



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

EDINALDO DE SOUZA MENDES

**AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DA ÁGUA POR CONTAMINANTES
METÁLICOS EM *Danio rerio* NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PEDREIRA, AMAPÁ: UMA ABORGEM NO ENSINO DE QUÍMICA**

Macapá-AP

2026

EDINALDO DE SOUZA MENDES

**AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DA ÁGUA POR CONTAMINANTES
METÁLICOS EM *Danio rerio* NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PEDREIRA, AMAPÁ: UMA ABORDAGEM NO ENSINO DE QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Licenciatura em Química da Universidade Federal do
Amapá, como requisito para conclusão de curso.

Orientador: Dr. Alexandro Cezar Florentino

Macapá-AP

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP
Elaborado por Cristina Fernandes – CRB-2 / 1569

Mendes, Edinaldo de Souza.
M538a Avaliação ecotoxicológica da água por contaminantes metálicos em *Danio rerio* na bacia hidrográfica do Rio Pedreira, Amapá: uma abordagem no ensino de Química / Edinaldo de Souza Mendes. - Macapá, 2026.
1 recurso eletrônico.
50 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Licenciatura em Química, Macapá, 2026.
Orientador: Alexandro Cezar Florentino.

Modo de acesso: World Wide Web.
Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Toxicologia ambiental. 2. *Danio rerio*. 3. Ensino de Química. I. Florentino, Alexandro Cezar, orientador. II. Universidade Federal do Amapá. III. Título.

CDD 23. ed. – 540

MENDES, Edinaldo de Souza. **Avaliação ecotoxicológica da água por contaminantes metálicos em *Danio rerio* na bacia hidrográfica do Rio Pedreira, Amapá:** uma abordagem no ensino de Química. Orientador: Alexandro Cezar Florentino. 2026. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

BANCA EXAMINADORA

Aluno(a): Edinaldo de Souza Mendes

Orientador(a): Professor Doutor Alexandro Cezar Florentino

Dr. Alexandro Cezar Florentino
Presidente

Professor Titular do Curso de Química da Universidade Federal do Amapá, UNIFAP.

Ma. Cassiane da Silva Videira
Membro Titular

Universidade Federal do Amapá, UNIFAP.

Ma. Izabelle Alexandra Rodrigues Lacerda
Membro Titular

Universidade Federal do Amapá, UNIFAP.

Data de aprovação 26/02/2026

DEDICATÓRIA

Para meus professores, orientadores e ao colegiado de química, para meus familiares, para meus amigos, para meus colegas, para minha eterna mãe Maria Mesanta cujo carrego sua memória comigo.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa a consolidação de uma importante etapa da minha formação acadêmica, marcada por desafios, aprendizados e crescimento pessoal. Dessa forma, expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que este trabalho fosse concluído.

Inicialmente, agradeço ao professor orientador Alexandro Cezar Florentino, pela orientação criteriosa, dedicação, disponibilidade e contribuições fundamentais ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Seus conhecimentos, sugestões e acompanhamento constante foram essenciais para o amadurecimento científico e para a construção deste estudo., agradeço pelas valiosas contribuições, apoio técnico e científico, bem como pela disponibilidade em colaborar para o aprimoramento desta pesquisa.

Aos professores do curso, manifesto minha gratidão pelos ensinamentos transmitidos, pelo compromisso com a formação acadêmica e pelo incentivo ao pensamento crítico e científico, que foram indispensáveis para minha trajetória universitária.

Aos colegas de curso e aos colegas de laboratório, agradeço pela convivência, pelas trocas de conhecimentos, pelo apoio mútuo e pela colaboração ao longo das atividades acadêmicas e experimentais. O companheirismo e o trabalho coletivo tornaram essa caminhada mais enriquecedora e significativa.

Aos amigos e companheiro, agradeço pelo incentivo, pelas palavras de apoio e pela compreensão nos momentos de ausência e dedicação aos estudos. A amizade e o encorajamento foram fundamentais para manter a motivação durante esta etapa.

De maneira especial, agradeço à minha família, pelo suporte, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Em especial, presto uma homenagem à minha mãe, Maria Mesanta (in memoriam), cuja presença, ensinamentos e amor permanecem vivos em minha memória e foram fundamentais para a construção de quem sou.

Por fim, agradeço à Universidade Federal por sempre ter me oferecido o apoio necessário ao longo da minha trajetória acadêmica, disponibilizando estrutura, oportunidades e condições que foram fundamentais para minha formação e para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 A QUÍMICA AMBIENTAL NO BRASIL.....	16
2.2 CONTAMINANTES AMBIENTAIS NA ÁGUA.....	17
2.3 O PEIXE ZEBRA COMO MODELO EM TOXICOLOGIA AMBIENTAL	18
2.3.1 Genotoxicidade e Reparo no DNA.....	18
2.3.2 Estudo Toxicológico.....	19
2.3.3 Teste de Micronúcleo e Alterações Nucleares.....	19
2.3.4 Embriotoxicidade.....	19
2.3.5 Toxicidade de Sedimentos Contaminados.....	20
2.4 ABORDAGEM DIDÁTICA E O ENSINO DE QUÍMICA AMBIENTAL	20
3. OBJETIVOS.....	21
3.1 OBJETIVO GERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 ÁREA DE ESTUDO	21
4.2 COLETA E ANÁLISE DE ÁGUA	22
4.3 ENSAIO DE TOXICIDADE EM PEIXES ADULTOS	24
4.4 ENSAIO DE EMBRIOTOXICIDADE	26
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	28
4.6 PROPOSTA DIDÁTICA	28
4.6.1 Análise e Extração de Dados do TCC.....	29
4.6.2 Desenvolvimento da Proposta Didática 1.....	29
4.6.3 Desenvolvimento da Proposta Didática 2.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	30
5.2 BIOENSAIO COM ZEBRAFISH ADULTO	32
5.3 EMBRIOTOXICIDADE.....	36
5.4 A IMPORTÂNCIA DA TOXICOLOGIA NO ENSINO DE QUÍMICA	38

6. CONCLUSÃO	39
7. REFERÊNCIAS	41
APÊNDICES.....	48
APÊNDICE A – PROPOSTA DIDÁTICA 1.....	48
APÊNDICE B – PROPOSTA DIDÁTICA 2	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da bacia do Rio Pedreira, Estado do Amapá, Brasil.....	22
Figura 2. Exposição peixe zebra a água coletada na Bacia Hidrográfica do Rio Pedreira	24
Figura 3. Lâminas do ensaio de genotoxicidade com amostra de sangue do in vivo (a), utilização do panóptico rápido para corar lâminas do bioensaio (b).	25
Figura 4. Imagens de alterações celulares em <i>Danio rerio</i>	26
Figura 5. Elutriado preparados com sedimentos coletados.....	27
Figura 6. Embriões expostos ao elutriato após reprodução com in vivo	28
Figura 7. Parâmetros de pH e Oxigênio dissolvido não de acordos com CONAMA.....	30
Figura 8. Frequência de alteração nos eritrócitos da análise de bioensaio com zebrafish.....	33
Figura 9. Níveis de alteração do citoplasma vacuolizado em <i>Danio rerio</i> por ponto de coleta	34
Figura 10. Níveis de alteração de micronúcleos em zebrafish por ponto	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos locais amostrados na bacia hidrográfica do rio pedreira (P1–P7), localizado no estado do Amapá, Brasil.....	23
Tabela 2. Resultado das análises físico-químicas da bacia do Rio pedreira, estado do Amapá, Brasil.	31
Tabela 3. Alterações Eritrocitárias em <i>Danio rerio</i> em (%) nos Pontos de Amostragem da Bacia do Rio Pedreira	35
Tabela 4. Efeitos letais e subletais avaliados nos embriões de <i>Danio rerio</i> expostos aos elutriados dos sedimentos coletados em sete pontos (P1 – P7), no mês de novembro, período seco na BHRP, durante o tempo de exposição 24, 48, 72 e 96hpf (horas pós-fertilização)	36

SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
As	Arsênio
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Pedreira
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
Cd	Cádmio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Pb	Chumbo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
HPF	Horas Pós-Fertilização
LQA	Laboratório de Química Ambiental
LIGEN	Laboratório de Ictio e Genotoxicidade
Hg	Mercúrio
MN	Micronúcleo
NA	Alteração Nuclear
Ni	Níquel
NT	Nitrogênio Total
pH	Potencial Hidrogeniônico
SSB	Quebra de Fita Simples (Single Strand Break)
TDS	Total de sólidos dissolvido
UNIFAP	Universidade Federal do Amapá

A contaminação hídrica no Amapá, especialmente por metais pesados e poluentes orgânicos provenientes da agropecuária e falta de saneamento, ameaça a saúde ambiental e das populações tradicionais. O Rio Pedreira, vital para comunidades locais, torna-se foco de estudo para avaliar esses riscos. Avaliar a ocorrência de poluentes na bacia do Rio Pedreira e estudar seus impactos toxicológicos no modelo biológico *Danio rerio* (zebrafish) em diferentes estágios de desenvolvimento, propondo uma abordagem didática para o ensino de química. Foram coletadas amostras de água e sedimentos em sete pontos do rio. Realizou-se análises físico-químicas e bioensaios de toxicidade com espécimes adultos e embriões de zebrafish, seguindo protocolos da OECD 236 e normas do CONAMA. Foram avaliados parâmetros de genotoxicidade (micronúcleos) e alterações morfológicas. As análises físico-químicas revelaram pH ácido (4,71) e baixos níveis de oxigênio dissolvido, fora dos padrões da Classe 2 do CONAMA. Os bioensaios indicaram frequências expressivas de danos genotóxicos, como micronúcleos (até 18,9%) e núcleos com bolha, além de citoplasma vacuolizado em pontos críticos (P5 com 33,33%), sugerindo risco à sobrevivência celular e pressão ambiental persistente.

Palavras-Chave: Toxicologia ambiental; *Danio rerio*; Rio pedreira; Ensino de química; Metais pesados.

Agradecimentos: LIGEN, LQA

Water contamination in Amapá, particularly by heavy metals and organic pollutants from agriculture and lack of sanitation, threatens environmental health and traditional populations. The Pedreira River, vital for local communities, becomes the focus of study to assess these risks. To evaluate the occurrence of pollutants in the Pedreira River basin and study their toxicological impacts on the biological model *Danio rerio* (zebrafish) at different stages of development, proposing a didactic approach for chemistry teaching. Water and sediment samples were collected at seven points along the river. Physico-chemical analyses and toxicity bioassays were performed with adult and embryo zebrafish, following OECD 236 protocols and CONAMA standards. Genotoxicity parameters (micronuclei) and morphological alterations were evaluated. Physico-chemical analyses revealed acidic pH (4.71) and low dissolved oxygen levels, outside CONAMA Class 2 standards. Bioassays indicated significant frequencies of genotoxic damage, such as micronuclei (up to 18.9%) and blebbed nuclei, as well as vacuolated cytoplasm at critical points (P5 with 33.33%), suggesting a risk to cell survival and persistent environmental pressure.

Keywords: Environmental toxicology; *Danio rerio*; Pedreira river; Chemistry teaching; Heavy metals.

Acknowledgements: LIGEN,LQA

A contaminação hídrica no estado do Amapá vem se intensificando ao longo dos anos, tornando-se um fator determinante para a saúde da população amapaense (Cunha *et al.*, 2004; Damasceno *et al.*, 2015; Pompermayer *et al.*, 2020). O estado, historicamente marcado pela exploração mineral, atividade que ainda permanece relevante, apresenta elevado potencial para o desenvolvimento dos setores mineral, agropecuário e de silvicultura (Lomba, 2024; Silva; 2016). No entanto, a expansão dessas atividades, especialmente o avanço do cultivo de grãos e das áreas de eucalipto, quando conduzida de forma inadequada, tem ampliado a vulnerabilidade dos recursos hídricos, contribuindo para a degradação ambiental e para riscos à saúde humana (Hilário, 2017; Rocha, 2020).

Para garantir o desenvolvimento do cultivo com baixos índices de perdas, são utilizados diversos compostos químicos, tanto orgânico quanto, principalmente, inorgânico, como herbicidas e pesticidas (Azevedo, 2016). Esses compostos agem afastando a contaminação de doenças e insetos que poderiam afetar a integridade das plantas cultivadas, além de impedir o nascimento de ervas daninhas (Tudi, 2021; Pathak, 2022). Porém, esses poderosos compostos químicos têm pontos negativos como causar grandes males ao ambiente ao redor (Sharma, 2019).

A utilização desses mecanismos que auxiliam a agricultura também pode afetar a fauna e flora local devido ao afastamento de insetos polinizadores e principalmente a morte ou inibição de microrganismos responsáveis pela degradação de contaminantes do solo (Hashimi, 2020). Grande parte dos herbicidas e pesticidas tem em sua composição metais pesados como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As) (Sousa, 2025; Scott; Gardiner, 2025).

O acúmulo de contaminantes inorgânicos nas plantas pode se concentrar nos solos onde existe uma alta permeabilidade, criando caminhos profundos seguindo uma linha que atravessa seus processos erosivos até finalmente alcançar corpos aquáticos subterrâneos (Doyi, 2018; Zeng *et al.*, 2023; Xu, 2025). Ao alcançá-los, esses depósitos se tornam perigosos e incompatíveis com a vida de diversas espécies devido suas concentrações (Padhye *et al.*, 2023; Adil *et al.*, 2023). Porém, o principal risco se mostra quando esses depósitos subterrâneos entram em contato com rios por processos naturais do ciclo das águas (Azevedo; Moura; Santos, 2016).

Além da contaminação de fontes de água, a erosão do solo, resultante por fatores naturais e humanos tem sido um ponto-chave para a contaminação de rios e grandes concentrações de água (Sousa, 2017; Hassane *et al.*, 2025). Nesse contexto, o desmatamento é um fator crucial nesse processo, pois não há matéria orgânica que dificulte o escoamento da água da chuva para os rios e grandes depósitos próximos (Duarte *et al.*, 2023; Zanella *et al.*, 2023). A deposição de elementos metálicos potencialmente tóxicos em grandes rios compromete gravemente a integridade ecológica, e a saúde da fauna e da flora, podendo levar ao colapso da biodiversidade local. (Santos, 2021; Reginato *et al.*, 2023).

Isto retrata também a relação dos rios com os seres humanos que utilizam as águas e se alimentam dos peixes que vivem nelas. A contaminação ocorre por meio de cadeia de eventos tróficos, na qual organismos de menor porte ingerem materiais contaminados e, posteriormente, são consumidos por peixes, resultando no aumento progressivo na concentração de elementos metálicos de alta densidade nos níveis tróficos superiores, especialmente em peixe maiores e carn (Santos, 2021; Viana *et al.*, 2023).

