

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO**

**HISTOPATOLOGIA DE FÍGADO E
BRÂNQUIAS DE *Metynnis maculatus* (Kner,
1858) E *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858:
Characiformes: Serrasalminidae COLETADOS
EM LAGOS DE LINHARES/ES APÓS O
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

ANA PAULA MILLANI GUTIERREZ

São Mateus/ES

Dezembro/2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO

**HISTOPATOLOGIA DE FÍGADO E
BRÂNQUIAS DE *Metynnis maculatus* (Kner,
1858) E *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858:
Characiformes: Serrasalminidae COLETADOS
EM LAGOS DE LINHARES/ES APÓS O
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

ANA PAULA MILLANI GUTIERREZ

Monografia de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Federal
do Espírito Santo, como requisito
parcial para obtenção do título de
BACHAREL EM CIÊNCIAS
BIOLÓGICAS.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliana Castro Monteiro Pirovani

Coorientadora: Msc. Lorena Ziviani Bevitório

São Mateus/ES

Dezembro/2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

FOLHA DE APROVAÇÃO


Autor: ANA PAULA MILLANI GUTIERREZ

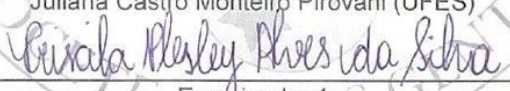
Título:

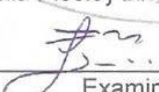
HISTOPATOLOGIA DE FÍGADO E BRÂNQUIAS DE *Metynnis maculatus* (Kner, 1858) e *Pygocentrus natterii* Kner, 1858: Characiformes: Serrasalminidae COLETADOS EM LAGOS EM LINHARES/ES APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

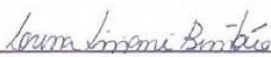
Monografia do Curso de Ciências Biológicas (Bacharelado)
Defendida e aprovada em 07/12/2023

Com nota 9,0 (nove) pela comissão julgadora:


Orientador(a) e presidente da Comissão Examinadora
Juliana Castro Monteiro Pirovani (UFES)


Examinador 1
Priscila Plesley Alves da Silva (FEST)


Examinador 2
Luiz Fernando Duboc da Silva (UFES)


Coorientador
Lorena Ziviani Bevitório (FEST)

Centro Universitário Norte do Espírito Santo

Rodovia BR 101 Norte, Km. 60, Bairro Litorâneo, CEP 29932-540

São Mateus - ES

Sítio eletrônico: <http://www.ceunes.ufes.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por mais esta conquista alcançada ao longo deste tempo. Sua presença e orientação foram como uma luz constante em toda minha jornada acadêmica. Pela inspiração que recebi, pelas oportunidades concedidas e pela clareza de pensamento que me foi fornecida nos momentos mais desafiadores. Cada passo dessa trajetória foi iluminado pela Sua graça e orientação.

Aos meus pais Marco e Rosângela e toda minha família, pelo apoio constante desde o início desta jornada acadêmica. Agradeço por sempre estarem ao meu lado, encorajando e mantendo-me firme ao longo deste percurso.

Ao meu namorado e melhor amigo, Junior, por todo o apoio nos momentos difíceis e nas alegrias compartilhadas. Seu incentivo constante foi fundamental para que eu não desistisse diante dos desafios. Obrigada por estar sempre ao meu lado, fortalecendo-me para seguir em frente.

Aos meus amigos do ensino fundamental, que continuam ao meu lado até hoje, compartilhando não apenas a mesma cidade e faculdade, mas também momentos inesquecíveis. Em especial à Débora, por dividir a vida comigo e por nossa convivência como colegas de moradia. Obrigada por cada conselho sábio e ensinamento valioso que compartilhamos. E ao Vandim, por sua presença constante e seus sábios conselhos, meu profundo agradecimento. Levo cada um de vocês no coração, pois sei que nossa amizade é para a vida toda.

Aos meus amigos de Minas, presentes na mesma cidade e faculdade, por todo apoio e suporte contínuo. Cada gesto de vocês foi significativo e valoroso. Levarei para sempre em meu coração a amizade e o apoio que me proporcionaram ao longo desta jornada.

A minha parceira de graduação, Korina, por cada momento compartilhado, tanto nos momentos de alegria quanto nos desafios. Agradeço por todas as motivações, risadas e apoio incondicional ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença foi fundamental para enfrentarmos juntos cada etapa. Obrigada por tudo.

Aos amigos que São Mateus me proporcionou, por cada momento compartilhado. Vocês foram parte especial desta jornada e suas lembranças estarão sempre presentes em meu coração. Obrigada por tudo.

Aos meus amigos do curso, André, Korina, Ana Larissa, Luana e Bruna, obrigada por cada risada compartilhada, conselhos e momentos especiais que vivemos juntos. Cada um de vocês foi fundamental e especial em minha jornada acadêmica. Obrigada por fazerem parte da minha história.

Ao Laboratório de Biologia Celular e Estrutural, pelas oportunidades e pelo valioso aprendizado proporcionado ao longo desta jornada acadêmica. Cada experiência vivida nesse ambiente contribuiu significativamente para o meu crescimento e conhecimento na área.

Aos companheiros do LABEST, por todo conhecimento compartilhado, pela ajuda em esclarecer dúvidas, pelas risadas compartilhadas e pelos momentos de café. A presença e colaboração de vocês foram fundamentais ao longo desta jornada, tornando-a ainda mais enriquecedora e significativa.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Prof^a. Dr^a Juliana Castro Monteiro Pirovani, por sua confiança, pelas oportunidades concedidas, pelo auxílio incansável e pelos ensinamentos valiosos ao longo dessa jornada acadêmica. Sua orientação foi essencial, e sua dedicação como orientadora é admirável. Sou profundamente grata por ter tido a sorte de ter uma mentora tão dedicada e competente.

Agradeço à minha coorientadora, Msc. Lorena Ziviani Bevitório, pela confiança depositada em mim, pela paciência incansável, valiosos ensinamentos, incentivos constantes e por estar sempre disponível para esclarecer minhas dúvidas. Sua colaboração e orientação foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pelas oportunidades proporcionadas durante minha trajetória acadêmica. Encontrei professores excelentes que foram fundamentais no meu crescimento e aprendizado. Agradeço por todo o apoio e aprendizado oferecidos ao longo do meu percurso na instituição.

Agradeço ao Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA), pela generosa disponibilização das amostras que desempenharam um papel fundamental para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO DE FIGURAS	vi
SUMÁRIO DE TABELAS.....	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1 A BACIA DO RIO DOCE.....	10
1.2 CONTAMINAÇÃO DOS AMBIENTES HÍDRICOS POR METAIS PESADOS. 11	
1.3 BIOMONITORES E BIOMARCADORES	12
1.4 BRÂNQUIAS	14
1.5 FÍGADO	15
1.6 ESPÉCIES EM ESTUDO	16
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
3. OBJETIVOS	27
3.1 GERAL	27
3.2 ESPECÍFICOS	27
4. RESULTADOS:	28
Histopatologia de fígado e brânquias de <i>Metynnis maculatus</i> (Kner, 1858) e <i>Pygocentrus nattereri</i> (Kner, 1858) coletados em lagos de Linhares/ES após o rompimento da barragem de Fundão.	
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

SUMÁRIO DE FIGURAS

- Figura 1:** Filamento branquial, corte transversal, H&E (barra = 16.7 µm) 1) lamela primária; 2) lamela secundária; 3) célula epitelial; 4) célula mucosa; 5) célula pilar; 6) lúmen capilar (lacuna); 7) eritrócitos na luz do capilar; 8) célula de cloreto; 9) célula basais. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000. 15
- Figura 2:** Micrografia de fígado de peixes teleósteos em corte transversal. H&E (barra = 22.8 µm) 1) hepatócitos; 2) ductos biliares; 3 e 4) capilares sinusoide; 5) tecido conjuntivo 6) centro de melanomacrófagos; 7) veia porta. **Fonte:** adaptado de YONKOS, 2000. 16
- Figura 3:** *Pygocentrus nattereri* (Piranha-vermelha). **Fonte:** arquivo pessoal de Júlia Sacramento Barbosa, 2023. 17
- Figura 4:** *Metynnis maculatus* (Pacu-cd). **Fonte:** arquivo pessoal de Júlia Sacramento Barbosa, 2023. 18
- Figura 5:** Mapa dos lago Nova e do Limão, Linhares, norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. **Fonte:** Aparício da Cruz, 2023 33
- Figura 6:** Índice de lesão das brânquias e fígado de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova no período chuvoso de 2021 a 2023. 36
- Figura 7:** Índice dos padrões de lesão das brânquias e fígado de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova nos períodos chuvosos de 2021 a 2023. 37
- Figura 8:** Índice de lesão dos animais de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova nos períodos chuvosos de 2021 a 2023. 408
- Figura 10:** Fotomicrografia de brânquias de peixes avaliados nos lagos do Limão e Nova. A: Descamação epitelial (seta grossa); B: Necrose (círculo); C: hipertrofia (setas); D: hiperplasia (asterisco). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A e C = 50 µm; B e D: 10 µm 39
- Figura 11:** Fotomicrografia de fígado de peixes avaliados nos lagos do Limão e Nova. A: Congestão de vasos sanguíneos (Círculo) B: Alteração citoplasmática (setas finas) C: Alteração Nuclear (setas grossas) D: Necrose (quadrado). Coloração: Hematoxilina & Eosina. A - B = 10 µm e C e D = 50 µm 40

