceram abaixo dos valores máximos permitidos.

**Tabela 3** – Avaliação de risco para as amostras de peixes [mg Kg<sup>-1</sup>] (média entre músculo e brânquias).

COMPOSTO	PONTO	MÉDIA	E <sub>IN</sub>	QP	RfD	IP	VMP
Al	P1	5,27	0,79	0,79	1	3,80	1
	P2	5,21	0,78	0,78			
	P3	3,88	0,58	0,58			
	P4	3,65	0,54	0,54			
	P5	3,59	0,53	0,53			
	P6	3,75	0,56	0,56			
As	P1	2,18	0,32	1093	0,0003	6568,5	1
	P2	2,19	0,32	1096,2			
	P3	2,19	0,32	1095,5			
	P4	2,18	0,32	1094,5			
	P5	2,18	0,32	1094			
	P6	2,19	0,32	1095,2			
Hg	P1	2,22	0,33	1112,5	0,0003	6635	0,5
	P2	2,20	0,33	1102,5			
	P3	2,20	0,33	1100			

	P4	2,21	0,33	1107,5			
	P5	2,22	0,33	1110			
	P6	2,20	0,33	1102,5			
Zn	P1	2,68	0,40	1,34	0,3	8,92	40
	P2	2,92	0,43	1,46			
	P3	3,05	0,45	1,52			
	P4	3,14	0,47	1,57			
	P5	3,08	0,46	1,54			
	P6	2,98	0,44	1,49			
Se	P1	2,55	0,38	76,5	0,005	449,25	-
	P2	2,64	0,39	79,2			
	P3	2,49	0,37	74,85			
	P4	2,44	0,36	73,2			
	P5	2,42	0,36	72,7			
	P6	2,42	0,36	72,7			
Pb	P1	2,17	0,32	90,41	0,0036	452,56	0,3
	P2	2,17	0,32	90,45			
	P3	2,17	0,32	90,56			
	P4	2,17	0,32	90,54			
	P5	2,17	0,32	90,68			
	P6	2,17	0,32	90,43			
Cd	P1	2,16	0,32	650,55	0,0005	3905,4	0,05
	P2	2,17	0,32	651			
	P3	2,17	0,32	651,15			
	P4	2,17	0,32	651			
	P5	2,16	0,32	650,85			
	P6	2,16	0,32	650,85			
Ni	P1	2,17	0,32	16,29	0,02	97,93	-
	P2	2,17	0,32	16,30			
	P3	2,17	0,32	16,33			
	P4	2,18	0,32	16,35			
	P5	2,17	0,32	16,33			
	P6	2,17	0,32	16,30			
Co	P1	2,24	0,33	5,61	0,06	36,18	-
	P2	2,27	0,34	5,68			
	P3	2,58	0,38	6,46			
	P4	2,77	0,41	6,92			
	P5	2,34	0,35	5,85			
	P6	2,26	0,33	5,65			
Mn	P1	2,38	0,35	7,77	0,046	48,13	-
	P2	2,43	0,36	7,92			
	P3	2,55	0,38	8,31			
	P4	2,51	0,37	8,18			
	P5	2,43	0,36	7,92			
	P6	2,45	0,36	8,00			
Fe	P1	5,33	0,79	2,66	0,3	16,84	42
	P2	5,27	0,79	2,63			
	P3	6,81	1,02	3,40			
	P4	6,92	1,03	3,46			
	P5	4,48	0,67	2,24			
	P6	4,87	0,73	2,43			
Cr	P1	2,17	0,32	0,21	1,5	1,32	0,05
	P2	2,20	0,33	0,22			
	P3	2,21	0,33	0,22			
	P4	2,24	0,33	0,22			
	P5	2,22	0,33	0,22			
	P6	2,20	0,33	0,22			

Cu	P1	2,17	0,32	8,14	0,04	49,03	0,1
	P2	2,17	0,32	8,15			
	P3	2,18	0,32	8,18			
	P4	2,18	0,32	8,20			
	P5	2,18	0,32	8,17			
	P6	2,17	0,32	8,16			