O consumo de peixes pelas comunidades tradicionais amazônicas é superior a diversas outras regiões do Brasil, com uma média estimada de 416 gramas por pessoa ao dia, sendo a pesca no Amapá parte da cultura e renda das populações tradicionais, estas que sempre tiveram livre acesso às águas do Rio Amazonas e em especial ao Rio Pedreira (Viana *et al.*, 202; Reginato *et al.*, 2023).

Além dos contaminantes inorgânicos, é válido citar os contaminantes de origem humana, diretamente relacionados ao tratamento de esgoto e resíduos, o que acentua a possível contaminação das águas do Rio Pedreira (Boger, 2015). Ademais, a falta de aterro sanitário adequado acentua o processo de lixiviação que pode levar compostos orgânicos, medicamentos indevidamente descartados e demais resíduos de lixo aos lençóis freáticos (Bitencourt *et al.*, 2023). A soma dessas características resulta em uma oferta de contaminantes de diversas origens para as águas e vida aquática do rio (Babuji *et al.*, 2023).

A análise da qualidade e contaminação da água atualmente pode ser realizada de diversas maneiras, avaliando diversos critérios, no entanto, existe um em especial que se destaca, a utilização do *Danio rerio* (Saiki *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2022). O zebrafish se torna um poderoso organismo para avaliação de contaminantes químicos e biológicos devido a sua sensibilidade a fatores anormais do ambiente, o que reflete no seu ciclo de vida, mutações genéticas e respostas adaptativas ao meio (Videira, 2023).

O zebrafish é um forte aliado para identificar a contaminação do Rio Pedreira e auxiliar no conhecimento sobre a saúde ambiental da região (Saiki *et al.*, 2021). É importante frisar que a existência de compostos tóxicos e incompatíveis com a vida nas águas do rio aponta para uma grande chance de contaminação das populações locais. Isso demonstra a importância do estudo das águas da região, abrindo portas para o desenvolvimento de projetos com intenção de atenuar a contaminação de um bem tão precioso como as águas do Rio Pedreira (Boger, 2015; Bitencourt *et al.*, 2023; Babuji *et al.*, 2023).

A crescente complexidade dos desafios ambientais contemporâneos, como a contaminação hídrica por uma vasta gama de poluentes químicos, exige uma abordagem educacional que transcenda a mera transmissão de conceitos teóricos (Junior, Fischer, 2020). No contexto do ensino de química no ensino médio, observa-se frequentemente uma descontextualização do conteúdo, onde temas cruciais como química ambiental e a toxicologia são abordados de forma abstrata, dificultando a conexão dos estudantes com a realidade e a percepção da relevância social e prática do conhecimento ambiental e científico (Costa, 2022; Thomas, 2023).

A proposta de ensino de toxicologia atrelada a química é essencial e de extrema importância para o ensino de educação ambiental na região (Videira, 2023). Embora a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) proponha uma educação contextualizada, voltada ao desenvolvimento de Competências e habilidades para a análise e intervenção em problemas no cotidiano, ainda é desafiador levar para a sala de aula o conhecimento científico mais recente, especialmente aquele relacionado à contaminação ambiental e seus impactos (Brasil, 2018, Thomas, 2023).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A QUÍMICA AMBIENTAL NO BRASIL

A química ambiental é a área que estuda as fontes, o transporte, as transformações e os efeitos das espécies químicas na água, no solo e no ar, analisando também a influência de atividades humanas e os mecanismos que controlam a concentração dessas substâncias e seus impactos no ambiente (Duca, 2017; Prado, 2003). No Brasil a química ambiental tem ganhado grande destaque, impulsionada pela conscientização sobre danos ambientais causados por atividade antropogênicas e pela necessidade de desenvolver soluções para desafios impostos pela poluição (Mozeto, 2002).

A evolução da química ambiental no cenário brasileiro pode ser observada pela consolidação de sociedades científicas e pela criação de divisões específicas dedicadas ao tema, por exemplo a sociedade brasileira de química (SBQ), a qual estabeleceu a divisão de química ambiental em 1994, o que demonstra o reconhecimento da importância dessa área para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico no país (Mozeto, 2002; Rocha, 1997). Além disso, o avanço no reconhecimento na legislação ambiental tem impulsionado por estudos na área que atuam na identificação, monitoramento de contaminantes emergentes e não emergentes (Costa *et al.*, 2008; Chaves, 2021).

A toxicologia ambiental, um dos pilares da Química Ambiental, estuda os efeitos e o risco de substâncias orgânicas e inorgânicas no ambiente, utilizando testes de toxicidade para avaliar seus impactos nos organismos e subsidiar a definição de critérios de qualidade da água, dos sedimentos e da biota (Santos, 2022). A interdisciplinaridade é uma característica marcante da química ambiental, que dialoga com diversas áreas do conhecimento, como ecologia e biologia para abordar de forma abrangente os complexos problemas ambientais (Mazeto, 2002).

2.2 CONTAMINANTES AMBIENTAIS NA ÁGUA

A contaminação da água por diversos agentes é um problema global que afeta a saúde dos ecossistemas aquáticos e, consequentemente, a saúde humana (Babuji *et al.*, 2023). Os poluentes emergentes são uma preocupação crescente, pois são substâncias que não são rotineiramente monitoradas, mas que podem causar efeitos adversos significativos no ambiente e na saúde (Biswas, 2022). Esses contaminantes podem incluir produtos farmacêuticos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, e outros compostos químicos de uso industrial e doméstico (Li, 2023).

Estudos recentes em toxicologia têm demonstrado a amplitude desses contaminantes em diversos compartimentos ambientais (Oliveira, 2024). Por exemplo em locais de produção de pesticidas, foram detectadas centenas de produtos químicos orgânicos em amostras de solo e água (Almeida, 2024). A presença de metais de elevada persistência ambiental na água e sedimentos, também é uma preocupação, visto que esses elementos podem se acumular na cadeia alimentar e causar toxicidade tanto em organismos aquáticos quanto terrestres (Caixeta, 2022; Tian, 2019).

A resolução do conselho nacional do meio ambiente (CONAMA), dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de qualidade da água dos rios, separados em 4 classes (Brasil, 2005). A Agência nacional de águas e saneamento Básico (ANA), têm diretrizes e parâmetros que abordam a segurança hídrica e o abastecimento urbano, contextualizando a problemática da contaminação hídrica no Brasil (Ana, 2021).

A avaliação ecotoxicológica de amostras de água e sedimento é crucial para entender os riscos ambientais da contaminação antropogênica (Souza, 2025). Estudos indicam que descargas de efluentes são fontes significativas de contaminação com curso da água e que o impacto de poluentes químicos no sedimento embora menos compreendido é totalmente relevante (Isla, 2016; Tian, 2019).

A presença de elementos metálicos poluentes como mercúrio (Hg), cádmio (Cd), é comum em áreas de rios da região norte mais especificamente no Amapá, onde estão presentes em algumas espécies de peixes, podendo afetar seu ciclo reprodutivo e causa problema em seu organismo (Viana *et al.*, 2023). Níveis elevados de arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg) e níquel (Ni) em sedimentos impactados por atividade de mineração, por exemplo, podem prejudicar o desenvolvimento de embriões de peixe zebra, aumentando malformações e reduzindo as taxas de eclosão (Caixeta; Kataba, 2022).

Além dos metais, outros contaminantes como protioconazol, um fungicida pode induzir toxicidade no desenvolvimento, danos oxidativos e distúrbios metabólicos em embriões de peixe zebra, indicando um risco potencial para organismos aquáticos (Paul, 2022). O Alumínio (Al), amplamente utilizado e presente no ambiente aquático, também pode induzir genotoxicidade e suprimir a capacidade de reparo no DNA em embriões de peixe zebra (Costa, 2019).

2.3 O PEIXE ZEBRA (*DANIO RERIO*) COMO MODELO EM TOXICOLOGIA AMBIENTAL

O peixe-zebra emergiu como um modelo animal de destaque na pesquisa biomédica e, em particular, na toxicologia ambiental, devido a uma série de características vantajosas, como a facilidade de manutenção em laboratório, a alta prolificidade e o rápido desenvolvimento embrionário e larval (Canedo, 2021). Além disso, a transparência de seus embriões e larvas, bem como seu genoma bem sequenciado e com alta homologia ao genoma humano, tornam essa espécie uma ferramenta valiosa para a investigação dos efeitos de diversas substâncias químicas orgânicas e inorgânicas (Vargas, 2015).

A crescente demanda por métodos alternativos aos testes *in vivo* em mamíferos, alinhada aos princípios dos 3Rs (Redução, Refinamento e Substituição), tem impulsionado a adoção desse espécime como modelo em estudos toxicológicos, ampliando sua aplicação em avaliações de segurança e monitoramento ambiental (Hong, 2024; Kataba, 2022).

2.3.1 Genotoxicidade e Reparo no DNA

Poluentes genotóxicos presentes no ambiente aquático podem causar danos ao DNA e alterar os mecanismos de reparo celular em organismos vivos (Gomes, 2021). O peixe zebra é um modelo

amplamente utilizado para avaliar a genotoxicidade de diferentes poluentes, pois seu genoma possui entre 70 e 80% homólogos a humanos e quase todos os genes envolvidos em diversas vias de reparo de DNA (Oliveira, 2023). O ensaio cometa é uma das principais técnicas empregadas nesses estudos para detectar quebra de fita simples (SSB), formação de adultos e alterações na expressão de genes envolvidos em mecanismos de reparo (Canedo, 2021; Ducharme, 2015).

Estudos têm demonstrado que a exposição a contaminantes pode levar danos significativos no DNA. Por exemplo o alumínio (Al) pode induzir genotoxicidade e suprimir a capacidade de reparo por excisão de nucleotídeos (NER) em embriões de peixe zebra, especialmente ao afetar o reconhecimento de lesões de DNA mais distorcidas (Costa, 2019). A integridade do DNA é crucial para a homeostase celular, e os mecanismos de reparo de DNA desempenham um papel fundamental e complexo na manutenção dessa integridade (Pei, 2013; Costa 2019).

2.3.2 Estudo Toxicológico

O peixe-zebra (*Danio rerio*) é um modelo emergente e promissor para estudos toxicológicos que envolvem a investigação de toxinas e venenos e seus efeitos em organismos vivos, apresentando alta sensibilidade a biotoxinas e baixo custo de manutenção, o que o torna uma alternativa viável para compreender os danos causados por essas substâncias e para o desenvolvimento de testes biológicos (Jarvis, 2011). Nesse contexto, destacam-se como principais áreas de aplicação a genotoxicidade, a análise de expressão gênica, os bioensaios de desenvolvimento, a avaliação de biomarcadores de estresse e os estudos em neuro toxicologia (Ferreira, 2020).

2.3.3 Teste de Micronúcleo e Alterações Nucleares

O teste de micronúcleo (MN) e o ensaio de alteração nuclear (NA), em peixes são ferramentas amplamente utilizadas para avaliar os efeitos mutagênicos induzidos por poluentes, tanto em condições de campo quanto de laboratório, o teste de MN e NA, consiste em um bioensaio realizado obtêm-se as lâminas sanguíneas, nessas lâminas estão os eritrócitos de glóbulos vermelhos, onde critérios de identificação é em forma oval ou redonda. (Dalzochio, 2019; Videira, 2023).

2.3.4 Embriotoxicidade

A sensibilidade dos embriões é particularmente alta, pois seus sistemas de detoxificação ainda não estão completamente desenvolvidos, tornando-os mais vulneráveis a compostos químicos, essa vulnerabilidade pode justificar do porquê as concentrações que causam toxicidade em embriões são frequentemente mais baixas do que aquelas que afetam organismos adultos, através dos sedimentos que atravessam e afetam o embrião devido ter sua membrana com tecido fino (Tesolin 2014; Fonseca 2024).

As diretrizes para testes de embriotoxicidade em peixe zebra incluem a manutenção e acasalamento dos peixes, tratamento com tóxicos, medições de sobrevivência e observação de alterações morfológicas como, anormalidade nos olhos, comprimento do corpo, endema pericárdio, e do saco vitelínico, e ângulo do somito, sendo uma ferramenta importante para ensaio para analisar e verificar a toxicidade de substâncias químicas e seus efeitos no desenvolvimento embrionário (Gomes, 2020).

2.3.5 Toxicidade de Sedimentos Contaminados

O sedimento desempenha um papel crucial na saúde dos ecossistemas aquáticos, atuando como sumidouro, arquivo e fonte de diversos poluentes, incluindo metais inorgânicos (Santos, 2023). Estudos utilizando ensaios de contato com embriões demonstram que a contaminação por rejeitos de mineração pode prejudicar o desenvolvimento embrionário, aumentando malformações e reduzindo as taxas de eclosão em amostras de rios impactados, que frequentemente apresentam níveis elevados de cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg) e níquel (Ni), superando as recomendações da legislação ambiental (Caixeta, 2022; Krawzyk, 2023).

2.4 ABORDAGEM DIDÁTICA E O ENSINO DE QUÍMICA AMBIENTAL

A educação ambiental desempenha um papel crucial na formação de cidadãos conscientes e engajados na proteção do meio ambiente (Cuba, 2010). No entanto, a complexidade dos temas ambientais, como a contaminação da água e a toxicologia ambiental, muitas vezes resulta em uma abordagem descontextualizada no ensino química no ensino médio, essa descontextualização pode dificultar a compreensão dos alunos sobre a relevância desses temas em seu cotidiano e a aplicação dos conhecimentos científicos na análise de problemas reais (Junior, Fischer 2020).

Para superar essa lacuna, é fundamental desenvolver abordagens didáticas inovadoras que integrem a pesquisa científica com a prática pedagógica. A utilização de sequências didáticas, por exemplo, tem se mostrado uma metodologia eficaz para abordar temas complexo como poluição hídrica, promovendo uma aprendizagem mais significativa e ativa dos estudantes (Raupp, 2019). A proposta de ensino a toxicologia atrelada a química para educação ambiental, como sugerido por Videira (2023), é um exemplo de como a contextualização pode enriquecer o processo de ensino-aprendizagem.