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 1: Frequência (%) das lesões branquiais nos exemplares, *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha) coletados nos lagos do Limão e Nova referente aos 3 períodos chuvosos de 2021 a 2023 **Error! Bookmark not defined.**38

Tabela 2: Frequência (%) das lesões hepáticas nos exemplares, *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha) coletados nos lagos do Limão e Nova referente aos 3 períodos chuvosos de 2021 a 2023..... 40

RESUMO

Após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, toda a extensão da bacia do rio Doce foi contaminada por metais, incluindo ferro, cromo, manganês e mercúrio. Essa contaminação desencadeou um desequilíbrio ecológico nos ecossistemas aquáticos, afetando as comunidades de peixes e suas interações ecológicas. Os peixes desempenham um papel fundamental nos estudos de avaliação dos impactos na vida aquática, uma vez que ocupam níveis tróficos mais elevados na cadeia alimentar e, conseqüentemente, acumulam substâncias tóxicas, principalmente em seus órgãos como brânquias e fígado, devido ao processo de biomagnificação. A histopatologia se revela como uma ferramenta indispensável para a identificação das lesões nos órgãos causadas pela exposição aos contaminantes. Neste estudo, foi examinada a estrutura dos tecidos hepáticos e brânquias de peixes das espécies *Metynnis maculatus* (pacu) e *Pygocentrus nattereri* (piranha-vermelha), coletados ao longo de três estações chuvosas consecutivas (janeiro de 2021 e 2023 e março de 2022) nos lagos Nova e do Limão, localizadas em Linhares, Espírito Santo, após o desastre da barragem de Fundão. As alterações histopatológicas observadas nas brânquias incluíram descamação epitelial, hipertrofia, hiperplasia e necrose. No fígado, foram identificadas congestão de vasos sanguíneos, alterações citoplasmáticas e nucleares nos hepatócitos e necrose. Na análise temporal, não houve diferenças significativas nos índices de lesão das brânquias entre os diferentes períodos de coleta no lago do Limão para nenhuma das espécies. Em relação ao índice de lesão do fígado, apresentaram variação significativa para as ambas espécies ao longo dos diferentes períodos de coleta. No lago Nova, em 2023, no índice de lesão das brânquias de *P. nattereri* foi observado variação significativa comparado a 2022. Já para os *M. maculatus*, não foram encontradas diferenças significativas nos índices de lesão das brânquias entre os diferentes períodos de coleta. Na análise espacial, no índice de lesão das brânquias para *P. Nattereri*, não houve diferenças significativas entre os lagos amostrados. Já para *M. maculatus* não mostraram diferenças significativas entre os lagos em 2021 e 2023, mas houve variação significativa em 2022. Em relação ao índice de lesão do fígado para *M. maculatus*, não mostrou diferenças significativas entre os lagos em 2021 e 2022. Para a espécie *P. Nattereri*, não foram encontradas diferenças significativas entre os locais de coleta. Ao considerar nível trófico, no lago Nova em 2021, houve diferenças significativas no índice de lesão do animal entre as espécies, mas não em 2022 e 2023. No lago do Limão, não foram encontradas diferenças significativas nos índices de lesão do animal entre as duas espécies, nem para cada índice de lesão do órgão. Porém no lago Nova, em 2022 houve variação significativa no índice de lesão do fígado entre as espécies. As lesões encontradas nas brânquias e no fígado das espécies avaliadas neste estudo indicam alterações ambientais nos dois lagos - do Limão e Nova - após o rompimento da barragem de Fundão. Portanto, destaca-se a relevância da histopatologia como biomarcador na avaliação dos contaminantes aquáticos. As lesões encontradas nas brânquias e no fígado das espécies avaliadas neste estudo indicam alterações ambientais nos dois lagos - do Limão e Nova - após o rompimento da barragem de Fundão. Portanto, destaca-se a relevância da histopatologia como biomarcador na avaliação dos contaminantes aquáticos.

Palavras-Chave: biomarcadores, carnívoros, rio Doce, morfologia, onívoros, peixes.

ABSTRACT

After the collapse of the Fundão dam in Mariana, Minas Gerais, the entire Doce river basin was contaminated by metals, including iron, chromium, manganese and mercury. This contamination triggered an ecological imbalance in aquatic ecosystems, affecting fish communities and their ecological interactions. Fish play a fundamental role in studies evaluating impacts on aquatic life, since they occupy higher trophic levels in the food chain and, consequently, accumulate toxic substances, mainly in their organs such as gills and liver, due to the biomagnification process. Histopathology proves to be an indispensable tool for identifying organ damage caused by exposure to contaminants. In this study, the structure of the liver tissues and gills of fish of the species *Metynnis maculatus* (pacu) and *Pygocentrus nattereri* (red piranha) was examined, collected over three consecutive rainy seasons (January 2021 and 2023 and March 2023) in the Nova and Limão lakes, located in Linhares, Espírito Santo, after the Fundão dam disaster. Histopathological changes observed in the gills included epithelial desquamation, hypertrophy, hyperplasia and necrosis. In the liver, congestion of blood vessels, cytoplasmic and nuclear changes in hepatocytes and necrosis were identified. In the temporal analysis, there were no significant differences in the gill lesion indices between different collection periods at lake Limão for either species. Regarding liver lesion indices, both species showed significant variation across different collection periods. At lake Nova in 2023, a significant variation in the gill lesion index was observed for *P. nattereri* compared to 2022. However, for *M. maculatus*, no significant differences were found in gill lesion indices between different collection periods. In the spatial analysis, for *P. nattereri*, there were no significant differences in gill lesion indices between the sampled lakes. However, for *M. maculatus*, there were no significant differences between the lakes in 2021 and 2023, but there was significant variation in 2022. Regarding the liver lesion index for *M. maculatus*, there were no significant differences between the lakes in 2021 and 2022. For *P. nattereri*, no significant differences were found between collection locations. Considering trophic level, in lake Nova in 2021, there were significant differences in the animal's lesion index between the species, but not in 2022 and 2023. In lake Limão, there were no significant differences in the animal's lesion indices between the two species or for each organ lesion index. However, in lake Nova in 2022, there was significant variation in the liver lesion index between the species. The lesions found on the gills and liver of the species evaluated in this study indicate environmental changes in the two lakes - Limão and Nova - after the collapse of the Fundão dam. Therefore, the relevance of histopathology as a biomarker in the assessment of aquatic contaminants stands out.

Keywords: biomarkers, carnivores, Doce river, morphology, omnivores, fish.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 A BACIA DO RIO DOCE

A bacia do rio Doce abrange uma vasta extensão de 86.715 km² e é de significativa importância ambiental. Predominantemente, cerca de 86% dessa bacia está situada ao leste de Minas Gerais, enquanto os 14% restantes estão no nordeste do Espírito Santo. Apesar da sua marcante extensão territorial, que idealmente seria ocupado por aproximadamente 98% da Mata Atlântica, é um bioma globalmente reconhecido como um dos mais cruciais e ameaçados (CBH-DOCE, 2021). O rio Doce é um ecossistema complexo com dois distritos lacustres distintos, o do médio rio Doce e o do baixo rio Doce, inclui os ecossistemas lacustres profundos, representados por lagos, quanto os ecossistemas lacustres rasos, caracterizados por lagoas em diferentes ciclos de desenvolvimento. Esses sistemas estão intimamente ligados ao rio Doce e interagem de várias maneiras, tornando o equilíbrio ecológico dependente não apenas da saúde do rio, mas também da preservação dos lagos, matas, nascentes e vegetação circundante (PINTO-COELHO, 2016).

Na região centro-leste do estado do Espírito Santo, nas proximidades da cidade de Linhares, ao longo do baixo vale do rio Doce, encontra-se um conjunto lacustre composto por dezenas de lagos barrados, distribuídos em diversos domínios geomorfológicos (APRILE *et al.*, 2001; MELLO, 2003; HATUSHIKA *et al.*, 2005; HATUSHIKA *et al.*, 2007; DE SOUZA, 2009; PINTO-COELHO, 2016). O distrito lacustre do baixo rio Doce formam um conjunto de cerca de 35 lagos, destacando-se os lagos de Juparanã, Nova, Palminhas, Palmas e Aguiar, a maioria localizada na margem esquerda do rio (PINTO-COELHO, 2016).