\*EN – Ingestão diária humana estimada; QP – Quociente de perigo; RfD – Dose de referência; IP – Índice de perigo; VMP – Valor máximo permitido; Al – Alumínio; As – Arsênio; Hg – Mercúrio; Zn – Zinco; Se – Selênio; Pb - ; Cd – Cádmio; Ni – Níquel; Co – Cobalto; Mn - Manganês; Fe – Ferro; Cr – Cromo; Cu – Cobre.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O índice de perigo (IP) reflete esse cenário de forma ainda mais contundente, pois todos os metais analisados apresentam valores acima de 1, caracterizando risco elevado e generalizado. A magnitude do IP sugere que mecanismos de biomagnificação estão ativos, especialmente para arsênio e mercúrio, cujo acúmulo em tecidos de peixe é consistente com sua natureza persistente e alta afinidade por proteínas sulfuradas. Assim, o consumo contínuo desses organismos representa uma via crítica de exposição, particularmente para populações ribeirinhas e comunidades que dependem do pescado como fonte regular de proteína.

#### 4. Conclusão

Os resultados obtidos evidenciaram a presença de elementos contaminantes (metais e metaloides) com reconhecido potencial tóxico tanto nos sedimentos, nos tecidos dos peixes e na água do rio Pirapó, indicando influência direta das atividades agrícolas, urbanas e industriais ao longo da bacia. Os elementos arsênio, mercúrio, selênio, cobalto, manganês, chumbo e cádmio apresentaram valores de QP e IP superiores a 1, demonstrando risco significativo à saúde humana, especialmente pela ingestão de pescado, que se destacou como a principal via de exposição. A magnitude dos índices calculados sugere a ocorrência de bioacumulação e, possivelmente, biomagnificação para alguns desses contaminantes, reforçando a vulnerabilidade das comunidades que dependem do pescado como fonte alimentar.

Essas evidências ressaltam a necessidade urgente de ampliação do monitoramento ambiental na bacia do rio Pirapó, aliado a ações de mitigação voltadas ao controle das fontes de contaminação. Os resultados também fornecem subsídios essenciais para a formulação de políticas públicas de gestão hídrica e de proteção à saúde humana, incluindo vigilância sanitária, fiscalização de efluentes e estratégias de educação ambiental. Além disso, reforçam a importância da realização de estudos complementares envolvendo especiação metálica, avaliação de risco carcinogênico e biomarcadores de toxicidade em organismos aquáticos. Em conjunto, os achados destacam que a manutenção da integridade ambiental do rio Pirapó é fundamental para garantir a qualidade da água, a segurança alimentar e a preservação dos serviços ecossistêmicos associados ao sistema aquático regional.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq: Processo nº 309838/2022-3, José Eduardo Gonçalves), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Paraná - Brasil e às contribuições de pesquisa do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICETI) e da Universidade Cesumar (Unicesumar).

#### Referências

- Agbugui, M. O., & Abe, G. O. (2022). Heavy metals in fish: Bioaccumulation and health. *British Journal of Earth Sciences Research*, 10(1), 47–66. <https://doi.org/10.37745/bjesr.2013>.
- Brasil. (2004). *Resolução CONAMA nº 344, de 25 de março de 2004*. Estabelece diretrizes para avaliação de materiais dragados. Diário Oficial da União. Recuperado em 18 outubro, 2025, de <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res04/res34404.xml>.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2005). *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais*.

Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2022). *Instrução Normativa nº 160, de 1º de julho de 2022. Limites máximos tolerados de contaminantes em alimentos*.

Brewer, G. J. (2010). Risks of copper and iron toxicity during aging in humans. *Chemical Research in Toxicology*, 23(2), 319–326.

Charkiewicz, A. E., & Backstrand, J. R. (2020). Lead toxicity and pollution in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1–14.

Coulson, J. M., & Hughes, B. W. (2022). Dose-response relationships in aluminium toxicity in humans. *Clinical Toxicology*, 60(4), 415–428.

Graça, C. H. da, & Silveira, H. (2020). Vulnerabilidade à contaminação das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapó, Paraná. *Revista do Departamento de Geografia*, 40, 175–190. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2020.162662>.