A integração de modelos experimentais, como o peixe-zebra, em propostas didáticas pode ilustrar de forma concreta os efeitos de contaminantes ambientais, tornando o aprendizado mais visual e interativo (Silva, 2024). Embora a complexidade dos estudos com *Danio rerio* possa parecer um desafio para o ensino médio, a adaptação e simplificação desses conceitos para a realidade dos alunos

pode promover a conscientização ambiental, o pensamento crítico e a análise de problemas ambientais locais (Tomasiewicz *et al.*, 2014). A discussão sobre o papel da química na identificação, monitoramento e mitigação da contaminação da água é essencial para capacitar os estudantes a se tornarem agentes de mudança em suas comunidades (Reis, 2019; Cuba, 2010).

OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a ocorrência de elementos metálicos poluentes na água da bacia hidrográfica do rio pedreira e estudar seus impactos toxicológicos em diferentes estágios de desenvolvimento do *Danio rerio*.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Avaliar os níveis de contaminantes metálicos na água.
- ✓ Comparar os padrões da qualidade da água com órgãos regulamentadores.
- ✓ Propor sequência didática que relacione química ambiental e toxicologia com dados obtidos.

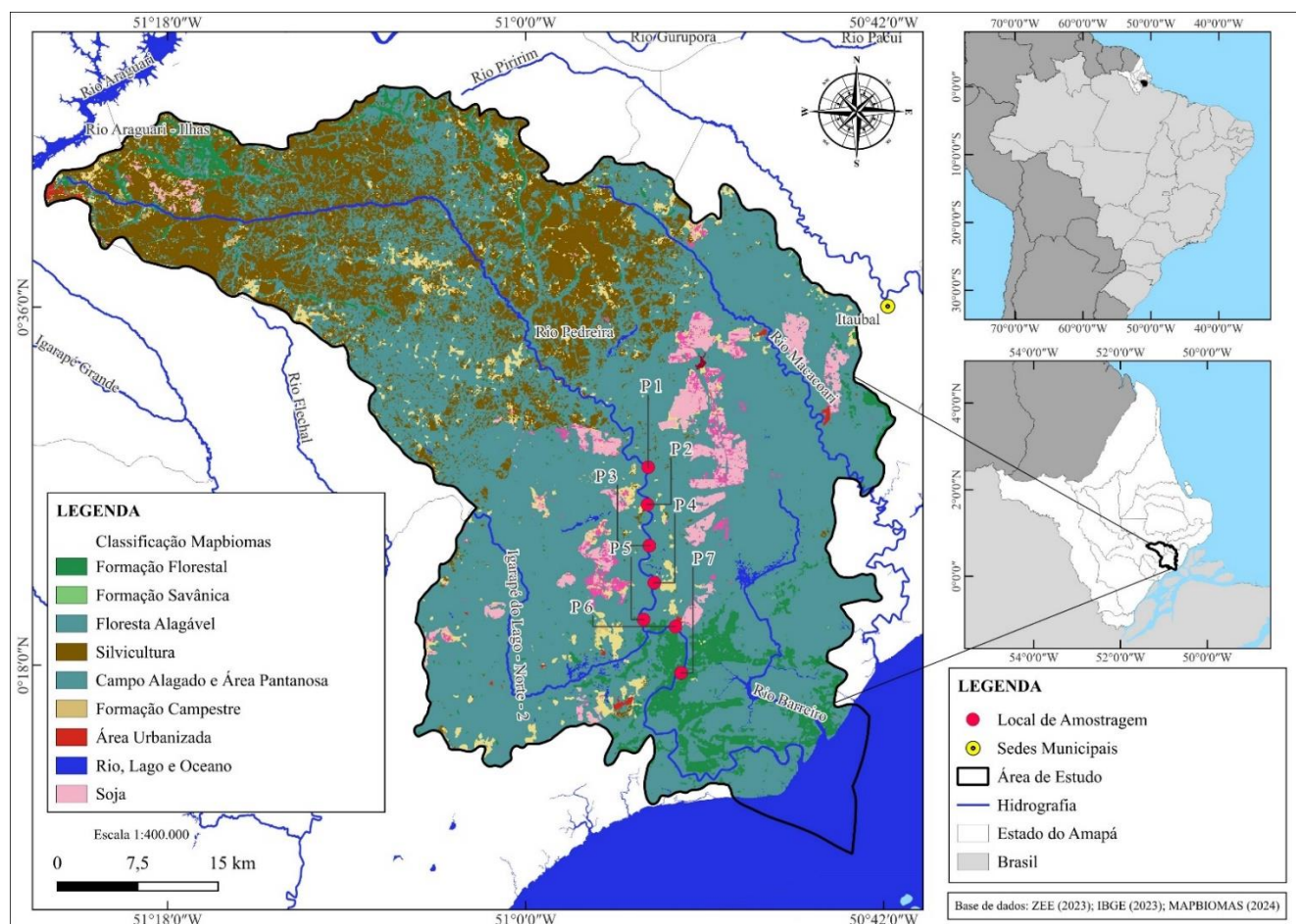
MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ARÉA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio pedreira é um dos importantes rio do estado do Amapá (Figura 1). O rio pedreira está localizado no estado do Amapá na região norte do Brasil, é um afluente do rio Amazonas que tem um papel importante para região, é uma área de extrema importância para consumo de água e deslocamento fluvial, atravessando pelo município do Itaubal do Piriri, desaguando no rio Amazonas (Souza *et al.*, 2015).

A BHRP abrange uma área de 998.815 km², na área demarcada para estudo concentrasse uma natureza considerada savana, onde o solo é considerado do tipo concrecionário laterítico, latossolo amarelo, com sedimentos de tipo argiloso-arenoso e argiloso (Drummond *et al.*, 2008). Sendo típicos de bioma da savana do Brasil, onde ocorre a pobreza de nutrientes de áreas de relevos ondulados e suaves ondulados (Zee, 2008).

Figura 1. Mapa da bacia do Rio Pedreira, Estado do Amapá, Brasil.



Fonte: Autor

4.2 COLETA E ANÁLISE DE ÁGUA

Para a caracterização da qualidade ambiental dos locais de coleta, realizou-se o levantamento de parâmetros físico-químicos em 7 pontos ao longo da água do rio (Tabela 1) utilizando uma sonda multiparamétrica portátil HI98194 (HANNA INSTRUMENTS). Foram medidos *in situ* a condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), turbidez (NTU), oxigênio dissolvido ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), pH e temperatura ($^{\circ}\text{C}$). A relevância desses indicadores na avaliação da qualidade hídrica é amplamente reconhecida, pois influenciam diretamente a solubilidade, especiação, biodisponibilidade e toxicidade de diversos contaminantes em ecossistemas aquáticos (Pinheiro *et al.*, 2021). A variação desses parâmetros físico-químicos em águas naturais pode afetar significativamente o risco ambiental para a vida selvagem aquática (Grosell, 2011).

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos locais amostrados na bacia hidrográfica do rio pedreira (P1–P7), localizado no estado do Amapá, Brasil.

	PONTO	LATITUDE	LONGITUDE
Rio Pedreira	P1	0°27'57.40"N	50°53'50.55"O
	P2	0°26'4.58"N	50°53'52.60"O
	P3	0°24'0.49"N	50°53'46.86"O
	P4	0°22'9.01"N	50°53'32.04"O
	P5	0°20'17.51"N	50°54'4.19"O
	P6	0°19'56.14"N	50°52'28.24"O
	P7	0°17'36.72"N	50°52'11.11"O

Fonte: Autor

Adicionalmente, foram analisadas as concentrações de nutrientes inorgânicos, como nitrogênio total (NT), amônia, nitrato. Estes são indicadores cruciais de poluição, frequentemente associados a efluentes domésticos, escoamento agrícola e processos de eutrofização (Jarvie; Neal e Withers, 2006; Savic *et al.*, 2022). A presença excessiva desses nutrientes pode levar à proliferação de algas e a desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos (Manuel, 2014). As análises seguiram os protocolos técnicos descritos no Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA357/05), garantindo a padronização e a confiabilidade dos dados obtidos.

Após a caracterização físico química foram coletados aproximadamente 500 g de sedimento provenientes de cada ponto amostral os quais foram acondicionados individualmente em sacos plásticos previamente higienizados e devidamente identificados, contendo informações referentes ao local, data, a fim de assegurar a rastreabilidade do material. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em cuba térmica igualmente higienizada, garantindo a preservação de suas características físico-químicas e minimizando possíveis alterações durante o transporte até o laboratório, onde foram submetidas às análises subsequentes.

Procedimento análogo foi adotado para as amostras de água. Em cada ponto amostral, foram coletadas duas alíquotas de 1 L, acondicionadas em garrafas de polietileno previamente descontaminadas. Para preservação das amostras destinadas à determinação de metais, adicionou-se 1 mL de ácido nítrico concentrado, procedimento destinado à estabilização dos analitos e à prevenção de processos de adsorção às paredes do recipiente ou de precipitação. As amostras preservadas foram mantidas em cuba térmica durante o transporte ao laboratório, onde foram posteriormente submetidas à análise espectrofotométrica.

Adicionalmente, foram coletadas amostras de 20 L de água em cada ponto, destinadas à realização de bioensaios ecotoxicológicos. Essas amostras foram transportadas ao laboratório de Ictiologia e Genotoxicidade para a realização de ensaios de zebrafish. Esses testes foram conduzidos de acordo com as diretrizes da OECD 236 (2013), que visam determinar a toxicidade aguda de substâncias químicas em estágios embrionários de peixes.

4.3 ENSAIO DE TOXICIDADE EM PEIXES ADULTOS

Para a leitura das lâminas, realizou-se um bioensaio utilizando sete aquários com capacidade de 20 litros, devidamente identificados, nos quais foram adicionadas as amostras de água coletadas em cada ponto amostral (Figura 2). Em cada aquário foram instalados alimentadores automáticos. Posteriormente, foram introduzidos nove indivíduos vivos por unidade experimental, previamente selecionados e pesados em balança analítica, apresentando massas variando entre 0,6 e 0,8 mg.

Os peixes foram expostos à água do rio por um período de 96 horas, conforme protocolo padrão para ensaios de toxicidade aguda (Canedo, 2021). Durante todo o período experimental, os organismos foram monitorados quanto a alterações comportamentais e ocorrência de mortalidade. A alimentação foi realizada duas vezes ao dia, em horários previamente programados por meio dos alimentadores automáticos.

Figura 2. Exposição peixe zebra a água coletada na Bacia Hidrográfica do Rio Pedreira



Fonte: Autor

Após o término das 96 horas de exposição, iniciou-se a etapa de análise de genotoxicidade. Seringas de insulina de 1 mL foram previamente ambientadas com anticoagulante, a fim de evitar coagulação e perda da amostra sanguínea de *Danio rerio*. Os peixes foram anestesiados por

hipotermia, em água gelada, para redução dos movimentos, e, em seguida, realizou-se a punção cardíaca para coleta de pequena amostra de sangue (Figura 3).

O material coletado foi imediatamente depositado em lâminas de vidro com extremidade fosca, procedendo-se à confecção do esfregaço sanguíneo. Para cada indivíduo amostrado em cada ponto, foram preparadas duas lâminas, totalizando 86 lâminas no bioensaio, a partir de 43 espécimes analisados.

Figura 3. Lâminas do ensaio de genotoxicidade com amostra de sangue do in vivo (a), utilização do panóptico rápido para corar lâminas do bioensaio (b).

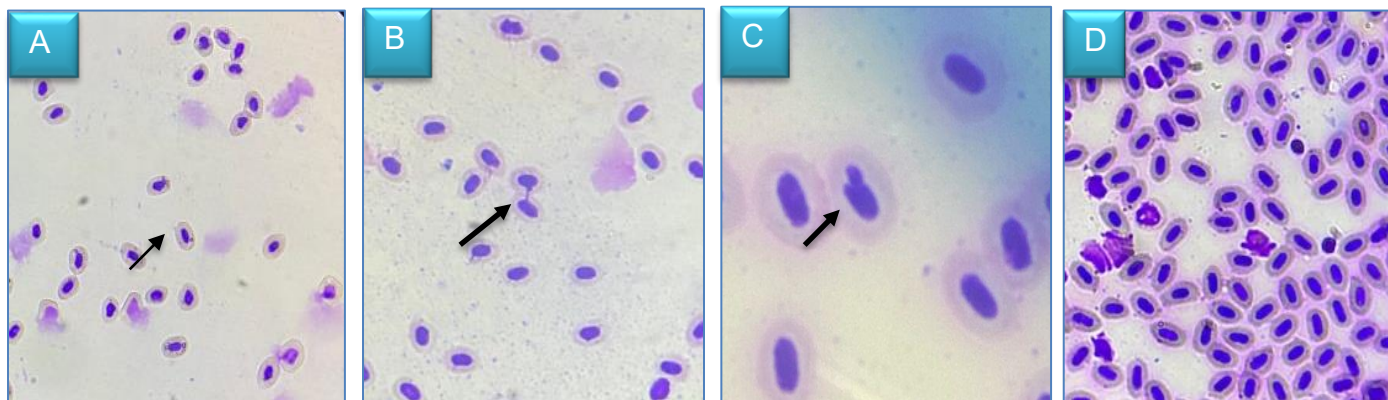


Fonte: Autor.

Após a confecção dos esfregaços sanguíneos, as lâminas foram mantidas em temperatura ambiente até completa secagem e, posteriormente, fixadas por imersão em álcool absoluto durante 10 minutos, assegurando a preservação das estruturas celulares e a adequada aderência do material à superfície da lâmina. Em seguida, procedeu-se à coloração pelo método Panóptico Rápido tipo I,II e III, com submersão das lâminas por 10 segundos nas soluções tipo I e tipo II e, posteriormente, por 20 segundos na solução tipo III (Figura 3).

Esse protocolo de coloração permite a visualização rápida e eficiente das estruturas celulares, otimizando o tempo de processamento sem comprometer a qualidade morfológica das células analisadas. Após a coloração, as lâminas foram novamente submetidas à secagem em temperatura ambiente e, em seguida, encaminhadas para análise microscópica no ensaio de avaliação das alterações em genotóxicos em eritrócitos.

Figura 4. Imagens de alterações celulares em *Danio rerio*.



A seta indica algumas alterações micronucleares: eritrócito micronucleado (a), ponte nuclear (b), núcleo com bolha (c) comparação das células (d). Fonte autor.

Foram analisadas 86 lâminas, cada uma contendo a contagem de 2.000 eritrócitos, distribuídas em sete pontos amostrais. O processo de leitura demandou tempo considerável devido à complexidade e à precisão necessária na identificação das alterações celulares. As variações observadas refletem possíveis impactos tóxicos sobre as células sanguíneas dos organismos analisados (Figura 4). Essas alterações morfológicas sugerem que os organismos foram expostos a agente contaminantes com potencial genotóxico podendo comprometer as células e alterar a fisiologia e saúde e desenvolvimento do peixe.