Os lagos em foco neste estudo são: 1) o lago Nova é o segundo maior ecossistema lacustre da região e possui uma área circundante diversificada, com usos variados da terra, como áreas de cultivo, áreas florestais e propriedades de veraneio (BARROSO & MELLO, 2013). Além disso, desempenha um papel fundamental na região, atendendo a várias necessidades, como lazer, pesca e irrigação de culturas (GONÇALVES, 2015). 2) o outro lago abordado neste estudo, que não foi atingido pelos rejeitos de minérios resultantes do rompimento de Fundão, é o lago do Limão que está localizado no Baixo do Rio Doce, é um ambiente lântico, que se caracteriza pela presença abundante de algas e macrófitas, porém com pouca vegetação ciliar. Nas áreas circundantes, é comum encontrar construções, pastagens e plantações, indicando atividades humanas próximas às suas margens. O substrato do lago é predominantemente arenoso, e sua profundidade média atinge cerca de 12 m. Com uma largura variando entre 500 m e 2 km, é perceptível a presença de resíduos sólidos na margem do lago, afetando sua aparência, que tende a ser de água clara com tonalidade

esverdeada (BARROS, L. COMUNICAÇÃO PESSOAL).

1.2 CONTAMINAÇÃO DOS AMBIENTES HÍDRICOS POR METAIS PESADOS

O contínuo e desalinhado desenvolvimento de fábricas, indústrias, assim como atividades pesqueiras, agrícolas e de aquicultura, tem colaborado cada vez mais para a emissão de poluentes no ambiente aquático (VAN DAM *et al.*, 2011). Apesar de muitas dessas substâncias poderem ter origem em fontes naturais, como a lixiviação de rochas, erosão, precipitação ou outras partes do solo onde estão presentes (PAULA, 2006; SEYLER & BOAVENTURA, 2008), as atividades humanas têm aumentado significativamente a concentração desses poluentes em vários ecossistemas (BIANCHINI, 2016). Com base na sua concentração, interação com o ambiente e com os organismos, esses poluentes podem exceder os limites de concentração aceitáveis no ambiente, representando sérios riscos para a biota, tornando-se potenciais agentes tóxicos (RAND & PETROCELLI, 1985). Efluentes domésticos e industriais, bem como substâncias químicas presentes em pesticidas e fungicidas utilizados na agricultura, juntamente com os resíduos provenientes da exploração mineral, representam significativas fontes de metais que afetam o ecossistema aquático (PYLE *et al.*, 2005; MOISEENKO & KUDRYAVTSEA, 2011).

A mineração é uma das principais indústrias do Brasil, com Minas Gerais liderando a produção de minério de ferro no país e no mundo (PASSOS *et al.*, 2017). Os resíduos, que podem ser classificados como materiais estéreis e rejeitos, são produzidos em grandes quantidades e, muitas vezes, contêm elementos químicos tóxicos (SILVA *et al.*, 2012). No Brasil, os resíduos de minério de ferro são frequentemente armazenados em barragens de contenção de rejeitos de mineração. Essas barragens podem se romper por várias razões, incluindo abalos sísmicos ou falhas no planejamento, construção e manutenção. Quando essas barragens se rompem, liberam uma lama tóxica que pode contaminar os cursos d'água e se espalhar por centenas de quilômetros a partir da área de mineração (CARDOZO *et al.*, 2016).

A presença de metais pesados na bacia do rio Doce pode ser atribuída tanto a fatores naturais, devido às condições geomorfológicas da região (como o quadrilátero ferrífero), quanto a contaminação antropogênica resultante das atividades de mineração. O desafio ambiental reside no fato de que a introdução de metais pesados no ecossistema aquático por meio de atividades humanas ocorre em uma escala maior e mais rápida do que os processos naturais. Além disso, o rompimento das barragens de rejeitos levam a imediata liberação de lama e em alta velocidade no ambiente, podendo causar mudanças significativas na paisagem, prejudicar a qualidade da água e afetar negativamente a biota (HATJE *et al.*, 2017; QUEIROZ *et al.*, 2018; MACÊDO *et al.*, 2020).

O desastre ocorrido em novembro de 2015, quando a barragem de Fundão, operada pela Samarco Mineração S/A e localizada no Distrito de Bento Rodrigues, em Mariana-MG, entrou em colapso, foi um evento de extrema gravidade com consequências sérias para o meio ambiente que se estendem até os dias atuais. Uma estimativa aponta que cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério foram liberados no rio Doce, fluindo em direção ao oceano Atlântico (GOMES *et al.*, 2017). De acordo com os relatórios apresentados após o rompimento da barragem de Fundão, houve um aumento na concentração de vários metais e arsênio (As) ao longo da bacia do rio Doce (BIANCHINI, 2016). Entre esses metais, foram observados aumentos na concentração de ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), cádmio (Cd), chumbo (Pb) (GOMES *et al.*, 2019), cromo (Cr) (MACÊDO *et al.*, 2020), magnésio (Mg), alumínio (Al), mercúrio (Hg) e níquel (Ni) (REIS *et al.*, 2020). É importante destacar que o desastre de 2015, que resultou na contaminação do rio Doce, teve repercussões significativas em diversos ecossistemas, incluindo o Lago Nova, que é um dos componentes do complexo lacustre na região do baixo rio Doce (VIEIRA *et al.*, 2022).

Os metais têm propriedades atômicas únicas que conferem alta firmeza à degradação química, física e biológica em ambientes aquáticos. Isso faz com que eles permaneçam na água por muitos anos, mesmo após a proibição de seu uso ou descarte em corpos d'água (MORAES & JORDÃO, 2002; IKEM *et al.*, 2003). A resistência dos metais no ecossistema aquático leva a um aumento gradual de sua concentração, favorecendo sua alta presença na água e absorção pelos organismos vivos (ARAI *et al.*, 2007; RODRIGUES, 2007). Os metais pesados são caracterizados como elementos com uma densidade relativa superior a 5 g/cm³ ou um número atômico acima de 20, abrangendo metais, semimetais e não metais (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Os metais podem ser divididos em duas categorias com base na sua importância para os organismos aquáticos: essenciais e não essenciais. Metais como cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) são considerados essenciais porque desempenham um papel crucial no metabolismo dos organismos, sendo componentes fundamentais de compostos enzimáticos (CORRÊA, 2006). No entanto, esses metais podem se tornar prejudiciais se absorvidos em quantidades excessivas (KALAY & CANLI, 2000).

Por outro lado, existem metais não essenciais como cádmio (Cd), cromo (Cr), mercúrio (Hg), manganês (Mn), níquel (Ni) e chumbo (Pb). Esses elementos geralmente não têm uma função metabólica conhecida (CASTRO, 2002). No entanto, tanto os metais essenciais quanto os não essenciais podem ser extremamente tóxicos para os organismos aquáticos se ingeridos em altas concentrações (MOREIRA *et al.*, 1996; MANGAL, 2001; MIRANDA-FILHO *et al.*, 2011).

1.3 BIOMONITORES E BIOMARCADORES

Os bioindicadores são determinados como respostas a contaminantes ambientais a nível individual, que são avaliadas em fluidos corporais, células, tecidos ou no organismo completo. Eles revelam alterações em termos bioquímicos, celulares, fisiológicos, compartimentais ou energéticos, que podem não ser evidentes no organismo intacto, indicando a presença de substâncias contaminantes ou a relevância da resposta do organismo-alvo (LIVINGSTONE, 1993).

Os peixes se destacam como excelentes biomonitores na avaliação da toxicidade aquática, visto que estão presentes em diversos ambientes, apresentam ampla distribuição geográfica e têm grande importância econômica, já que são consumidos em muitos países e representam a principal fonte de proteína em várias regiões (SILVA, 2004). Além disso, ocupam níveis tróficos variados na cadeia alimentar como onívoros, herbívoros, piscívoros e entre outros, e são vulneráveis em acumular altos teores de substâncias por biomagnificação (MELETTI, 2003; OBAROH *et al.*, 2015). Portanto, muitas pesquisas têm utilizado esses animais para avaliar os efeitos do estresse causado por alterações no ambiente aquático (LINS *et al.*, 2010; GOMES *et al.*, 2017; BERNARDINO *et al.*, 2019; ANDRADES *et al.*, 2020; MACÊDO *et al.*, 2020; BEVITÓRIO *et al.*, 2022; VIEIRA *et al.*, 2022).

Métodos biológicos efetivos são empregados para avaliar o estado do ambiente, como o uso de biomarcadores em peixes. Essas análises podem revelar mudanças biológicas decorrentes da exposição do organismo a substâncias tóxicas presentes na água ou no ambiente circundante, abrangendo desde alterações em níveis bioquímicos e de tecidos até modificações comportamentais (AMARAL *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2016). A utilização de biomarcadores oferece diversas vantagens na avaliação da qualidade dos ecossistemas aquáticos e da população de peixes, tais como rapidez, baixo custo e facilidade na perspectiva dos resultados (PINHEIRO-SOUSA *et al.*, 2013a).