Debnath, A., Singh, P. K., & Sharma, Y. C. (2021). Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation. *Journal of Environmental Management*, 113378.

European Food Safety Authority (EFSA). (2012). *Guidance on selected default values to be used in the absence of measured data*. Recuperado em 05 outubro, 2025, de <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2012.2579>

European Food Safety Authority (EFSA). (2010). *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for water*. Recuperado em 10 outubro, 2025, de <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2010.1459>.

Espírrila, A. T., & Gómez, T. B. P. (2022). Distribution and assessment of the environmental risk of heavy metals in Aguada Blanca reservoir, Peru. *Ambiente & Água*, 17(4), e2838.

Johri, N., Jacquot, G., & Unwin, R. (2010). Heavy metal poisoning: The effects of cadmium on the kidney. *Biometals*, 23(5), 769–782.

Leite, C. E., et al. (2024). Biodisponibilidade de metais em sedimentos e peixes em áreas agrícolas e urbanas do rio Pirapó: toxicidade potencial e monitoramento ambiental. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*.

Leite, L. A. R., et al. (2016). Contracaecum sp. parasitizing *Acestrorhynchus lacustris* as a bioindicator for metal pollution in the Batalha River, southeast Brazil. *Science of the Total Environment*, 571, 1230–1239.

Leite, L. A. R., Pedreira Filho, W. R., Azevedo, R. K., & Abdallah, V. D. (2021). Patterns of distribution and accumulation of trace metals in parasites and fish hosts in neotropical rivers. *Environmental Pollution*, 277.

Luo, Q., Liu, Z., Yin, H., Dang, Z., Wu, P., Zhu, N., Lin, Z., & Liu, Y. (2018). Migration and potential risk of trace phthalates in bottled water: A global situation. *Water Research*, 147, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>.

Margaritis, K., Margioulia-Siarkou, G., Giza, S., Kotanidou, E. P., Tsinopoulou, V. R., Christoforidis, A., & Galli-Tsinopoulou, A. (2021). Micro-RNA implications in type-1 diabetes mellitus: A review of literature. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12165. <https://doi.org/10.3390/ijms222212165>.

Mello, K., Taniwaki, R. H., Paula, F. R., Valente, R. A., Randhir, T. O., Macedo, D. R., Leal, C. G., Rodrigues, C. B., & Hughes, R. M. (2020). Multiscale land-use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 270, 110879.

Moiseenko, T. I., & Gashkina, N. A. (2020). Distribution and bioaccumulation of heavy metals (Hg, Cd and Pb) in fish: Influence of the aquatic environment and climate. *Environmental Research Letters*, 15, 115013.

Paschoalini, A. L., & Bazzoli, N. (2021). Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquatic Toxicology*, 237, 105906.

Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. (Free ebook). Santa Maria. Editora da UFSM.

Rivera-Valdivia, N., Arteaga-Rivera, K., Reyes-Guanes, J., Neira-Segura, N., & de-la-Torre, A. (2021). Severe sequelae in bilateral acute iris transillumination syndrome secondary to the use of oral moxifloxacin: A case report. *Journal of Medical Case Reports*, 15(1), 462. <https://doi.org/10.1186/s13256-021-03075-y>.

Saravanan, P., Saravanan, V., Rajeshkannan, R., Arnica, G., Rajasimman, M., Baskar, G., & Pugazhendhi, A. (2024). Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: Sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. *Environmental Research*, 258, 119440. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119440>.

Sheikhzadeh, H., & Hamidian, A. H. (2021). Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(10), 3749–3869.

Shitsuka, R. et al. (2014). Matemática fundamental para a tecnologia. (2ed). Editora Érica.

Vergara-Gerônimo, C. A., et al. (2021). Arsenic-protein interactions as a mechanism of arsenic toxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 431, 115738.

Wang, H., Liu, Z. H., Tang, Z., Zhang, J., Yin, H., Dang, Z., Wu, P., & Liu, Y. (2020). Bisphenol analogues in Chinese bottled water: Quantification and potential risk analysis. *Science of the Total Environment*, 713, 136583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136583>.