4.4 ENSAIO DE EMBRIOTOXICIDADE

Os sedimentos utilizados para o preparo da fração solúvel em água, foi coletado em sete pontos amostrais ao longo do rio pedreira, durante período de seca, esses pontos foram escolhidos devido a presença de comunidades ribeirinhas e indígenas nas proximidades no rio, o motivo se da por cultivo de plantas de empresas e atividades antropicas na região que pode causar risco a saúde humana e risco ambiental.

Durante as atividades in situ os sedimentos foram coletados por cada ponto amostral, identificados e acondicionados em uma cuba com gelo até seu transporte para o Laboratório de Química Ambiental (LQA), na Universidade Federal do Amapá. Os sedimentos foram preparados com água destilada foram pesadas 3.5g de cada sedimento em um becker em uma balança analítica, após isso foram transferidas para um falco com 14ml, cada sedimento foi pesado e feito fração a alíquota solúvel (Figura 5).

Figura 5. Elutriado preparados com sedimentos coletados



Fonte: Autor

Após o preparo do elutriado dos pontos os mesmos foram colocados em uma centrífuga à (15000rpm) por trinta minutos, ficando em repouso no período de um dia. Os testes de embriotoxicidade foram feitos no laboratório LQA, para obtenção de óvulos para análise *in vitro*, foram separados dez aquários de dois litros com uma cancela no meio para realizar numa proporção 2:1, dois machos para uma fêmea, e mantidos por 12 horas claro/escuro.

Às seis da manhã as cancelas foram retiradas para acasalamento e reprodução e desova dos embriões, após esse processo foram lavados, sendo observados em um microscópio óptico para avaliar se há embriões viáveis para análise, os não viáveis como os não fecundados ou coagulados são descartados por uma análise de 1 hora pós fertilização (1hpf).

Os embriões foram colocados em uma placa de petri estéreis com 15mL da solução de casa ponto mantido em uma temperatura específica por 96 horas, durante a análise de embriotoxicidade os grupos foram separados para 4 observações em um ciclo de 24, 48, 72 e 96 horas hpf. Para o grupo experimental controle foi utilizado apenas uma repetição com nove embriões (Figura 6).

A análise de embriotoxicidade em peixe-zebra envolveu etapas como a manutenção e o acasalamento dos organismos, a exposição dos embriões a substâncias tóxicas, a avaliação da taxa de sobrevivência e a análise de possíveis alterações morfológicas, entre elas anomalias oculares, variação no comprimento corporal, edemas no pericárdio e no saco vitelínico, além de mudanças no ângulo dos somitos.

Figura 6. Embriões expostos ao elutriato após reprodução com in vivo



Fonte: Autor

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram organizados a partir do cálculo das médias e de suas respectivas medidas de dispersão, sendo posteriormente confrontados com valores de referência estabelecidos na literatura e em normativas vigentes. Para verificar a existência de variações nas concentrações de metais entre os diferentes pontos de coleta, empregou-se a Análise de Variância (ANOVA).

As etapas iniciais de tratamento e organização dos dados foram realizadas no Microsoft Excel. As concentrações de metais determinadas nas amostras de água foram comparadas aos padrões de qualidade definidos pela Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 357/2005), a fim de avaliar possíveis excedências aos limites máximos recomendados.

No que se refere às análises de caracterização da água, os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão para cada grupo experimental. Para a comparação entre os grupos, aplicou-se a ANOVA seguida do teste post hoc de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Adicionalmente, para melhor visualização e interpretação dos dados, foram elaborados gráficos estatísticos utilizando o software RStudio.

4.6 PROPOSTA DIDÁTICA

A construção das propostas didáticas apresentadas neste trabalho foi fundamentada em uma abordagem sistemática que integrou os resultados da pesquisa original, a revisão bibliográfica do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e artigos científicos e educacionais relevantes. O processo foi dividido em três etapas principais, visando garantir a pertinência e a aplicabilidade pedagógica do material desenvolvido.

4.6.1 Análise e Extração de Dados do TCC e Referências Científicas

A etapa inicial consistiu na análise aprofundada do TCC intitulado "Estudo de Contaminantes Ambientais na Água e seus Efeitos Toxicológicos em *Danio rerio*: Uma Abordagem Didática para o Ensino de Química". Foram extraídos os principais resultados da pesquisa, como os dados físico-químicos da Bacia do Rio Pedreira (e.g., pH ácido de 4,71 e baixos níveis de oxigênio dissolvido, fora dos padrões do CONAMA) e os achados dos bioensaios de toxicidade com *Danio rerio* (e.g., frequências expressivas de danos genotóxicos como micronúcleos de até 18,9% e núcleos com bolha).

Adicionalmente, a revisão bibliográfica do TCC foi examinada para identificar os artigos científicos que embasaram a compreensão dos fenômenos de contaminação por metais pesados na região amazônica e a utilização do *Danio rerio* como modelo biológico em toxicologia ambiental. Esta fase permitiu a identificação dos conceitos científicos centrais e dos dados empíricos que seriam transpostos para o contexto educacional.

4.6.2 Desenvolvimento da Proposta Didática 1: Metais Pesados e a Química da Água

A primeira proposta didática, "Metais Pesados e a Química da Água", foi elaborada com base na contextualização da contaminação hídrica por metais pesados na Amazônia, conforme detalhado na introdução e discussão do TCC. Os objetivos de aprendizagem foram definidos para conectar conceitos de química geral (Tabela Periódica, Ligações Químicas, Equilíbrio Ácido-Base) com a problemática ambiental local, utilizando os dados do Rio Pedreira como estudo de caso.

A metodologia pedagógica foi concebida para promover a discussão sobre bioacumulação e biomagnificação, alinhando-se às abordagens que defendem a contextualização do ensino de química para uma aprendizagem significativa. A atividade de mapeamento de fontes de contaminação e o experimento de simulação de precipitação de metais foram desenhados para engajar os alunos com a realidade e os princípios químicos subjacentes aos problemas ambientais.

4.6.3 Desenvolvimento da Proposta Didática 2: Toxicologia Ambiental com Zebrafish

A segunda proposta didática, "Toxicologia Ambiental com Zebrafish", foi desenvolvida a partir dos resultados experimentais do TCC, que empregou o *Danio rerio* como bioindicador de toxicidade. Os objetivos focaram na compreensão do zebrafish como modelo científico, na observação de alterações morfológicas causadas por toxinas (como os micronúcleos identificados na pesquisa) e na discussão ética do uso de animais em pesquisa (princípios dos 3Rs).

A metodologia incluiu a análise de micrografias de eritrócitos com micronúcleos e a interpretação de gráficos de frequência, replicando de forma adaptada a análise de dados realizada no

neste trabalho. Esta proposta visa estimular o pensamento crítico e a consciência ambiental, conforme preconizado por estudos que abordam a ecotoxicologia e a educação científica .

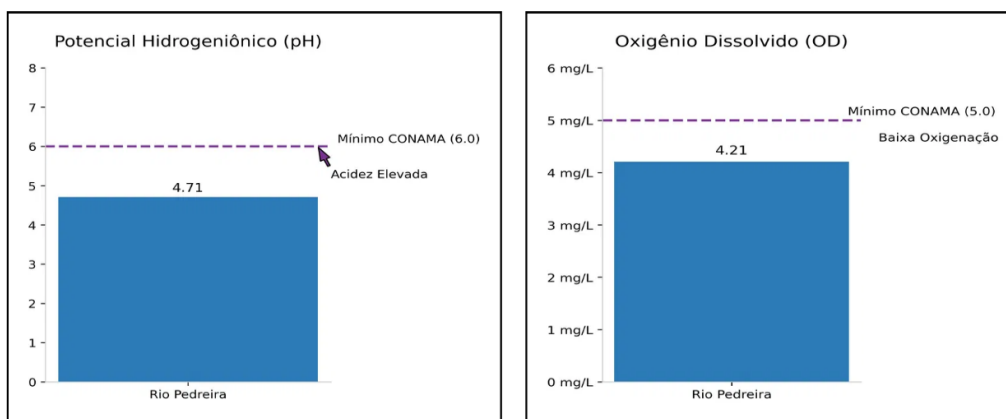
RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Os parâmetros físico-químicos da bacia do rio Pedreira variaram ao longo dos pontos de coleta com destaque o pH que representa o desvio mais marcante em relação aos padrões legais. O valor médio de $4,71 \pm 0,12$ encontrado no Rio Pedreira está muito abaixo do intervalo permitido para Classe 2, que varia de 6,0 a 9,0 (Tabela 2). Essa acidez pronunciada possui forte vínculo com as características naturais da bacia, como solos latossólicos ácidos e elevada presença de matéria orgânica dissolvida. Souza *et al.* (2015) destacam que tais condições são típicas de rios amazônicos de águas negras ou claras.

No entanto, mesmo que natural, esse nível de acidez pode potencializar a mobilização de metais como alumínio, aumentando riscos toxicológicos para organismos aquáticos e desafios para o tratamento da água destinada ao consumo humano (Baungarten, 2009). Em contrapartida, rios como o Madeira apresentam pH sempre dentro do padrão (6,5 a 7,2), devido à presença de sedimentos alcalinos. O Rio TarumãAçu, por sua vez, também se mantém dentro do padrão, porém com alcalinidade influenciada por efluentes industriais , demonstrando que tanto a acidez natural quanto a alcalinidade antrópica podem configurar cenários de alerta (Pinto, 2001).

Figura 7. Parâmetros de pH e Oxigênio dissolvido não de acordos com CONAMA



Fonte. Autor

O oxigênio dissolvido também apresenta valores críticos no Rio Pedreira, com média de 4,21 mg/L (Figura 7), inferior ao mínimo exigido de 5,0 mg/L. A baixa disponibilidade de oxigênio pode

causar estresse à fauna aquática e redução da biodiversidade. Segundo Souza *et al.* (2015), no rio Pedreira tal condição pode estar associada à baixa taxa de reaeração e ao consumo de oxigênio pela decomposição de matéria orgânica local.

Esse quadro contrasta com o Rio Madeira, mais dinâmico e menos propenso à depleção de oxigênio, e aproxima-se dos valores críticos encontrados no rio Tomé-açu, onde a redução do oxigênio está diretamente ligada à poluição orgânica, revelada por índices elevados de DBO e COD (Queiroz, 2024). Assim, ainda que os sintomas sejam semelhantes, as causas diferem significativamente: enquanto o Pedreira reflete uma limitação natural do sistema, o outro expõe um desequilíbrio agravado pelas atividades humanas.

O teor de ferro no Rio Pedreira também ultrapassa levemente o limite imposto para águas de Classe 2, com média de 0,33 mg/L frente ao máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela legislação. Embora esse excesso seja associado à geoquímica natural dos solos da região, concentrações acima do padrão podem acarretar problemas estéticos e operacionais, como alteração de cor, sabor desagradável e incrustações em sistemas de distribuição hídrica (Solano, 2023).

Outros parâmetros analisados, como turbidez (36,49 UNT) e nitrato (0,50 mg/L), encontram-se dentro dos valores normativos da Classe 2, indicando que, embora existam fatores limitantes à qualidade ambiental, nem todos os indicadores apontam para um cenário comprometido. A reinterpretação dos dados da qualidade da água do Rio Pedreira à luz da Resolução CONAMA 357/2005 revela um cenário que exige atenção, especialmente quando se considera a destinação da água para os usos previstos em rios de Classe 2.

Tabela 2. Resultado das análises físico-químicas da bacia do Rio pedreira, estado do Amapá, Brasil.

Parâmetro	Média (±DP)	Mediana	Mínimo/ Máximo	CONAMA 357/2005
pH	4,71±0,12	4,73	4,75-4,89	6,0-9,0
Od (%)	0,40±0,24	0,51	0,05-0,57	N/A
Od (mg/L)	4,21±0,21	4,2	3,9-4,5	≥ 5,0 m/L
Temperatura °C	28,50±2,12	28,5	27-30	≤ 40 °C
Condutividade ucS	8,30±0,31	8,2	7,9-8,7	N/A
Turbidez UNT	36,49±13,49	34,8	17,5-60,8	≤ 100
Tds	0,004±0,0005	0,004	0,004-0,0055	≤ 500
Alumínio	0,04±0,02	0,043	0,014-0,069	≤ 0,1
Amônia	0,017±0,06	0,16	0,11-0,26	≤ 3,7
Cloreto	0,81±0,27	0,8	0,4-1,3	≤ 250
Ferro	0,33±0,07	0,32	0,23-0,46	≤ 0,3
Manganês	0,01±0,00	0,01	0,004-0,014	≤ 0,1
Nitrato	0,50±0,32	0,5	0,2-1,1	10,0 mg/L

Fonte. Autor

5.2 BIOENSAIO COM ZEBRAFISH ADULTO

A análise das alterações em eritrócitos de *Danio rerio* nos diferentes pontos de coleta evidencia uma ampla variação nas frequências de danos celulares, os quais podem ser interpretados como importantes biomarcadores de estresse genotóxico e citotóxico relacionados à exposição a contaminantes ambientais. De modo geral, as alterações subletais apresentaram maior predominância em quase todos os pontos (Tabela 3), destacando-se o brotamento nuclear, o micronúcleo e o núcleo com bolha, cujas frequências oscilaram entre 12 e 21%, valores considerados expressivos para esse tipo de avaliação.

O micronúcleo, em especial, é reconhecido como marcador clássico de genotoxicidade, sendo sua elevada ocorrência nos Pontos 2, 6 e 7 indicativa de forte pressão ambiental capaz de induzir quebras cromossômicas ou perdas de fragmentos cromossômicos durante a divisão celular (Figura 7). Da mesma forma, o núcleo com bolha foi a alteração mais frequente, ultrapassando 20% no Ponto 3 e mantendo valores acima de 14% em todos os demais locais, o que reforça sua relevância como indicador de instabilidade nuclear persistente.