Conforme Oost *et al.* (2003), os biomarcadores podem se dividir em: biomarcadores de efeito, medindo parâmetros celulares que indicam impactos negativos nos organismos; biomarcadores de exposição, detectando e/ ou quantificando a presença do xenobiótico ou seus metabólitos no organismo; e os biomarcadores inespecíficos, que reagem a vários contaminantes e funcionam como indicadores gerais de exposição. Esse último, incluindo lesões histopatológicas e índices somáticos, são essenciais para identificar a presença e os efeitos de xenobióticos em ambientes aquáticos, sendo recomendados para o monitoramento e diagnóstico ambiental. Os biomarcadores histopatológicos são efetuados para registrar e quantificar tanto a exposição quanto nos impactos dos poluentes nas funções vitais dos organismos expostos (VEIGA *et al.*, 2002; MELETTI *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2012).

A maioria das substâncias poluentes são conhecidas por seu potencial tóxico, ou seja, têm a capacidade de causar danos aos organismos expostos (DALLINGER & RAIMBOW, 1993). Embora

alguns metais, como ferro, cobre, zinco e cobalto, desempenhem papéis essenciais em processos biológicos, eles podem se tornar prejudiciais em concentrações mais elevadas (KENNISH, 1991; HEATH, 1995). A maior parte dos metais que se acumula nos tecidos dos peixes se encontra na forma iônica, e a principal rota de entrada para esses íons é a difusão pelas brânquias. Além disso, existem outras maneiras pelas quais os peixes absorvem metais, incluindo a ingestão de alimentos e a captação de metais através da água (HEATH, 1995; MELETTI, 2003). Esses metais podem se acumular em diversos órgãos, como brânquias, fígado, intestino, rins, músculos e gônadas (OLIVEIRA, 2013).

1.4 BRÂNQUIAS

As brânquias desempenham um papel crucial, uma vez que estão frequentemente expostas a contaminantes presentes no ambiente aquático, podendo sofrer várias alterações patológicas. Isso ocorre devido ao contato contínuo com o meio e à presença de uma extensa área superficial composta pelas lamelas (POLEKSÍĆ & MITROVIĆ-TUTUNDŽIĆ, 1994). A brânquia é um órgão responsável por processos vitais nos peixes, como as trocas gasosas, osmorregulação e o equilíbrio ácido-básico (GARCIA SANTOS *et al.*, 2006). No entanto, modificações morfológicas observadas nas brânquias podem representar um biomarcador para avaliar exposição à contaminação, devido ao contato constante com os contaminantes presentes na água (WINKALER *et al.*, 2001; TKATCHEVA *et al.*, 2004).

As brânquias dos peixes teleósteos são organizadas em quatro arcos branquiais de cada lado da faringe. Cada arco branquial contém duas fileiras de estruturas chamadas lamelas primárias, com lamelas secundárias localizadas acima e abaixo delas em intervalos regulares. As lamelas secundárias são responsáveis pelas trocas de gases. Elas consistem em células pavimentosas que repousam sobre uma membrana basal e revestem células pilares. As células pilares têm projeções ou bordas que se conectam às projeções das células pilares vizinhas, criando espaços onde o sangue flui (HIBIYA, 1982; MALLATT, 1985; BARRETO, 2007). Na base dos filamentos branquiais podem ser observados diferentes tipos de células, como as células de cloreto, células mucosas, melanócitos, macrófagos e linfócitos (HIBIYA, 1982).

A Figura 1 esboça as características histológicas das brânquias dos teleósteos.

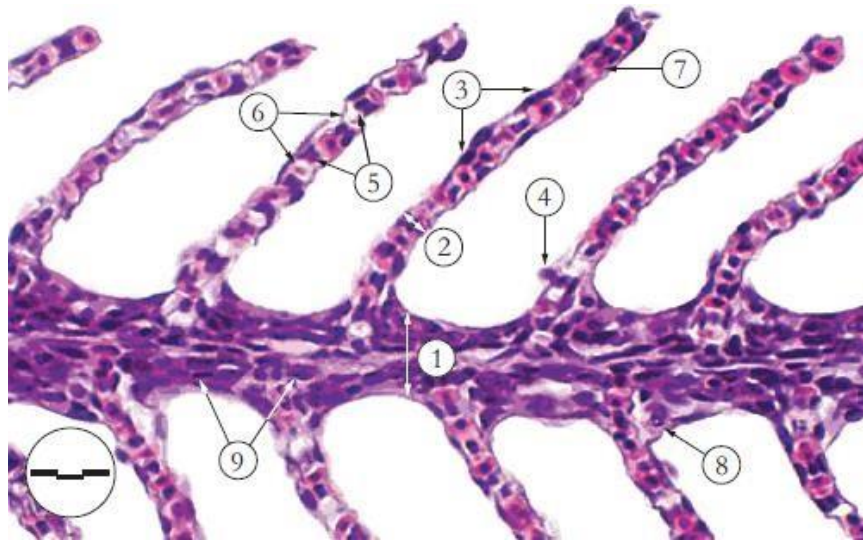


Figura 1: Filamento branquial, corte transversal, H&E (barra = 16.7 μm) 1) lamela primária; 2) lamela secundária; 3) célula epitelial; 4) célula mucosa; 5) célula pilar; 6) lúmen capilar (lacuna); 7) eritrócitos na luz do capilar; 8) célula de cloreto; 9) célula basais. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000.

O contato direto das brânquias com o ambiente aquático, torna-as um indicador altamente eficaz e apropriado para pesquisas relacionadas à contaminação ambiental (CERQUEIRA & FERNANDES, 2002; BARRETO, 2007), evidenciando várias alterações patológicas significativas. De acordo com Mallat (1985) e Bernet et al. (1999), as alterações patológicas mais comuns nas brânquias são: hiperplasia, hipertrofia das células epiteliais, ruptura do epitélio branquial, necrose, descolamento do epitélio, fusão das lamelas, formação de aneurismas nas lamelas, congestão vascular e aumento das células secretoras de muco e das células de cloreto.

1.5 FÍGADO

O fígado é um órgão envolvido na digestão, composto por células denominadas hepatócitos, que são circundadas por sinusoides. Sua superfície é revestida por uma membrana serosa e o tecido conjuntivo dessa membrana penetra no interior do fígado. Os hepatócitos são células com um único núcleo, formato poligonal e desempenham funções metabólicas essenciais. Além disso, no fígado, encontra-se uma rede vascular composta por vasos sanguíneos de grande calibre, vasos sanguíneos menores, ductos biliares, tecido pancreático e centros de melanomacrófagos (HIBIYA, 1982).

A Figura 2 representa as características microscópicas do fígado dos peixes teleósteos.

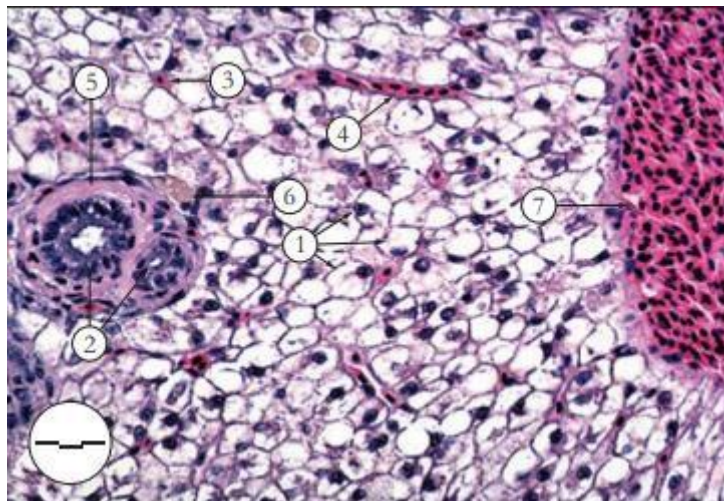


Figura 2: Micrografia de fígado de peixes teleosteos em corte transversal. H&E (barra = 22.8 μm) 1) hepatócitos; 2) ductos biliares; 3 e 4) capilares sinusoide; 5) tecido conjuntivo 6) centro de melanomacrófagos; 7) veia porta. **Fonte:** adaptado de YONKOS, 2000.