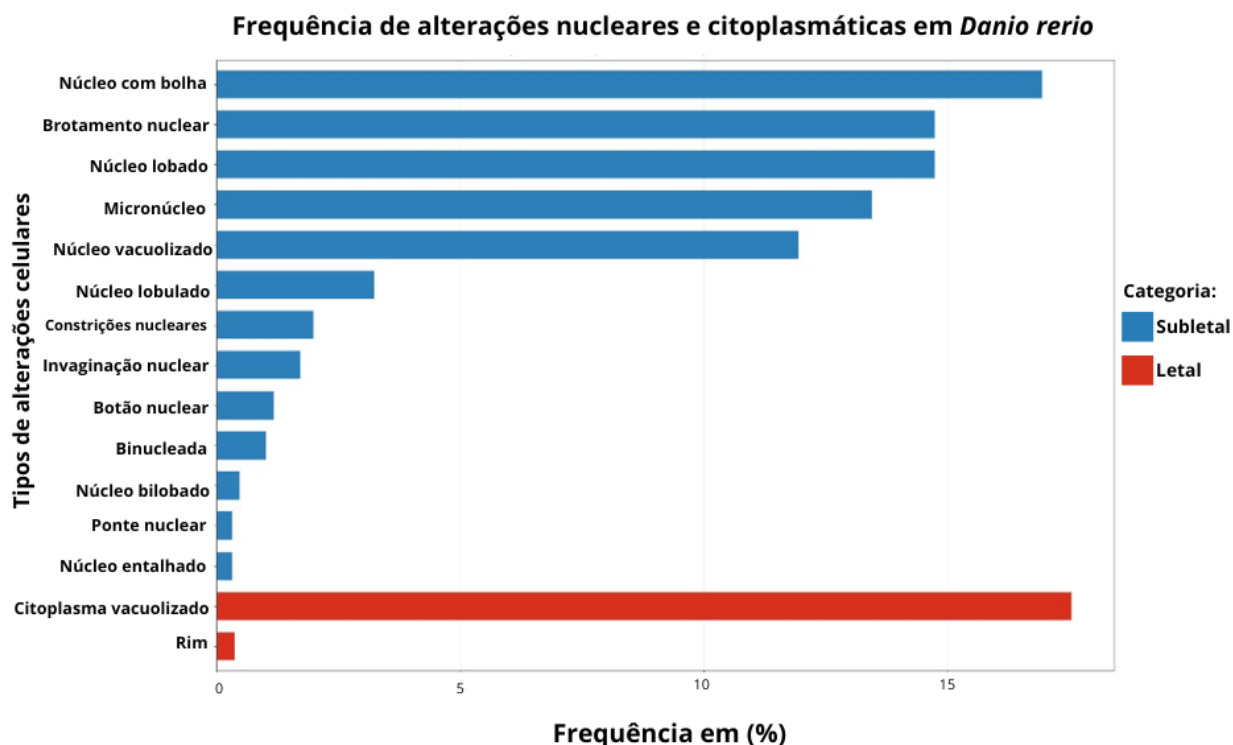
Os maiores níveis de alterações eritrocitárias observados nos Pontos 2, 6 e 7 da bacia do rio Pedreira (Figura 8) podem estar associados à maior influência de atividades antrópicas nas proximidades dessas áreas, como ocupação humana, lançamento de efluentes domésticos e escoamento superficial de áreas agrícolas, que favorecem a introdução de contaminantes induzindo estresse oxidativo e danos ao material genético.

No Ponto 3, a maior incidência de núcleo com bolha pode estar relacionada à maior biodisponibilidade de contaminantes dissolvidos ou associados ao sedimento, capazes de provocar instabilidade da membrana nuclear e alterações na organização da cromatina, sendo esse tipo de alteração frequentemente associado a processos de estresse citotóxico e apoptose inicial em eritrócitos de peixes expostos a poluentes ambientais, conforme descrito em estudos de biomonitoramento com *Danio rerio* e outras espécies em ambientes aquáticos impactados.

Outras alterações subletais, como o núcleo vacuolizado e o núcleo lobulado, também se destacaram em alguns pontos específicos. O núcleo vacuolizado alcançou até 14,24% no Ponto 2, mas esteve ausente no Ponto 3, sugerindo que a ocorrência dessa alteração pode estar relacionada a condições ambientais particulares. Já o núcleo lobulado apresentou frequências expressivas nos Pontos 1 e 3, mas próximo de zero em outras áreas, evidenciando uma distribuição heterogênea dos efeitos tóxicos. Alterações menos frequentes, como binucleação, núcleo bilobado, botão nuclear,

núcleo entalhado e ponte nuclear, embora apresentem percentuais baixos (<3%), são relevantes por refletirem falhas no ciclo celular e irregularidades na segregação cromossômica (Figura 8).

Figura 8. Frequência de alteração nos eritrócitos da análise de bioensaio com zebrafish

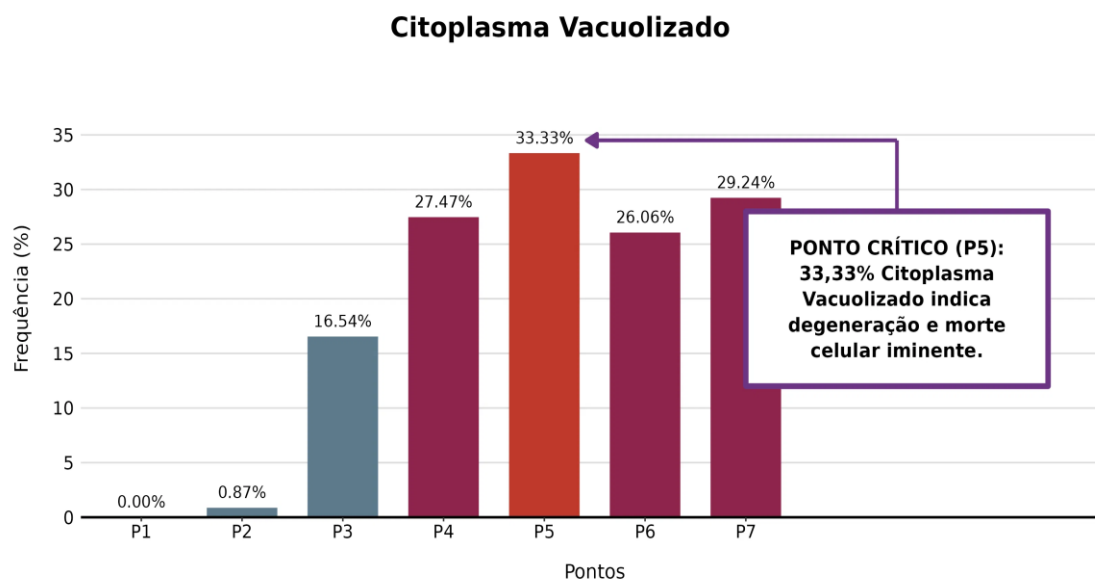


Fonte. Autor

Quando se analisa a ocorrência das alterações letais, observa-se um quadro ainda mais preocupante. O citoplasma vacuolizado, principal marcador de dano irreversível, apresentou valores muito elevados nos Pontos 3 a 7, variando de 16,54% a 33,33%, com maior comprometimento observado no Ponto 5 (Figura 9). Esses achados sugerem que, em determinadas regiões, o nível de toxicidade ambiental ultrapassa a barreira da viabilidade celular, comprometendo a sobrevivência dos eritrócitos. Por outro lado, a alteração “rim” apresentou baixíssima frequência, com valores inferiores a 1,5%, sendo menos representativa no contexto geral.

A comparação entre as categorias de alterações revela que, enquanto as alterações subletais predominam em todos os pontos e indicam estresse celular que ainda permite a manutenção da viabilidade, as alterações letais, em especial o citoplasma vacuolizado, sugerem que a intensidade do impacto ambiental em alguns locais já ultrapassa limites críticos de adaptação celular. Essa distinção é fundamental, pois permite inferir não apenas a presença de contaminantes, mas também o grau de risco que eles representam para a saúde dos organismos expostos.

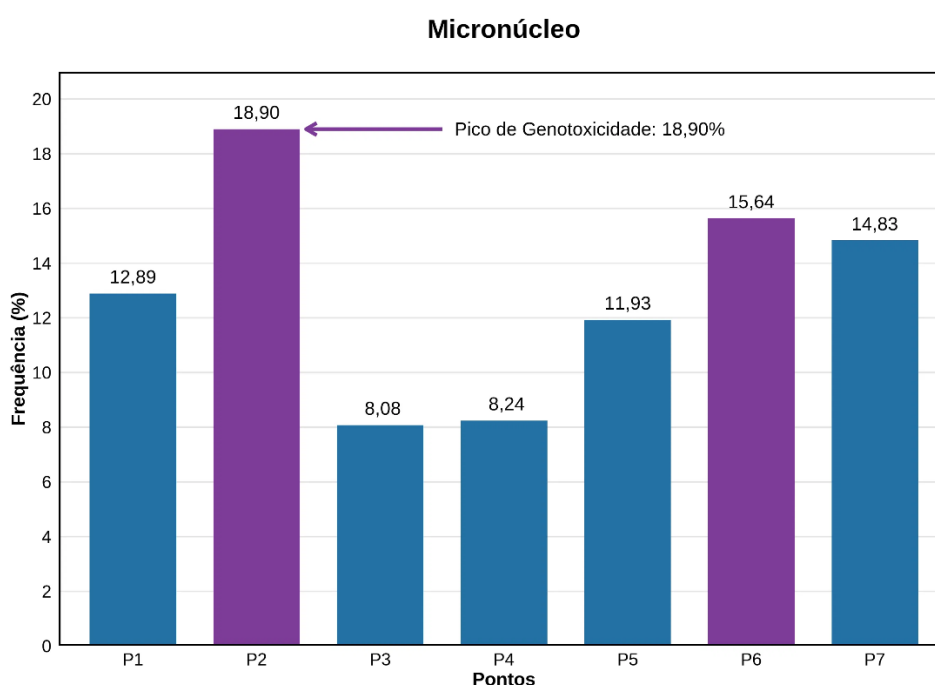
Figura 9. Níveis de alteração do citoplasma vacuolizado em *Danio rerio* por ponto de coleta



Fonte. Autor

Os pontos de coleta 3, 5, 6 e 7 são os mais comprometidos, apresentando uma alta frequência de alterações letais e subletais, com destaque para a presença de micronúcleos e núcleos com bolha. Em contrapartida, os Pontos 1 e 2 apresentam menor grau de comprometimento, uma vez que, apesar de registrarem diversas alterações subletais, a ocorrência de lesões letais foi pouco expressiva. Essa distribuição espacial dos danos celulares sugere variação na intensidade da poluição ou na biodisponibilidade dos contaminantes ao longo da área estudada.

Figura 10. Níveis de alteração de micronúcleos em zebrafish por ponto



De modo geral, os resultados demonstram que a presença de alterações nucleares e citoplasmáticas em eritrócitos de *Danio rerio* identificou tanto efeitos iniciais de estresse genotóxico (subletais) quanto níveis mais críticos de comprometimento celular (letais). A alta frequência de micronúcleos (Figura 10) e núcleos com bolha aponta para a existência de pressão ambiental genotóxica persistente, enquanto a predominância de citoplasma vacuolizado em alguns pontos sugere risco acentuado à sobrevivência celular.

Tabela 3. Alterações Eritrocitárias em *Danio rerio* em (%) nos Pontos de Amostragem da Bacia do Rio Pedreira

Alteração	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
Invaginação Nuclear	3,83%	3,20%	1,54%	1,65%	0,82%	0,00	0,42%
Brotamento Nuclear	12,20%	15,70%	13,85%	14,84%	14,40%	16,94%	14,83%
Núcleo Vacuolizado	12,54%	14,24%	0,00	13,74%	10,70%	9,12%	10,17%
Binucleada	0,70%	2,62%	2,31%	1,10%	0,00	0,00	0,00
Núcleo Lobulado	12,54%	2,03%	13,08%	1,10%	0,00	0,98%	5,08%
Micronúcleo	12,89%	18,90%	8,08%	8,24%	11,93%	15,64%	14,83%
Núcleo Bilobado	1,39%	0,00	0,77%	0,00	0,00	0,33%	0,85%
Núcleo com Bolha	14,29%	17,73%	21,54%	14,29%	16,05%	18,57%	14,83%
Botão	1,39%	1,16%	2,31%	1,10%	1,23%	0,65%	0,42%
Núcleo Lobado	19,16%	19,77%	17,31%	15,93%	11,11%	10,75%	7,20%
Constrições							
Nucleares	6,27%	2,62%	1,54%	0,55%	0,41%	0,33%	1,27%
Núcleo Entalhado	1,39%	0,00	0,38%	0,00	0,00	0,00	0,00
Rim	1,39%	0,87%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42%
Cito. Vacuolizado	0,00	0,87%	16,54%	27,47%	33,33%	26,06%	29,24%
Ponte Nuclear	0,00	0,29%	0,77%	0,00	0,00	6,06%	0,42%

Fonte. Autor

5.3 EMBRIOTOXICIDADE

Os resultados dos efeitos letais, subletais e de teratogenicidade em embriões de peixe-zebra (*Danio rerio*) expostos às amostras do Rio Pedreira (P1 a P7) são apresentados na (Tabela 4). Os efeitos observados nos animais se mostraram distintos no que se refere aos pontos e aos períodos de desenvolvimento (24 a 96 hpf).

Em relação aos efeitos letais, foi observada uma mortalidade significativa em todos os pontos amostrais em comparação ao controle. O ponto P4 apresentou os maiores índices de mortalidade, atingindo 19,3% em 24hpf e mantendo-se elevado até 96hpf (19,2%). O ponto P3 também mostrou toxicidade letal considerável, com 13,6% de mortalidade em 24hpf. Mesmo nos pontos periféricos, como P1 e P7, a mortalidade foi superior à do grupo controle (0,1% a 1,1%), indicando um estresse ambiental disseminado ao longo do trecho estudado.

A eclosão dos embriões foi estritamente afetada, especialmente nos pontos intermediários. Enquanto o grupo controle apresentou taxas de eclosão de 90,4% (48hpf) a 94,2% (96hpf), os embriões expostos ao ponto P4 mostraram uma redução, com apenas 33,9% de eclosão em 48hpf e 40,2% em 96hpf. Os pontos P3 e P5 também apresentaram inibição significativa da eclosão (57,5% e 52,5% em 96hpf, respectivamente), sugerindo a presença de contaminantes que interferem nos processos enzimáticos ou mecânicos necessários para o rompimento do córion.

Os efeitos subletais foram avaliados primordialmente pela frequência cardíaca (FC). Observou-se uma bradicardia severa nos embriões expostos, com destaque para o ponto P4, onde a FC em 24hpf foi de apenas 7,4 bpm, comparada aos 95,0 bpm do controle. Em 96hpf, embora tenha ocorrido uma tentativa de recuperação fisiológica, a FC em P4 (111,8 bpm) permaneceu significativamente inferior à do controle (196,5 bpm). Esse padrão de depressão cardíaca foi observado em todos os pontos, seguindo um gradiente de impacto que culmina na região central da amostragem (P3, P4 e P5).