O fígado desempenha múltiplas funções fundamentais nos peixes, incluindo o metabolismo de proteínas e lipídios, a produção e secreção de bile, o armazenamento e a produção de glicose, a síntese de proteínas plasmáticas e colesterol, o metabolismo de hormônios, bem como a transformação, acumulação e eliminação de substâncias tóxicas (HEATH, 1995). É um órgão fundamental para o processo de detoxificação nos peixes, sendo o principal órgão responsável pela conversão de compostos insolúveis e pela excreção de metais (HEATH, 1995; FIGUEIREDO-FERNANDES *et al.*, 2006). Além disso, está envolvido na hematopoiese e na produção de anticorpos durante a fase larval dos peixes. Adicionalmente, atua como local de armazenamento para certos nutrientes (TAKASHIMA & HIBIYA, 1995; PARIS-PALACIOS *et al.*, 2000).

Devido ao seu papel no metabolismo de substâncias estranhas ao organismo (xenobióticos) e à sua sensibilidade aos poluentes ambientais, o fígado tem sido alvo de atenção especial em estudos toxicológicos relacionados à contaminação de diferentes espécies de peixes por agentes químicos orgânicos e inorgânicos (HINTON *et al.*, 1992; FANTA *et al.*, 2003). Portanto, o fígado se destaca como um biomarcador eficaz na avaliação da contaminação aquática (SILVA, 2004; SANTOS, 2010; SAVASSI, 2019; MACÊDO *et al.*, 2020; WEBER *et al.*, 2020; ONISHI, 2021; VIEIRA *et al.*, 2022). As principais alterações histopatológicas observadas no fígado são: vacuolização, alterações nucleares, congestão vascular, hemorragia, hipertrofia e hiperplasia dos hepatócitos, infiltração de leucócitos e necrose (BERNET *et al.*, 1999).

1.6 ESPÉCIES EM ESTUDO

A poluição ambiental é uma questão global que impacta todos os seres vivos, abrangendo diversas espécies frequentemente empregadas como indicadores de poluição do meio ambiente

(LIMA *et al.*, 2015; MENEZES, 2020). As espécies em foco neste estudo são: *Pygocentrus nattereri*, Kner 1858 conhecida como piranha-vermelha, que faz parte da família Serrasalmidae e da subfamília Serrasalminae, possui sua alimentação baseada, principalmente, em outros peixes, sendo classificada como carnívora e habita os rios da América Sul (RESENDE, 2000; BEHR & SIGNOR, 2008). Devido à sua abundante presença em rios e lagos, bem como à sua ampla distribuição e considerável massa muscular, eles se tornam uma escolha viável para consumo humano (BARROS *et al.*, 2010). Embora o nome “piranha-vermelha” proponha que a coloração de seu corpo seja avermelhada, seu dorso é predominantemente acinzentado e o ventre possui um tom laranja avermelhado (Figura 3). Os flancos apresentam cor castanho-creme com inúmeras pintas melaninas (manchas escuras) que se estendem da dorsal de sua cabeça e percorrem a mesma região do rostro, nadadeiras anteriores, inferiores e caudal (QUEIROZ & MAGURRAN, 2005).



Figura 3: *Pygocentrus nattereri* (Piranha-vermelha). **Fonte:** arquivo pessoal de Júlia Sacramento Barbosa, 2023.

Já a espécie *Metynnis maculatus* que é vulgarmente conhecida como “pacu manchado” “pacu prata” ou “pacu-cd”, membro da ordem Characiformes, família Serrasalmidae e da subfamília Serrasalminae, é encontrada na América do Sul (JÉGU, 2003). São amplamente encontrados em rios e reservatórios aquáticos brasileiros (DIA *et al.*, 2005; RAMOS *et al.*, 2008; ALVES *et al.*, 2011) e em condições normais, pode se observar que o tamanho para os peixes da espécie é de geralmente 20 cm (GOMES *et al.*, 2012). São classificados como peixes de hábitos onívoros e seus hábitos alimentares incluem tanto a ingestão de outros peixes quanto à ingestão de vegetais (GOMES *et al.*, 2000; GUERINI *et al.*, 2014). Os exemplares dessa espécie mostram um tom

prateado com manchas pretas espalhadas pelo flanco e se destacam pela região ventral vermelha na barbatana (Figura 4). O tamanho máximo que esses peixes alcançam é de 18 centímetros (BARONI *et al.*, 2008).



Figura 4: *Metynnis maculatus* (Pacu-cd). **Fonte:** arquivo pessoal de Júlia Sacramento Barbosa, 2023.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, A.; SOTO, M.; CUNHA, R.; MARIGÓMEZ, I. & RODRIGUES, A. **Bioavailability and cellular effects of metals on *Lumbricus terrestris* in habiting volcanic soils.** Environmental Pollution,142(1): 103-108, 2006.

ANDRADES, R., GUABIROBA, H.C., HORA, M.S.C., MARTINS, R.F., RODRIGUES, V.L.A., VILAR, C.C., GIARRIZZO, T., JOYEUX, J.C. **Early evidences of niche shifts in estuarine fishes following one of the world's largest mining dam disasters.** Mar. Pollut. Bull. 154, 111073, 2020.

APRILE, F. M.; LORANDI, R.; BIANCHINI JUNIOR, I.; SHIMIZU, G. Y. **Tipologia dos ecossistemas lacustres costeiros do estado do Espírito Santo, Brasil.** Bioikos, v. 15, n.1, p. 17-21, 2001.

ARAI, T.; OHJI, M.; HIRATA, T. **Trace metal deposition in teleost fish otolith as an environmental indicator.** Water, Air and Soil Pollution, v. 179, p. 255–263, 2007.

BARRETO, T. de R. **Alterações morfofuncionais e metabólicas no teleósteo de água doce**

matrinxã, Brycon cephalus (GÜNTHER, 1869) exposto ao organofosforado metil paration (Folisuper 600 BR®). Dissertação (Mestrado em Ciências Fisiológicas) – Programa de Pós graduação em Ciências Fisiológicas do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2006.

BARROSO, G.F.; MELLO, F.A. de O. (2013). **Landscape compartments and indicators of environmental pressures on fluvial and lacustrine ecosystems of the Lower Doce River Valley.** Proceedings of the 15th Brazilian Symposium of Applied Physical Geography. Vitória, UFES, 158-165p. available at <http://www.xvsbgfa2013.com.br/anais/> (In Portuguese).

BARONI, S.; LOPES, C. E. I.; LURDES, F. DE A. T. . **Cytogenetic characterization of *Metynnis maculatus* (Teleostei; Characiformes): the description in Serrasalminae of a small B chromosome bearing inactive NOR-like sequences.** Caryologia, v. 62, n. 2, p. 95-101, 2009.

BERNARDINO, A.F.; PAIS, F.S.; OLIVEIRA, L.S; GABRIEL, F.A.; FERREIRA, T.O.; QUEIROZ, H.M.; MAZZUCO, A.C.A. **Chronic trace metals effects of mine tailings on estuarine assemblages revealed by environmental DNA.** PeerJ 7:e8042, 2019.

BERNET, D.; SCHMIDT, H.; MEIER, W.; BURKHARDT-HOLM, P.; WAHLI, T. **Histopathology in fish: proposal for a protocol to asses aquatic pollution.** Journal of Fish Diseases, v. 22, n. 1, p. 25-34, 1999

BEVITÓRIO L. Z.; SILVA N. G.; PIROVANI, J. C. M.; MARQUES, J. A. VIEIRA, C. E. D.; ZEBRAL, Y. D.; DAMASCENO, E. M.; LOPES, L. L. R. SANT'ANA, L. P.; MARUBE, L.; COSTA, S. R., MARTINS, C. M. G.; SANDRINI, J. Z.; SOUZA, M. M.; BIANCHINI, A.; VALE-OLIVEIRA, M. **Impacts of tailings of Fundão dam (Brazil) rupture on marine fish: Metals bioaccumulation and physiological responses.** Marine Pollution Bulletin, 2022.

BIANCHINI, A. **Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação.** 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPSUL/ ICMBio. Brasília: FURG; 2016.

BOZELLI, R. L., et al. **"Padrões de funcionamento das lagoas do baixo Rio Doce: variáveis abióticas e clorofila a (Espírito Santo-Brasil)."** Acta Limnol. Brasil Vol. IV 13 (1992): 31.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. **Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração–uma revisão.** Holos, v. 8, p.77-85, 2016

CARNEIRO, M. A. C. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. DE S. **Estabelecimento de plantas herbáceas em solo com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbusculares.** Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1443-1452, 2001.

CASTRO, N. **Cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e níquel nos rios do Estado de São Paulo e em peixes do Rio Sorocaba**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Conservação e Manejo de recursos) - Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

CBH-Doce» a Bacia. *Cbhdoce.org.br*, 2020, disponível em: www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia. Acesso em 29 de maio de 2023.

CERQUEIRA, C. C.C.; FERNANDES, M.N. **Gill tissue recovery after copper exposure and blood parameter responses in the tropical fish *Prochilodus scrofa***. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 52, n. 2, p. 83-91, 2002.