Os efeitos teratogênicos (deformidades e atrasos no desenvolvimento) foram frequentes e significativos. O atraso no desenvolvimento (Delay) foi o efeito mais proeminente, atingindo 80,4% em P4 nas primeiras 24hpf e persistindo acima de 86% até o final do experimento. Outras anomalias morfológicas incluíram, (EP): Com incidência máxima de 47,2% em P4 (96hpf), (ESV): Atingindo 33,6% em P4 (24hpf), (DC): Observada em até 23,3% dos embriões expostos ao ponto P4.

Tabela 4. Efeitos letais e subletais avaliados nos embriões de *Danio rerio* expostos aos elutriados dos sedimentos coletados em sete pontos (P1 – P7), no mês de novembro, período seco na BHRP, durante o tempo de exposição 24, 48, 72 e 96hpf (horas pós-fertilização)

Siglas: EP – endema de pericárdio; ESV – endema de saco vitelínico; DC- deformação na coluna; Delay – retardo geral desenvolvimento; FC – frequência cardíaca; BPM – batimentos por minutos; *- Diferença significativa.

	Efeito	Controle	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
24hpf	Coagulação	2.9 ± 1.1	5.3 ± 2.1	11.7* ± 0.7	22.5* ± 2.0	29.1* ± 2.6	24.1* ± 4.6	16.7* ± 1.7	8.0 ± 2.1
	Mortalidade	0.1 ± 0.1	2.2* ± 0.6	5.8* ± 0.8	13.6* ± 0.4	19.3* ± 1.2	16.4* ± 0.9	10.4* ± 1.1	5.4* ± 1.3
	Eclosão	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
	FC	95.0 ± 3.1	82.4 ± 3.1	72.8* ± 12.6	35.9* ± 11.3	7.4* ± 5.8	20.8* ± 5.8	41.1* ± 8.6	71.1* ± 2.6
	Delay	2.9 ± 1.6	8.8 ± 1.7	1.5 ± 10.6* ±	58.8* ± 5.8	5.1 ± 46.1* ±	75.0* ± 0.9	2.8 ± 25.3* ±	21.9* ± 4.0
	EP	0.6 ± 0.8	6.5* ± 1.3	3.3	30.3* ± 1.5	2.6 ± 33.6* ±	39.8* ± 1.1	1.9 ± 18.3* ±	9.7* ± 1.4
	ESV	0.2 ± 0.4	4.6* ± 0.9	9.7* ± 1.5	20.5* ± 0.8	1.3 ± 22.2* ±	27.1* ± 1.0	1.3 ± 13.2* ±	7.5* ± 2.5
	DC	0.0 ± 0.0	2.8 ± 1.3	6.3* ± 0.5	15.8* ± 0.6	0.4	18.6* ± 1.4	2.3	5.6* ± 1.1
	Coagulação	3.5 ± 1.4	1.3 ± 1.1	9.2* ± 1.8	18.1* ± 1.4	28.6* ± 1.4	24.3* ± 1.6	17.6* ± 3.5	7.7 ± 1.1
	Mortalidade	1.2 ± 1.3	3.1 ± 1.7	5.8* ± 1.4	13.2* ± 0.9	19.5* ± 0.0	15.5* ± 1.0	12.1* ± 1.2	5.8* ± 0.5
48hpf	Eclosão	90.4 ± 4.9	89.4 ± 5.5	3.7 ± 77.5* ±	58.9* ± 2.3	1.5 ± 33.9* ±	52.3* ± 5.5	5.2 ± 64.1* ±	87.3 ± 2.7
	FC	146.4 ± 5.0	147.2 ± 8.1	130.8 ± 5.3	88.4* ± 6.6	69.2* ± 3.1	85.6* ± 4.7	104.2* ± 16.0	135.5 ± 5.0
	Delay	6.4 ± 3.8	12.3 ± 3.8	3.1 ± 25.3* ±	55.3* ± 5.2	1.6 ± 86.2* ±	68.9* ± 3.3	1.1 ± 52.1* ±	21.3* ± 5.8
	EP	2.1 ± 2.5	5.3 ± 0.8	0.9 ± 14.2* ±	31.5* ± 2.7	2.6 ± 45.3* ±	38.2* ± 2.3	2.5 ± 25.1* ±	12.8* ± 2.6
	ESV	2.0 ± 1.8	2.9 ± 2.3	8.5* ± 0.9	21.6* ± 2.4	1.4 ± 33.4* ±	28.6* ± 1.2	2.6 ± 17.7* ±	8.3* ± 2.4
	DC	0.0 ± 0.0	3.0* ± 0.7	5.5* ± 1.6	15.2* ± 0.6	1.1 ± 23.3* ±	19.3* ± 1.3	0.8 ± 12.3* ±	6.1* ± 0.6
	Coagulação	1.7 ± 0.6	5.6 ± 1.3	8.9* ± 1.3	21.7* ± 1.2	28.8* ± 2.6	22.4* ± 4.0	15.9* ± 1.5	9.8* ± 1.0
	Mortalidade	1.1 ± 1.1	3.5* ± 0.1	5.6* ± 0.5	13.6* ± 1.5	18.6* ± 0.8	16.5* ± 0.9	11.3* ± 1.0	5.2* ± 0.8
	Eclosão	95.4 ± 4.1	90.1 ± 3.2	8.9 ± 85.0* ±	58.3* ± 1.3	0.7 ± 42.3* ±	53.4* ± 2.9	0.9 ± 63.5* ±	81.9* ± 3.5
	FC	187.0 ± 15.2	187.1 ± 8.2	174.2 ± 3.5	143.6* ± 9.1	115.6* ± 7.0	123.9* ± 14.3	153.0* ± 8.6	175.7 ± 7.0
72hpf	Delay	2.2 ± 1.3	3.1 ± 18.2* ±	5.2 ± 22.5* ±	61.0* ± 3.8	3.3 ± 83.8* ±	71.8* ± 3.9	3.9 ± 49.5* ±	22.9* ± 1.1
	EP	1.8 ± 0.9	5.9* ± 0.8	0.5 ± 12.6* ±	31.8* ± 0.9	0.3 ± 45.0* ±	39.5* ± 2.3	2.7 ± 25.2* ±	11.9* ± 1.1
	ESV	1.7 ± 1.7	5.5 ± 2.3	9.0* ± 3.0	24.2* ± 0.8	3.1 ± 32.4* ±	27.3* ± 0.8	0.9 ± 18.1* ±	8.7* ± 0.5
	DC	0.5 ± 0.8	1.8 ± 1.4	6.1* ± 1.2	15.3* ± 0.8	0.7 ± 22.4* ±	19.3* ± 0.8	0.9 ± 12.6* ±	6.0* ± 0.8
	Coagulação	1.7 ± 1.4	5.2 ± 0.7	8.5* ± 2.5	17.6* ± 0.8	30.2* ± 1.2	22.3* ± 0.9	17.5* ± 3.7	8.5* ± 3.3
	Mortalidade	1.1 ± 0.5	3.0 ± 0.3	7.2* ± 1.8	12.7* ± 0.6	19.2* ± 0.9	16.3* ± 1.4	11.6* ± 1.5	5.4* ± 1.1
	Eclosão	94.2 ± 6.3	88.8 ± 4.2	1.5 ± 74.2* ±	57.5* ± 6.5	1.7 ± 40.2* ±	52.5* ± 2.3	4.8 ± 63.2* ±	81.8* ± 1.9
	FC	196.5 ± 14.2	188.4 ± 2.2	175.1* ± 1.1	144.9* ± 5.9	111.8* ± 6.7	124.2* ± 5.3	147.7* ± 3.9	180.2* ± 4.9
	Delay	3.6 ± 6.2	3.1 ± 14.3* ±	2.5 ± 29.5* ±	54.8* ± 3.0	3.8 ± 86.3* ±	74.6* ± 6.2	1.2 ± 50.7* ±	19.8* ± 4.0
	EP	0.3 ± 0.5	6.2* ± 1.4	1.2 ± 12.3* ±	30.6* ± 3.2	0.8 ± 47.2* ±	38.0* ± 0.7	2.7 ± 26.1* ±	10.8* ± 2.6
96hpf	ESV	0.4 ± 0.4	8.2* ± 1.7	2.6 ± 10.2* ±	23.8* ± 0.8	0.8 ± 31.5* ±	28.2* ± 1.9	3.2 ± 16.4* ±	9.9* ± 1.9
	DC	0.0 ± 0.0	2.0* ± 1.1	6.5* ± 1.1	15.0* ± 0.3	0.7 ± 22.5* ±	19.1* ± 0.8	1.0 ± 12.5* ±	5.3* ± 0.3

Os resultados comprovam que as amostras coletadas nos sete pontos do Rio Pedreira são tóxicas para os estágios iniciais de vida de *Danio rerio*, apresentando um gradiente de toxicidade mais acentuado nos pontos intermediários (P3, P4 e P5). De acordo com estudos sobre a bacia do Rio Pedreira em Macapá-AP (Souza *et al.*, 2015), a região sofre pressões antrópicas decorrentes de atividades de mineração histórica, retirada de material para construção civil e expansão urbana desordenada, o que pode explicar a presença de contaminantes nos sedimentos e na coluna d'água.

A mortalidade observada e o atraso no desenvolvimento corroboram pesquisas anteriores que utilizam o modelo peixe-zebra para avaliar rios amazônicos impactados por metais pesados e hidrocarbonetos (Silva, 2013). O Rio Pedreira, embora possua trechos com águas visualmente claras, atua como um repositório de substâncias que podem ser ressuspensas, afetando a biota aquática (Almeida, 2022). A bradicardia severa e a alta incidência de edemas pericárdicos são biomarcadores clássicos de exposição a poluentes orgânicos persistentes e metais, que interferem na sinalização cálcica e no desenvolvimento do sistema cardiovascular (ABE *et al.*, 2021).

A inibição da eclosão observada, particularmente em P4, sugere que os contaminantes presentes podem estar inibindo a enzima corionase ou alterando a permeabilidade do córion, dificultando a transição para a fase larval (Lima, 2019). Este efeito tem implicações ecológicas graves, pois reduz o recrutamento de novas populações de peixes no ambiente natural.

5.4 A IMPORTÂNCIA DA TOXICOLOGIA NO ENSINO DE QUÍMICA AMBIENTAL E NAS ESCOLAS DE ENSINO MÉDIO

A inserção da toxicologia no currículo de Química do Ensino Médio apresenta-se como uma estratégia pedagógica potente para a contextualização do conhecimento científico. Ao relacionar conceitos químicos abstratos com os efeitos de substâncias no organismo e no ambiente, promove-se uma aprendizagem significativa que ultrapassa a memorização de fórmulas (Lopes *et al.*, 2011). Segundo Silva (2008), a experimentação voltada para a consciência ético-ambiental no uso de produtos químicos é essencial para formar cidadãos capazes de avaliar os riscos das substâncias presentes em seu cotidiano. Assim, a toxicologia atua como uma ponte entre a teoria acadêmica e a realidade social do estudante.

No contexto da Química Ambiental, o estudo de contaminantes permite aos alunos compreenderem as interações moleculares sob uma ótica de impacto biológico. A interdisciplinaridade, preconizada pela BNCC, encontra na ecotoxicologia um campo fértil para integrar Química, Biologia e Geografia (Brasil, 2018). Como aponta Ribeiro *et al.* (2021), a

abordagem de temas como agrotóxicos e metais pesados nas escolas de educação básica facilita o mapeamento de problemas locais e a percepção da relevância do monitoramento hídrico. Essa prática educativa empodera o aluno a intervir de forma fundamentada em discussões sobre saúde pública e preservação ambiental.

A utilização de modelos biológicos simplificados, como o zebrafish, embora complexa, pode ser adaptada para demonstrar visualmente os efeitos da poluição, tornando o ensino de Química mais interativo e engajador (Reis, 2019). Santos Filho *et al.* (2020) destacam que ferramentas didáticas baseadas em ecotoxicologia promovem a educação científica ao estimular o pensamento crítico sobre como a atividade humana altera os ciclos biogeoquímicos. Portanto, a toxicologia não é apenas um conteúdo adicional, mas um eixo articulador que dá sentido social ao ensino de ciências exatas, preparando o jovem para os desafios do Antropoceno (Miranda, 2018).

6. CONCLUSÃO

A investigação realizada na Bacia Hidrográfica do Rio Pedreira permitiu diagnosticar que a qualidade hídrica da região encontra-se sob possível contaminação, apresentando parâmetros físico-químicos em desacordo com a Resolução CONAMA 357/2005. A acidez acentuada, com pH médio de 4,71, e os baixos níveis de oxigênio dissolvido indicam um ambiente estressor que, embora influenciado por fatores naturais amazônicos, pode potencializar a toxicidade de contaminantes. Tais condições comprometem a integridade dos ecossistemas aquáticos e alertam para os riscos no consumo dessas águas pelas populações ribeirinhas locais. O monitoramento contínuo torna-se, portanto, uma medida indispensável para a gestão ambiental.

A utilização do modelo biológico *Danio rerio* foi determinante para confirmar o potencial genotóxico e citotóxico das águas estudadas, revelando danos celulares significativos nos espécimes expostos. A frequência de micronúcleos e outras alterações nucleares, especialmente nos pontos mais próximos de atividades antrópicas, comprova que a poluição ambiental está induzindo instabilidade genética nos organismos. Além disso, a presença de citoplasma vacuolizado em níveis elevados sugere que o impacto hídrico já ultrapassa a capacidade de adaptação celular, resultando em danos letais. Esses biomarcadores funcionam como um termômetro preciso da saúde ambiental da bacia hidrográfica.

O Rio apresenta toxicidade para os estágios iniciais de vida de *Danio rerio*, especialmente nos pontos intermediários da bacia. Foram observados efeitos como mortalidade, atraso no desenvolvimento, alterações cardíacas e inibição da eclosão, indicando a presença de contaminantes ambientalmente relevantes. Mesmo em áreas com aparência preservada, o rio pode atuar como reservatório de substâncias tóxicas capazes de afetar a biota aquática. Esses impactos representam

riscos ecológicos importantes, ao comprometer o desenvolvimento e o recrutamento de organismos aquáticos.