CORRÊA, T. L. **Bioacumulação de metais pesados em plantas nativas a partir de suas disponibilidades em rochas e sedimentos: o efeito na cadeia trófica**. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DALLINGER, R.; RAIMBOW, P. S. **Ecotoxicology of metals in invertebrates**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

DIAS, C. A.; DA COSTA, A. S. V.; GUEDES, G. R.; DE MATOS UMBELINO, G. J.; DE SOUSA, L. G.; ALVES, J. H.; & SILVA, T. G. M. **Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce**. *Revista Espinhaço| UFVJM*, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2018.

DE SOUZA, B. D.; FERNANDES, V. O. **Estrutura e dinâmica da comunidade fitoplanctônica e sua relação com as variáveis ambientais na lagoa Mãe-Bá, Estado do Espírito Santo, Brasil**. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v.31, n. 3, p. 245-253, 2009.

ESPÍNDOLA, E. L. G.; PASCHOAL, C. M. R. B.; ROCHA, O.; BOHRER, M. B. C.; OLIVEIRA NETO, A. L. D. **Ecotoxicologia: perspectiva para o séc. XXI**. São Carlos: RIMA, p.147 – 164, 2000.

FANTA E, RIOS FS, ROMÃO S, VIANNA AC, FREIBERGER S. **Histopathology of the fish *Corydoras paleatus* contaminated with sublethal levels of organophosphorus in water and food**. *Ecotoxicol Environ Saf*. v. 54, N 2, p. 119-130, 2003.

FERREIRA, G. L. **Análise da composição da dieta de seis espécies de peixes coexistentes em um reservatório tropical (Reservatório de Ribeirão das Lajes, Piraí - RJ)**. Dissertação (Mestrado em Ecologia e evolução) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

FIGUEIREDO-FERNANDES, A.. FONTANHAS-FERNANDES, A.; ROCHA, E.; REIS-HENRIQUES, M. A. **Effects of gender and temperature on hepatic EROD activity, liver and gonadal histology in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* exposed to paraquat**. *Arch Environ*

Contam Toxicol. v. 51: p. 626-632, 2006.

MENEZES, M. **Estudo aponta contaminação por metais em peixes do Rio Doce**. Fiocruz, 2020. Disponível em:

<https://portal.fiocruz.br/noticia/estudo-aponta-contaminacao-por-metais-em-peixes-do-rio-doce>. Acesso em: 02 nov. 2023.

FREIRE, M. M.; SANTOS, V. G.; GINUINO, I. S. F.; & ARIAS, A. R. L. **Biomarcadores na avaliação da saúde ambiental dos ecossistemas aquáticos**. *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, n. 3, p. 2, 2008.

GARCIA-SANTOS, S.; FONTAÍNHAS-FERNANDES A.; WILSON J.M. **Cadmium tolerance in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) following acute exposure: Assessment of some ionoregulatory parameters**. *Environmental Toxicology*, v, 21, p. 33-46. 2006.

GOMES, L.E.O.; CORREA, L.B.; SÁ, F.; NETO R.R.; BERNARDINO, A.F. **The impacts of the Samarco minetailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil**. *Mar Pollut. Bull.* v. 120, n. 1-2, p. 28-36, 2017.

GOMES, L.C.; GOMES, A.R.C.; MIRANDA, T.O.; PEREIRA, T.M.; MERÇON, J.; DAVEL, V.C; BARBOSA, B. V.; PEREIRA, A. C. H.; FROSSARD, A.; RAMOS, J.P.L. **Genotoxicity effects on *Geophagus brasiliensis* fish exposed to Doce River water after the environmental disaster in the city of Mariana, MG, Brazil**. *Brazilian Journal of Biology*, v. 79, p. 659-664, 2019.

GONÇALVES, M. A.. **Ecohidrologia e gestão integrada de recursos hídricos em uma bacia lacustre costeira (Lago Nova, Linhares, ES)**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Oceanografia Ambiental)-Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.

HATJE, V.; PEDREIRA, R.M.; REZENDE, C.E.;SCHETTINI, C.A.F.; SOUZA, G.C.; MARIN, D.C.; HACKSPACHER, P.C. **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide**. *Sci. Rep.*, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017.

HATUSHIKA, R. S.; MELLO, C. L.; SILVA, C. G. **Evidências de atuação neotectônica na formação do lago Juparanã-Linhares (ES)**. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, V. 10, 2005.

HATUSHIKA, R. S; SILVA, C. G.; MELLO, C. L. **Sismoestratigrafia de alta resolução no lago Juparanã, Linhares (ES-Brasil) como base para estudos sobre a sedimentação e tectônica quaternária**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, p. 433-442, 2007.

HEATH, A. G. **Water pollution and fish physiology**. 2nd ed. Florida: Lewis Publishers, 1995

HIBIYA, T. **An atlas of fish histology, normal and pathological features.** New York: Gustav Fischer Verlag, 1982.

HINTON, D. E.; BAUMANN, P. C.; GARDNER, G. R.; HAWKINS, W. E.; HENDRICKS, J. D.; MURCHELANO, R. A.; OKIHIRO, M. S. **Histopathologic Biomarkers.** In: Biomarkers. CRC Press, p. 155-210, 2018.

HYNE, R.V.; MAHER, W.A. **Macroinvertebrate Biomarkers: Links to Toxicosis and Changes in Population or Communities.** Cooperative Centre for Freshwater Ecology, 2001.

IKEM, A.; EGIEBOR, N. O.; NYAVOR, K. **Trace elements in water, fish and sediment from Tuskegee Lake, Southeastern USA.** Water, Air and Soil Pollution, v. 149, p. 51–75, 2003.

JÉGU, M. **Subfamily Serrasalminae.** 2003 In: Reis, RE, Kullander, SO, Ferraris, C.J. (Eds). Check list of the freshwater fishes of south and Central America. (CLOFFSCA). EDIPUCRS, Porto Alegre. p. 182-196.

KALAY, M.; CANLI, M. **Elimination of Essential (Cu, Zn) and Non-Essential (Cd, Pb) Metals from Tissues of a Freshwater Fish *Tilapia zilli*.** Turkish Journal of Zoology, v. 24, p. 429-436, 2000.

KENNISH, M. J. **Ecology of estuaries: anthropogenic effects.** Boca Raton: CRC Press, 1991.

LIMA, D.P.; SANTOS, C.; SILVA, R.D.S.; YOSHIOKA, E.T.O.; BEZERRA, R. M. **Contaminação por metais pesados em peixes e água da bacia do rio Cassiporé, Estado do Amapá, Brasil.** Acta Amazonica, v. 45, p. 405-414, 2015.

LIVINGSTONE, D. R. **Biotechnology and pollution monitoring: use of molecular biomarkers in the aquatic environment.** Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v. 57, n. 3, p. 195-211, 1993.

LINS, J. A. P. N.; KIRSCHNIK, P. G.; DA SILVA QUEIROZ, V.; & CIRIO, S. M. **Uso de peixes como biomarcadores para monitoramento ambiental aquático.** Revista Acadêmica Ciência Animal, v. 8, n. 4, p. 469-484, 2010.

MACÊDO, A.K.S.; DOS SANTOS, K.P.E.; BRIGHENTI, L.S.; WINDMOLLER, C.C.; BARBOSA, F.A.R.; DE AZAMBUJA RIBEIRO, R.I.M.; DOS SANTOS, H.B.; THOMÉ, R.G. **Histological and molecular changes in gill and liver of fish (*Astyanax lacustris* Lütken, 1875) exposed to water from the Doce basin after the rupture of a mining tailings dam in Mariana, MG.** Science of the Total Environment v. 735, p. 139505, 2020.

MANGAL, M. J. **Assessing mercury contamination in the Amazon Basin.** 2001. 26p. Disponível em: <www.mangal.dk/mercury.pdf>. Acesso em: 2 de nov. 2023.

MALLATT, J. **Fish gill structural changes induced by toxicants and other irritants: a**

statistical review. Can. Journal Aquatic. Sci., v. 42, p. 630-648, 1985.

MELETTI, P. C. **Avaliação da degradação ambiental por meio de testes de toxicidade com sedimento e de análises histopatológicas em peixes.** Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MIRANDA FILHO, A. L.; MOTA, A. K. M.; CRUZ, C. C.; MATIAS, C. A. R.; FERREIRA, A. P. **Cromo hexavalente em peixes oriundos da Baía de Sepetiba no Rio de Janeiro, Brasil: uma avaliação de risco à saúde humana.** Revista Ambiente & Água, v. 6, n. 3, P. 200-209, 2011.

MOISEENKO, T. I.; KUDRYAVTSEA, L. P. **Trace metal accumulation and fish pathologies in areas affected by mining and metallurgical enterprises in the Kola region, Russia.** Environmental Pollution, v. 114, n. 2, p. 285-297, 2011.

MORAES, D. S. L.; JORDÃO, B. Q. **Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana.** Revista Saúde Pública, v. 36, n. 3, p. 370-374, 2002.