No âmbito educacional, a pesquisa demonstrou que a transposição desses dados científicos para propostas didáticas no ensino médio é uma estratégia eficaz para a contextualização do ensino de Química. Ao relacionar conceitos de metais pesados e toxicidade com a realidade local do Rio Pedreira, promove-se uma aprendizagem significativa que estimula o pensamento crítico dos estudantes. A abordagem proposta permite que os alunos compreendam a ciência não como um saber isolado, mas como uma ferramenta de intervenção social e preservação da vida. Assim, o trabalho cumpre seu papel social ao unir a investigação científica rigorosa com a formação cidadã.

Por fim, conclui-se que a problemática da contaminação hídrica no Amapá exige um olhar interdisciplinar que integre a química ambiental, a toxicologia e a educação. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuras investigações e para a implementação de políticas públicas voltadas à remediação dos impactos identificados na bacia. O zebrafish consolidou-se como um modelo didático e científico de baixo custo e alta eficiência para o monitoramento da Amazônia. Espera-se que este estudo inspire novas práticas pedagógicas que utilizem a realidade ambiental como eixo central, fortalecendo a consciência ecológica e a proteção dos recursos hídricos para as gerações futuras.

- ABE, Flávia Renata et al. Early life stage assays in zebrafish. In: **Toxicity Assessment: Methods and Protocols**. New York, NY: Springer US, 2021. p. 77-92.
- ADIL, Noman et al. Pesticidas, metais pesados e plastificantes: Contaminação e avaliação de risco da qualidade da água potável. **Sustentabilidade**, v. 15, n. 17, p. 13263, 2023.
- ALMEIDA, Mário de Souza. **Elaboração de projetos, TCC, dissertação e tese: uma abordagem simples, prática e objetiva**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- ANA, AN de Á. Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, 2021.
- BABUJI, Preethi et al. Human health risks due to exposure to water pollution: a review. **Water**, v. 15, n. 14, p. 2532, 2023.
- BAUMGARTEN, Maria da Graça Zepka; POZZA, Simone Andréa. Qualidade de águas. **Descrição de parâmetros**, 2001.
- BISWAS, Pinakshi; VELLANKI, Bhanu Prakash; KAZMI, Absar Ahmad. Investigating a broad range of emerging contaminants in a set of anthropogenically impacted environmental compartments. **Science of the Total Environment**, v. 824, p. 153757, 2022.
- BITTENCOURT, Silas Lima et al. **Controle de braquiária usando plantas de cobertura, controle mecânico e químico em sistema agroflorestal**. 2023.
- BOGER, Beatriz et al. Micropoluentes emergentes de origem farmacêutica em matrizes úmidas do Brasil: uma revisão sistemática. **Ciência e Natura**, v. 3, pág. 725-739, 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº357, de 17 de marco de 2005**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar.2005.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.
- BRAUNBECK, Thomas et al. Em direção a uma alternativa para o teste de CL50 aguda em peixes na avaliação química: o teste de toxicidade em embriões de peixes torna-se multiespécie - uma atualização. **ALTEX - Alternativas à experimentação animal**, v. 22, n. 2, p. 87-102, 2005.
- CANEDO, Aryelle *et al.* Micronucleus test and nuclear abnormality assay in zebrafish (*Danio rerio*): past, present, and future trends. **Environmental Pollution**, v. 290, p. 118019, 2021.
- CHAKRAVARTHY, Sridhara *et al.* Zebrafish como modelo in vivo de alto rendimento para genotoxicidade. **Peixe-zebra**, v. 2, pág. 154-166, 2014.
- CHAVES, Marisa de Jesus Silva; BARBOSA, Sergiane Caldas; PRIMEL, Ednei Gilberto. Contaminantes emergentes no ambiente aquático brasileiro: identificação de alvos de potencial

- preocupação com base na ocorrência e no risco ecológico. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 47, p. 67528-67543, 2021.
- COSTA, Carla Regina et al. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química nova**, v. 31, pág. 1820-1830, 2008.
- COSTA, Simone Rutz *et al.* Characterization of different DNA repair pathways in hepatic cells of Zebrafish (*Danio rerio*). **DNA repair**, v. 83, p. 102695, 2019.
- CUNHA, Alan Cavalcanti da *et al.* Qualidade microbiológica da água em rios de áreas urbanas e periurbanas no baixo Amazonas: o caso do Amapá. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, p. 322-328, 2004.
- DA SILVA, Danúbia Tavares; LAFON, Jean Michel; CORRÊA, José Augusto Martins. Distribuição de metais pesados e isótopos de Pb em sedimentos do rio Amapari, setor de Pedra Branca do Amapari–Porto Grande, Amapá, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 8, n. 2, p. 177-203, 2013.
- DA SILVA, Emilly Vitoria Leonardo et al. Modelo didático de embrião do Zebrafish (*Danio rerio*): uma proposta para introdução ao ensino de Medicina Translacional. **Revista Práxis**, v. 16, n. 30, 2024.
- DA SILVA, Olavo Fagundes; CUNHA, Lúcio. Sistema viário e dinâmicas produtivas pioneiras na porção leste da Amazônia setentrional brasileira. **Cadernos de Geografia**, n. 35, p. 3-17, 2016.
- DALZUCHIO, Thaís et al. Biomarcadores de genotoxicidade em eritrócitos de peixes e parâmetros de qualidade da água. In: **Poluição de corpos d'água na América Latina: impacto de contaminantes em espécies de interesse ecológico**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 275-290.
- DAMASCENO, Maria da Conceição Silva et al. Seasonal evaluation of the quality of surface waters of the Amazon River on the waterfront of Macapá City, Amapá, Brazil. **Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, p. 598-613, 2015.
- DE ALMEIDA, Thaís Victória Pires et al. Toxicidade de sedimentos contaminados por metais em um rio neotropical altamente impactado: percepções a partir de ensaios de toxicidade em embriões de peixe-zebra. **Chemosphere**, v. 362, p. 142627, 2024.
- DE AZEVEDO RIBEIRO, Daniel das Chagas; PASSOS, Camila Greff; SALGADO, Tania Denise Miskinis. A temática ambiental Agrotóxicos no Ensino de Ciências da Educação Básica: uma revisão bibliográfica. **Revista da Sociedade Brasileira de Ensino de Química**, v. 2, n. 1, p. e022102-e022102, 2021.
- DE BRITO CASTRO, Djamila; DA SILVA MELO, Roseline; GARLET, Juliana. Fauna edáfica e serrapilheira associadas a dois fragmentos florestais na Amazônia Meridional. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e173111234179-e173111234179, 2022.
- DE OLIVEIRA, Claudia Antonia Campos Rodrigues et al. Avaliação da genotoxicidade em dois estuários amazônicos utilizando *Plagioscion squamosissimus* como biomonitor. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 27, p. 41344-41356, 2022.
-

DE SOUSA MORAIS, Reurysson Chagas; SALES, Marta Celina Linhares. estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de sistema de informação geográfica/Estimation of the natural soil erosion potential of the Upper Gurguéia basin, Piauí-Brazil (...). **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

DE SOUSA, Leidson Ramos; DA SILVA CHAGAS, João Vitor; DE LIMA COSTA, Itamar Victor. MICRORGANISMO NA BIORREMEDIAÇÃO CONTRA CONTAMINAÇÃO DE METAIS PESADOS NO USO DE PESTICIDAS. **Aurum Editora**, p. 37-45, 2025.

DE SOUZA CARDOSO, Filipe; DA SILVA, Carlos Cezar. O ENSINO DE TOXICOLOGIA NO ENSINO MÉDIO: UMA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA. **Anais da Semana de Licenciatura**, p. 344-354, 2024.

DOS SANTOS COSTA, Rafaela; QUADRA, Gabrielle Rabelo; DE OLIVEIRA SOUZA, Helena. Química, Ecotoxicologia e Escola: propostas interdisciplinares. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 17, n. 1, p. 22-32, 2022.

DOS SANTOS FILHO, Ronaldo *et al.* Ciência na escola: Elaboração, aplicação e avaliação de um jogo na temática de ecotoxicologia como ferramenta de educação científica. **Revista Eletrônica Ludus Scientiae**, v. 4, n. 1, p. 20-20, 2020.

DOS SANTOS SOUSA, Jeovana *et al.* Agricultura em Áreas Industriais e Contaminação por Metais Pesados: Estratégias para redução deste Impacto Ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 1, p. 322-331, 2021.

DOS SANTOS-JUNIOR, Robiran José; FISCHER, Marta Luciane. LA VULNERABILIDAD DEL PROFESSOR FRENTE A LOS DESAFÍOS DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL. **Cadernos de Pesquisa**, v. 50, n. 178, p. 1022-1040, 2020.

DOYI, Israel *et al.* Spatial distribution, accumulation and human health risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of the Tano Basin, Ghana. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 165, p. 540-546, 2018.

DUARTE, Lucas Oliveira *et al.* Estimativa da erosão hídrica em uma bacia hidrográfica no estado de Goiás (Brasil) por meio de modelagem e inteligência geoespacial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 081-100, 2023.

DUCA, Gheorghe. Ecological and Environmental Chemistry. **Chemistry Journal of Moldova**, v. 12, n. 1, p. 9–19, 2017.

DUCHARME, Nicole A. *et al.* Comparação dos valores de toxicidade em estágios iniciais de vida do peixe-zebra e em estudos com mamíferos: implicações para testes químicos. **Toxicologia Reprodutiva**, v. 55, p. 3-10, 2015.

FERNANDES, Ângela Paula Duarte Baptista. **Da química à toxicologia: uma abordagem no ensino secundário**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior (Portugal).

FERREIRA, Délis de Oliveira. **Avaliação do potencial toxicológico e teratogênico do extrato aquoso das cascas do cajueiro (*Anacardium occidentale*) utilizando-se peixe zebra (*Danio rerio*) como modelo experimental**. 2020.

FONSECA, Pedro Henrique Soares. Embriotoxicidade de larvas de peixes paulistinha (*Danio rerio*) submetidos a concentrações crescentes de N, N-dimetiltriptamina. 2024.

GIL, Antonio Carlos **Métodos e técnicas de pesquisa social** / Antonio Carlos Gil. - 6. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

GOIS, Jéssica Daniele Lacerda *et al.* **Avaliação de alterações nucleares em peixes das regiões do Médio e Baixo Rio Branco** (Roraima-Brasil). 2025.

GOMES, André Fernandes *et al.* **Efeitos da aplicação de estressores imprevisíveis sobre a estabilidade cromossômica em zebrafish** (*Danio rerio*). 2021.

GOMES, S. S. *et al.* Efeitos tóxicos dos sedimentos do estuário do rio Capibaribe em embriões de zebrafish (*Danio rerio*). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, p. 623-632, 2020.

HASHIMI, Mohammad Hanif; HASHIMI, Rahmatullah; RYAN, Qasimullah. Toxic effects of pesticides on humans, plants, animals, pollinators and beneficial organisms. **Asian Plant Res. J**, v. 5, n. 4, p. 37-47, 2020.

HASSANE, ABDUL *et al.* Impactos socioambientais da erosão do solo em diferentes áreas de manejo na Amazônia brasileira e práticas sustentáveis de conservação do solo: uma revisão da literatura: Socioenvironmental impacts of soil erosion in different management areas in the brazilian Amazon and sustainable soil conservation practices: a literature review. **RCMOS-Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 1, n. 1, 2025.

HILÁRIO, Renato R. *et al.* The fate of an Amazonian savanna: government land-use planning endangers sustainable development in Amapá, the most protected Brazilian state. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1940082917735416, 2017.

HONG, Taeyeon *et al.* Brief guidelines for zebrafish embryotoxicity tests. **Molecules and cells**, v. 47, n. 8, p. 100090, 2024.

JARVIS, Philip *et al.* An assessment of the statistical methods used to analyse toxicology studies. **Pharmaceutical Statistics**, v. 10, n. 6, p. 477-484, 2011.

KATABA, Andrew *et al.* Environmentally relevant lead (Pb) water concentration induce toxicity in zebrafish (*Danio rerio*) larvae. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology**, v. 252, p. 109215, 2022.

KRAWCZYK, Ana Carolina de Deus Bueno *et al.* Meio ambiente: alterações antrópicas no leito de rios e efluentes urbanos podem promover efeitos ecotoxicológicos na ictiofauna e de saúde pública, um estudo de caso. **Saúde e meio ambiente: revista interdisciplinar**, v. 12, p. 279-291, 2023.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Maria de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas 2003.

LI, Mei *et al.* Caracterização de contaminantes em locais de produção de pesticidas no Delta do Rio Yangtze: Resíduos, distribuição e risco ambiental. **Science of the Total Environment**, v. 860, p. 160156, 2023.

LIMA, Mariana Laiz Silva de. **Ensaio de toxicidade aguda em embriões de Zebrafish** (*Danio rerio*) para avaliação de risco associada à exposição ao agrotóxico prometrina. 2019.

- LIMA, Mariana Laiz Silva de. **Ensaio de toxicidade aguda em embriões de Zebrafish (*Danio rerio*) para avaliação de risco associada à exposição ao agrotóxico prometrina**. 2019.
- LOMBA, Roni Mayer et al. Socio-territorial and land conflicts in amapá: contributions to the construction of economic ecological zoning in the state. **International Journal Semiarid**, v. 7, n. 7, 2024.
- LOPES, Renato Matos *et al.* Aprendizagem baseada em problemas: uma experiência no ensino de química toxicológica. **Química Nova**, v. 34, p. 1275-1280, 2011.
- MALHEIROS, Bruno Taranto. **Metodologia da pesquisa em educação**. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- MIRANDA, Jussara Lopes *et al.* O Antropoceno, a educação ambiental e o ensino de química. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1990-2004, 2018.
- MORAES, Jhonatan et al. Modificações da paisagem e expansão do cultivo de grãos em área de savana no estado do Amapá. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2463-2474, 2022.
- MOZETO, Antonio A.; JARDIM, Wilson de F. A química ambiental no Brasil. **Química Nova**, v. 25, n. suppl 1, p. 7-11, 2002.
- NASCIMENTO, Géssica Amorim do *et al.* **Suplementação alimentar com açaí (*Euterpe oleracea*) como potencial modulador das defesas antioxidantes e danos oxidativos em peixe-zebra (*Danio rerio*)**. 2024.
- OLIVEIRA, Claudio de *et al.* **Uso de Peixe Zebra Como Modelo Animal de Intervenção e Patogenicidade**. 2023.
- OLIVEIRA, Thiessa MA et al. Ocorrência e avaliação de risco ambiental de contaminantes emergentes em águas superficiais brasileiras. **Toxicologia e Química Ambiental**, v. 43, n. 10, p. 2199-2210, 2024.
- PADHYE, Lokesh P. et al. Contenção de contaminantes para remediação sustentável de contaminantes persistentes no solo e nas águas subterrâneas. **Journal of hazardous materials**, v. 455, p. 131575, 2023.
- PATEL, NAVEEN et al. Poluentes emergentes no ambiente aquático: fonte, efeito e desafios na biomonitorização e biorremediação - uma revisão. **Pollution**, v. 6, n. 1, p. 99-113, 2020.
- PATHAK, Vinay Mohan et al. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. **Frontiers in microbiology**, v. 13, p. 962619, 2022.
- PAUL, Ganjai Vikram *et al.* Aluminum (Al) causes a delayed suppression of nucleotide excision repair (NER) capacity in zebrafish (*Danio rerio*) embryos via disturbance of DNA lesion detection. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 242, p. 113902, 2022.
- PEI, De-Sheng; STRAUSS, Phyllis R. Zebrafish como sistema modelo para o estudo de danos e reparo do DNA. **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, v. 743, p. 151-159, 2013.