MOREIRA, J. C. **Threats by heavy metals: human and environmental contamination in Brazil.** The Science of the Total Environment, v. 188, p. S61-S71, 1996.

MELLO, C. L.; SANTOS, F. F. V.; HATUSHIKA, R. S.; SILVA, C. G.; OLIVEIRA, P. E. de. **Considerações a respeito da idade do sistema de lagos do baixo curso do rio Doce (Linhares, ES).** In: Anais do Congresso da ABEQUA. 2011.

OBAROH, I. O.; ABUBAKAR, U.; HARUNA, M. A.; ELINGE, M. C. **Evaluation of some Heavy Metals Concentration in River Argungu.** Journal of Fisheries and Aquatic Science, v.10, p.581- 586. 2015.

OLIVEIRA, H. H. P. D. **Comparação dos efeitos da mistura de poluentes orgânicos (BAP, DDT e TBT) no metabolismo hepático e na toxicidade em teleósteos de água doce. Tese (Doutorado em Biologia Celular e Molecular).** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, S. R. S.; PINHEIRO SOUZA, D. B.; ALMEIDA, Z. S.; CASTRO, J. S.; CARVALHO-NETA, R. N. F. **Lesões histopatológicas como biomarcadores de contaminação aquática em *Oreochromis niloticus* (Osteichthyes, Cichlidae) de uma área protegida no Maranhão.** Revista Brasileira de Engenharia de Pesca, v. 9, n. 1, p. 12-26, 2016.

ONISHI, K. **Avaliação da hepatotoxicidade dos poluentes do rio doce através das análises histopatológicas no fígado dos peixes.** 2021. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Vicente, São Paulo, 2022.

PARIS-PALÁCIOS, S.; BIAGIANTI-RISBOURG, S.; VERNET, G. **Biochemical and (ultra)structural hepatic perturbations of *Brachydanio rerio* (Teleostei, Cyprinidae) exposed**

to two sublethal concentrations of cooper sulfate. *Aquatic Toxicology*. v.50, p.109-124, 2000.

PAULA, M. D. **Inimigo invisível: metais pesados e a saúde humana.** *Período Tchê-Química*, v. 3, n. 6, p. 37-44, 2006.

PASSOS, F. L.; COELHO, P.; DIAS, A. **(Des) territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG.** *Cadernos Metr pole*, v. 19, p. 269-297, 2017.

PINHEIRO-SOUSA, D. B.; ALMEIDA, Z. S.; CARVALHO-NETA, R. N. F. **Biomarcadores histológicos em duas espécies de bagres estuarinos da Costa Maranhense, Brasil.** *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 65, n. 2, p. 369-376, 2013a.

PINTO-COELHO, R. M. **Mitiga o do impacto ambiental do desastre de Mariana, MG (Samarco) no Distrito Lacustre do baixo rio Doce, Linhares (ES).** 2016. TÉCNICO-CIENTÍFICO. RMPC Meio ambiente sustentável. <http://rmpceciologia.com/>

POLEKSIC, V.; MITROVIC-TUTUNDZIC, V. **Fish gills as a monitor of sublethal and chronic effects of pollution.** *Sublethal and chronic effects of pollutants on freshwater fish*, p. 339-352, 1994.

PYLE, G.G.; RAJOTTE, J.W.; COUTURE, P. **Effects of industrial metals on wild fish populations along a metal contamination gradient.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 61, p. 287-312, 2005.

QUEIROZ, H.M.; N BREGA, G.N.; FERREIRA, T. O.; ALMEIDA, L.S.; ROMERO, T.B.; SANTAELLA, S.T.; BERNARDINO, A. F.;  TERO, X. L. **The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination?.** *Science of the Total Environment*, v. 637, p. 498–506, 2018.

RAND, G. M.; PETROCELLI, S. R. **Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications.** Hemisphere Publishing Corp., Washington, USA. 1985.

REIS, M.P.; SUHADOLNIK, M.L.S.; DIAS, M.F.;  VILA, M.P.; MOTTA, A.M.; BARBOSA, F.A.R.; NASCIMENTO, A.M.A. **Characterizing a riverine microbiome impacted by extreme disturbance caused by a mining sludge tsunami.** *Chemosphere*, v. 253, p. 126584, 2020.

RIBEIRO, C. A. O.; REIS FILHO, H. S.; GROTZNER, S. R. **Técnicas e Métodos para Utiliza o Prática de Microscopia.** São Paulo: GEN - Grupo Editorial Nacional, Editora Santos, v.1, p. 440, 2012.

RODRIGUES, M. L. K. **Origem, distribui o e mobilidade potencial de metais em ambiente fluvial impactado por curtumes.** 2007. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2007.

SANTOS, D. M. S. **Qualidade da água e histopatologia de órgãos de peixes provenientes de criatórios do município de Itapecuru Mirim, Maranhão.** 2010. Tese (Doutorado em Medicina Veterinária- Patologia Animal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Jaboticabal, São Paulo. 2010.

SAVASSI, L. A. **Efeitos da contaminação por metais pesados e biomarcadores de impacto ambiental em peixes da bacia do Rio São Francisco, Mg.** 2019. Tese (Doutorado em Pós-graduação em Biologia Celular do Departamento de Morfologia) -Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.

SILVA, A. G. **Alterações histopatológicas de peixes como biomarcadores da contaminação aquática.** Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas – Área de Concentração Zoologia). Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2004.

SILVA, A. P. M. D.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: Relatório de Pesquisa IPEA.** Brasília: IPEA; 2012.

SEYLER, P. T.; BOAVENTURA, G. R. **Distribution and partition of trace metals in the Amazon basin.** Hydrological Processes, v. 17, p. 1345–1361, 2003.

TAKASHIMA, F.; HIBIYA T. **An atlas of fish histology – Normal and Pathological Features.** Kodansha Ltd., Tóquio. p. 195. 1995.

TKATCHEVA, V.; HYVÄRINEN, H.; KUKKONEN, J.; RYZHKOV, L. P.; & HOLOPAINEN, I. J. **Toxic effects of mining effluents on fish gills in a subarctic lake system in NW Russia.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 57, n. 3, p. 278- 20 289. 2004.

VAN DAM, J. W., NEGRI, A. P., UTHICKE, S., MUELLER, J. F. **Chemical pollution on coral reefs:exposure and ecological effects.** Ecological Impacts of Toxic Chemicals, v. 9, p. 187-211, 2011.

VAN DER OOST, R.; BEYER, J.; VERMEULEN, N.P.E. **Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review.** Environmental Toxicology and Pharmacology. v. 13, p. 57-149. 2003.

VEIGA, M. L. D.; RODRIGUES, E. D. L.; PACHECO, F. J.; & RANZANIPAIVA, M. J. T. **Histopathologic changes in the kidney tissue of Prochilodus lineatus Valenciennes, 1836 (Characiformes, Prochilodontidae) induced by sublethal concentration of trichlorfon exposure.** Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 45, n. 2, p. 171-175, 2002.

VIEIRA, C. E. D.; MARQUES, J. A.; DA SILVA, N. G.; BEVITÓRIO, L. Z.; ZEBRAL, Y. D.; MARASCHI, A. C.; COSTA, S. R.; COSTA, P. G.; DAMASCENO, E. M.; PIROVANI, J. C.

M.; DO VALE-OLIVEIRA, M.; SOUZA, M. M.; DE MARTINEZ GASPAR MARTINS, C.; BIANCHINI, A.; SANDRINI, J. Z. **Ecotoxicological impacts of the Fundão dam failure in freshwater fish community; Metal bioaccumulation, biochemical, genetic and histopathological effects.** Science of the total environment, v. 832, p. 154878. 2022.

VIEIRA, C. E. D.; COSTA, P. G.; CALDAS, S. S.; TESSER, M. E.; RISSO, W. E.; ESCARRONE, A. L. V.; & DOS REIS MARTINEZ, C. B. **An integrated approach in subtropical agro-ecosystems: Active biomonitoring, environmental contaminants, bioaccumulation, and multiple biomarkers in fish.** Science of the Total Environment, v. 666, p. 508-524, 2019.

WEBER, A. A.; SALES, CF.; DE SOUZA FARIA, F.; MELO, RMC; BAZZOLIB, N.; RIZZO, E. **Efeitos da contaminação do metal no fígado em duas espécies de peixes de um rio neotropical altamente impactado: um estudo de caso da barragem de Fundão Brasil.** Ecotoxicol. Ambiente. Saf, v. 190, p. 110165. 2020.

WINKALER, E. U., SILVA, A. das G., GALINDO, H. C., & MARTINEZ, C. B. dos R. **Biomarcadores histológicos e fisiológicos para o monitoramento da saúde de peixes de ribeirões de Londrina, Estado do Paraná.** Acta Scientiarum. Biological Sciences, v. 23, p. 507-514. 2001

YONKOS, L. T.; FISHER, D. J.; REIMSCHUESSEL, R.; & KANE, A. S. **Atlas of fathead minnow normal histology.** 2000. Disponível em: <http://aquaticpath.umd/> . Acesso em: 23 outubro. 2023.