- PINTO, Antônia Gomes Neta *et al.* Efeitos da ação antrópica sobre a hidrogeoquímica do rio Negro na orla de Manaus/AM. **Acta amazonica**, v. 39, p. 627-638, 2009.
- POMPERMAYER, Fabiana Cunha Leão *et al.* Programa de Apoio e Educação em Saúde Ambiental no estado do Amapá: a busca por uma educação ambiental que contribua para a construção de uma sociedade ambientalmente saudável e sustentável. **Sistemas & Gestão**, v. 15, n. 3, p. 314-321, 2020.
- PRADO, Alexandre GS. Química verde, os desafios da química do novo milênio. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 738-744, 2003.
- QUEIROZ, R.; YOKOYAMA, T. **Levantamento de aspectos físico-químicos da água no perímetro urbano de Tomé-Açu, Pará**. Tomé-Açu: UFRA, 2024.
- RAUPP, Daniele Trajano; CAMPO, Leandra Franciscato; LIMA, Lisiane de Brida. Abordando a Temática poluição hídrica no Ensino Médio: uma proposta de sequência didática com foco nos contaminantes emergentes para o ensino de funções orgânicas mistas. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática-RBECM. Passo Fundo/RS**. Vol. 2, no. 2 (Jul./Dez. 2019), p. 407-430, 2019.
- REGINATO, Bruna Conte *et al.* Análise de Metais Pesados pelo Método de Biomonitoramento no Rio Cachoeira, Região Nordeste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 310-324, 2023.
- REIS, Neuza Rosane Guimarães *et al.* **Oficina de bioindicadores para uma turma de ensino médio**. In: IV Mostra de Pesquisa, Ensino e Extensão do IFRS-Campus Viamão. 2019.
- ROCHA, J. *et al.* Eucalyptus forestry in Brazilian Pampa biome: between developmental illusion and sustainable inefficacy. **Ciência e Natura**, v. 42, n. 35, p. 1-25, 2020.
- ROCHA-FILHO, Romeu C.; BIAGGIO, Sônia R.; BOCCHI, Nerilso. As primeiras vinte reuniões anuais da SBQ: uma visão da evolução da química no Brasil. **Química Nova**, v. esp, pág. 66-74, 1997.
- RONCA P.A.C. **A aula operatória e a construção do conhecimento**. São Paulo: Edisplan, 1989.
- SAIKI, Ryunosuke *et al.* Panorama combinado de variantes de nucleotídeo único e alterações no número de cópias na hematopoiese clonal. **Nature medicine**, v. 27, n. 7, p. 1239-1249, 2021.
- SCOTT, Sarah B.; GARDINER, Mary M. Trace Metals in Nectar of Important Urban Pollinator Forage Plants: A Direct Exposure Risk to Pollinators and Nectar-Feeding Animals in Cities. **Ecology and Evolution**, v. 15, n. 4, p. e71238, 2025.
- SHARMA, Anket *et al.* Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 11, p. 1446, 2019.
- SILVA, Lídia Aguiar da. **Biomarcadores de exposição e efeito indicam alterações na saúde do peixe *Aequidens pallidus* (Cichliformes, Cichlidae) após exposição in situ em igarapés urbanos**. 2022.
- SOARES, Vanessa Mietto *et al.* Aquatox: uma proposta de educação ambiental na escola. **Educação Ambiental em Ação**, v. 58, 2016.

SOLANO, Flávio Alípio Rodrigues *et al.* Investigação sobre a concentração de ferro em águas de abastecimento público no município de Breves (PA). **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. e20512139788-e20512139788, 2023.

SOUZA, Larissa Costa de et al. Metais-traço em sedimentos de rios amazônicos do norte do Brasil: variações espaço-temporais, fontes e riscos ecológicos. **Toxics** , v. 13, n. 10, p. 891, 2025.

SOUZA, Naziel Santos; SÁ-OLIVEIRA, Júlio César; SILVA, Erineide Silva. Avaliação da qualidade da água do alto rio Pedreira, Macapá, Amapá. **Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)**, v. 5, n. 2, 2015.

TESOLIN, Gabrielli Aparecida Sanches *et al.* Avaliação da toxicidade de herbicidas usados em cana-de-açúcar para o Paulistinha (*Danio rerio*). **O mundo da Saúde**, v. 38, n. 1, p. 86-97, 2014.
THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa-ação**. Cortez editora, 2022.

THOMAS, Heleny; KRAWCZYK, Ana Carolina de Deus Bueno. Ecotoxicologia na escola: uma proposta para inserção em aulas práticas de ciências. **Ecotoxicologia e Contaminação Ambiental** , v. 18, n. 1, p. 28-37, 2023.

TOMASIEWICZ, Henry G. et al. Zebrafish como sistema modelo para estudos de saúde ambiental em salas de aula do 9º ao 12º ano. **Zebrafish** , v. 11, n. 4, p. 384-395, 2014.

TUDI, Muyesaier et al. Desenvolvimento agrícola, aplicação de pesticidas e seu impacto no meio ambiente. **Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública** , v. 18, n. 3, p. 1112, 2021.

VIANA, Lucilene Finoto et al. Bioacumulação de metais e efeitos genotóxicos em fêmeas de *Colomesus asellus* coletadas no estuário do Rio Amazonas, Amapá, Brasil. **Limnética** , v. 42, n. 2, pág. 203-214, 2023.

VIDEIRA, Cassiane da Silva *et al.* **Avaliação de metais pesados na bacia do Rio Amapari, Amapá e uma perspectiva da toxicologia para o ensino de química**. 2023.

XU, Hang et al. Global Environmental Geochemistry and Molecular Speciation of Heavy Metals in Soils and Groundwater from Abandoned Smelting Sites: Analysis of the Contamination Dynamics and Remediation Alternatives in Karst Settings. **Toxics**, v. 13, n. 7, p. 608, 2025.

ZANELLA, Jean Rafael Dias; TOMAZONI, Julio Caetano; AGUIAR, Wagner de. Determinação da Erosão e Transporte de Sedimentos em Bacia Hidrográfica do Sudoeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 04, p. 2103-2118, 2023.

ZENG, Jiaqing et al. Heterogeneous distributions of heavy metals in the soil-groundwater system empowers the knowledge of the pollution migration at a smelting site. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, p. 140307, 2023.

APÊNDICE A – PROPOSTA DIDÁTICA 1

I - 1ª PROPOSTA	
Disciplina	Química
Conteúdo	Metais pesado e a Química da Água
Tema da aula	Química geral
Período letivo	1º Bimestre
Série	1ª Série do Ensino Médio
Carga horária	2 h/a – 50min/50min
II – OBJETIVO GERAL	
• Compreender as propriedades químicas dos metais pesados e seus impactos na qualidade da água e saúde humana.	
III – OBJETIVO ESPECÍFICO	
• Identificar metais pesados na tabela periódica e suas características eletrônicas. • Relacionar a solubilidade e o pH com a biodisponibilidade de metais. • Discutir as fontes de contaminação por metais pesados na região amazônica.	
IV - CONTEÚDO PROGRMÁTICO	
• Tabela Periódica (Metais de Transição); • Ligações Químicas; • Equilíbrio Ácido-Base; • Bioacumulação e Biomagnificação.	
V - METODOLOGIA	
No primeiro momento, a aula terá início com uma abordagem expositiva dialogada, buscando ativar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre água, poluição e metais presentes no cotidiano. A partir desse levantamento inicial, o professor introduzirá o conceito de metais pesados, localizando-os na Tabela Periódica, com ênfase nos metais de transição e em suas características eletrônicas. Serão apresentados dados reais de qualidade da água do Rio Pedreira, contextualizando o conteúdo à realidade amazônica e despertando o interesse dos alunos. Durante a exposição, conceitos como ligações químicas, solubilidade e equilíbrio ácido-base serão discutidos de forma integrada, relacionando o pH da água à mobilidade e biodisponibilidade dos metais. A participação dos estudantes será incentivada por meio de questionamentos e exemplos do cotidiano. Esse momento visa construir uma base conceitual sólida e contextualizada.	

No segundo momento, os alunos serão organizados em grupos para a realização de uma atividade investigativa e colaborativa. Cada grupo ficará responsável por mapear possíveis fontes de contaminação por metais pesados na região amazônica, considerando atividades como garimpo, descarte inadequado de resíduos, efluentes industriais e esgoto doméstico. Os estudantes deverão relacionar essas fontes aos impactos ambientais e à saúde humana, introduzindo os conceitos de bioacumulação e biomagnificação na cadeia alimentar. A atividade estimulará a leitura, a discussão e o pensamento crítico, permitindo que os alunos articulem teoria e realidade local. O professor atuará como mediador, orientando as discussões e auxiliando na organização das ideias. Ao final, os grupos socializarão suas conclusões, promovendo a troca de conhecimentos entre a turma.

No terceiro momento, será transmitido um vídeo simples de simulação envolvendo a precipitação de metais, utilizando sulfato de cobre e hidróxido de sódio, com o objetivo de visualizar reações químicas relacionadas à remoção de metais da água. Antes do vídeo, o professor explicará os conceitos químicos envolvidos, como formação de precipitados e influência do pH. Durante a transmissão, os alunos observarão as mudanças visuais e registrarão suas percepções, relacionando o fenômeno observado aos processos de tratamento de água. Após isso, será promovida uma discussão coletiva para interpretar os resultados e conectar o que viram aos impactos ambientais estudados.

VI – RECURSOS DIDÁTICOS

- Projetor multimídia;
- Amostras de água simuladas;
- Tabela Periódica;
- Artigos científicos adaptados.

VII - AVALIAÇÃO

Elaboração de um mapa mental relacionando: Atividade Humana , Metal Pesado, Efeito Biológico.

VII - REFERÊNCIAS

FERNANDES, Maria Angélica Moreira; PORTO, Paulo Alves. Investigando a presença da história da ciência em livros didáticos de química geral para o ensino superior. Química Nova, v. 35, p. 420-429, 2012.

APÊNDICE B – PROPOSTA DIDÁTICA 2

I - 2ª PROPOSTA	
Disciplina	Química
Conteúdo	Toxicologia Ambiental com Zebrafish
Tema da aula	Química geral, Biologia
Período letivo	1º Bimestre
Série	1ª Série do Ensino Médio
Carga horária	2 h/a – 50min/50min
II – OBJETIVO GERAL	
Analisar os efeitos de poluentes ambientais em organismos vivos utilizando o modelo zebrafish.	
III – OBJETIVO ESPECÍFICO	
• Conhecer o ciclo de vida do zebrafish e sua importância como modelo científico. • Observar (via imagens/vídeos) alterações morfológicas causadas por toxinas. • Discutir a ética no uso de animais e os princípios dos 3Rs.	
IV - CONTEÚDO PROGRAMÁTICO	
• Biologia Celular; • Genética Básica; • Toxicologia; • Ética na Ciência.	
V - METODOLOGIA	
No primeiro momento da aula, será realizada a contextualização do tema Toxicologia Ambiental, iniciando com uma problematização sobre a presença de poluentes em ambientes aquáticos e seus impactos sobre os organismos vivos. O professor apresentará o zebrafish (<i>Danio rerio</i>) como modelo experimental amplamente utilizado em pesquisas científicas, destacando seu ciclo de vida, características celulares e genéticas, bem como sua relevância para estudos toxicológicos. Serão utilizados vídeos e imagens do desenvolvimento embrionário do zebrafish para facilitar a compreensão dos conceitos. A partir desse material, os alunos serão convidados a participar de uma discussão orientada, relacionando ciência, meio ambiente e saúde. Esse momento tem como objetivo despertar o interesse, ativar conhecimentos prévios e introduzir o papel da ciência no monitoramento ambiental. No segundo momento, os estudantes participarão de uma atividade investigativa baseada em um estudo de caso sobre a contaminação ambiental em ecossistemas aquáticos. Serão apresentadas micrografias de eritrócitos de zebrafish contendo micronúcleos, explicando o significado desse biomarcador como indicativo de danos genéticos causados por agentes tóxicos. Organizados em grupos, os alunos irão observar as imagens, identificar alterações morfológicas e interpretar gráficos de frequência de micronúcleos. O professor atuará como mediador do processo, orientando a análise dos dados e incentivando a formulação de hipóteses sobre a relação entre poluição e efeitos celulares.	

Essa etapa busca desenvolver habilidades de observação científica, interpretação de dados e trabalho colaborativo.

No terceiro momento, será promovido um debate orientado sobre a ética no uso de animais em pesquisas científicas, abordando os princípios dos 3Rs (Redução, Refinamento e Substituição). Os alunos serão estimulados a refletir sobre a responsabilidade da ciência na preservação ambiental e na tomada de decisões sustentáveis. Como atividade avaliativa, cada estudante elaborará um relatório intitulado “Cientista por um Dia”, no qual deverá interpretar os resultados apresentados, discutir possíveis impactos ambientais e sugerir medidas de mitigação da poluição. Esse momento final visa consolidar a aprendizagem, integrando conhecimentos científicos, pensamento crítico e consciência ambiental.

VI – RECURSOS DIDÁTICOS

- Micrografias de micronúcleos;
- Vídeos sobre o desenvolvimento embrionário do zebrafish;
- Computadores com acesso à internet.
- Projetor
- Notebook

VII - AVALIAÇÃO

Relatório de "Cientista por um Dia", onde o aluno deve interpretar um gráfico de frequência de micronúcleos e sugerir medidas de mitigação.

VII - REFERÊNCIAS

CANEDO, A. *et al.* Micronucleus test in zebrafish. **Environmental Pollution**, 2021.