3. OBJETIVOS

3.1 GERAL:

Avaliar a morfologia do tecido hepático e branquial de peixes das espécies *Metynnis maculatus* e *Pygocentrus nattereri*, coletados no lago Nova e lago do Limão (Linhares, ES), após o rompimento da barragem de Fundão, em três estações chuvosas consecutivas.

3.2 ESPECÍFICOS:

- Identificar lesões nas brânquias e fígado das espécies de *Metynnis maculatus* e *Pygocentrus nattereri* coletadas nos lagos Nova e do Limão.
- Calcular os índices de lesão das brânquias e do fígado, bem como o índice de lesão dos animais.
- Comparar os índices de lesão dos animais coletados durante as estações chuvosas de 2021 a 2023 (avaliação temporal).
- Comparar os índices de lesão dos animais coletados em dois lagos da bacia do rio Doce (avaliação espacial)
- Comparar os índices de lesão das duas espécies, uma vez que ocupam níveis tróficos diferentes.

4. RESULTADOS:

Os resultados serão apresentados no manuscrito intitulado como “**Histopatologia de fígado e brânquias de *Metynnis maculatus* (Kner, 1858) e *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858: Characiformes: Serrasalminidae coletados em lagos de Linhares/ES após o rompimento da barragem de Fundão.**”

Histopatologia de fígado e brânquias de *Metynnis maculatus* (Kner, 1858) e *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858: Characiformes: Serrasalminidae coletados em lagos de Linhares/ES após o rompimento da barragem de Fundão

Ana Paula Millani Gutierrez¹, Lorena Ziviani Bevitório²,
Juliana Castro Monteiro Pirovani¹

¹ Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Universidade Federal do Espírito Santo-CEUNES/UFES. Rod. Governador Mário Covas, Km 60, Litorâneo, São Mateus, ES, 29932-540.

² Fundação Espírito-santense de Tecnologia, Vitória FEST. Av. Fernando Ferrari, 845, Goiabeiras, Vitória-ES, 29075-090.

RESUMO

Após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, toda a extensão da bacia do rio Doce foi contaminada por metais, incluindo ferro, cromo, manganês e mercúrio. Essa contaminação desencadeou um desequilíbrio ecológico nos ecossistemas aquáticos, afetando as comunidades de peixes e suas interações ecológicas. Os peixes desempenham um papel fundamental nos estudos de avaliação dos impactos na vida aquática, uma vez que ocupam níveis tróficos mais elevados na cadeia alimentar e, conseqüentemente, acumulam substâncias tóxicas, principalmente em seus órgãos como brânquias e fígado, devido ao processo de biomagnificação. A histopatologia se revela como uma ferramenta indispensável para a identificação das lesões nos órgãos causadas pela exposição aos contaminantes. Neste estudo, foi examinada a estrutura dos tecidos hepáticos e brânquias de peixes das espécies *Metynnis maculatus* (pacu) e *Pygocentrus nattereri* (piranha-vermelha), coletados ao longo de três estações chuvosas consecutivas (janeiro de 2021 e 2023 e março de 2022) nos lagos Nova e do Limão, localizadas em Linhares, Espírito Santo, após o desastre da barragem de Fundão. As alterações histopatológicas observadas nas brânquias incluíram descamação epitelial, hipertrofia, hiperplasia e necrose. No fígado, foram identificadas congestão de vasos sanguíneos, alterações citoplasmáticas e nucleares nos hepatócitos e necrose. Na análise temporal, não houve diferenças significativas nos índices de lesão das brânquias entre os diferentes períodos de coleta no lago do Limão para nenhuma das espécies. Em relação ao índices de lesão do fígado, apresentaram variação significativa para as ambas espécies ao longo dos diferentes períodos de coleta. No lago Nova, em 2023, no índice de lesão das brânquias de *P. nattereri* foi observado variação significativa comparado a 2022. Já para os *M. maculatus*, não foram encontradas diferenças significativas nos índices de lesão das brânquias entre os diferentes períodos de coleta. Na análise espacial, no índice de lesão das brânquias para *P. Nattereri*, não houve diferenças significativas entre os lagos amostrados. Já para *M. maculatus* não mostraram diferenças significativas entre os lagos em 2021 e 2023, mas houve variação significativa em 2022. Em relação ao índice de lesão do fígado para *M. maculatus*, não mostrou diferenças significativas entre os lagos em 2021 e 2022. Para a espécie *P. Nattereri*, não foram encontradas diferenças significativas entre os locais de coleta. Ao considerar nível trófico, no lago Nova em 2021, houve diferenças significativas no índice de lesão do animal entre as espécies, mas não em 2022 e 2023. No lago do Limão, não foram encontradas diferenças

significativas nos índices de lesão do animal entre as duas espécies, nem para cada índice de lesão do órgão. Porém no lago Nova, em 2022 houve variação significativa no índice de lesão do fígado entre as espécies. As lesões encontradas nas brânquias e no fígado das espécies avaliadas neste estudo indicam alterações ambientais nos dois lagos - do Limão e Nova - após o rompimento da barragem de Fundão. As lesões encontradas nas brânquias e no fígado das espécies avaliadas neste estudo indicam alterações ambientais nos dois lagos - do Limão e Nova - após o rompimento da barragem de Fundão. Portanto, destaca-se a relevância da histopatologia como biomarcador na avaliação dos contaminantes aquáticos.

Palavras-Chave: biomarcadores, carnívoros, rio Doce, morfologia, onívoros, peixes.

INTRODUÇÃO

A bacia do rio Doce possui grande importância ambiental, abrangendo uma área total de 86.715 km². A maior parte dessa bacia, cerca de 86%, está localizada na região leste de Minas Gerais, enquanto os outros 14% estão no nordeste do Espírito Santo. A bacia hidrográfica abriga uma rica biodiversidade com 98% de sua área inserida no bioma da Mata Atlântica, considerada globalmente um dos biomas mais importantes e ameaçados (CBH-DOCE, 2021).

O rompimento da barragem de Fundão, pertencente à Samarco Mineração S/A, localizada no Distrito de Bento Rodrigues (Mariana-MG), ocorrido em novembro de 2015, foi considerado a maior tragédia ambiental do Brasil. Estima-se que 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério foram despejados no rio Doce até o oceano atlântico. Assim, a contaminação resultante do vazamento de rejeitos de mineração, contendo diversos metais pesados como ferro (Fe), alumínio (Al), cromo (Cr), cádmio (Cd) cobre (Cu), manganês (Mn), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e zinco (Zn), afetou comunidades ribeirinhas e a costa atlântica (DIAS *et al.*, 2018).

Conforme a lama de rejeitos avançava pelos córregos e rios, transportava consigo materiais erodidos, como solos, sedimentos fluviais, vegetação e outros componentes. O desastre resultante do colapso da barragem gerou uma série de consequências ambientais imediatas, como a devastadora perda de biodiversidade aquática, a interrupção do fornecimento de água e danos ambientais extensivos ao longo da costa, da plataforma continental adjacente e soterramento de lagoas, lagos e nascentes adjacentes ao leito dos rios afetados (IBAMA, 2015; AGUIAR *et al.*, 2023). Estudos recentes mostram que os lagos e lagoas impactadas pelos rejeitos, provenientes do rompimento da barragem de Fundão, foram: lagoa Monsarás, lago Nova e lago Areal. Já os lagos Palmas e do Limão não receberam contaminantes provenientes da barragem de Fundão (MILLER *et al.*, 2023; VIEIRA *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm mostrados que após o rompimento da barragem de Fundão, os metais despejados no rio Doce e nas lagoas e lagos provocaram impactos nos ecossistemas aquáticos e em grupos de peixes (GOMES *et al.*, 2017; BERNARDINO *et al.*, 2019; ANDRADES *et al.*, 2020; BEVITÓRIO *et al.*, 2022; VIEIRA *et al.*, 2022).

Esses impactos nos organismos aquáticos têm sido avaliados através de ferramentas como a histopatologia, frequentemente utilizada como biomarcador para investigar os efeitos da exposição a xenobióticos (substâncias estranhas ao organismo) em peixes (MYERS *et al.*, 1998; ZENI, 2016). A análise histopatológica dos tecidos desses organismos fornece informações valiosas sobre os efeitos dos contaminantes. Os peixes, considerados excelentes biomonitores para avaliação da toxicidade, são encontrados em diversos ambientes e possuem ampla distribuição geográfica, o que os torna representativos de diferentes condições ambientais. Além disso, como ocupam níveis tróficos mais altos na cadeia alimentar, os peixes têm maior probabilidade de acumular altos teores de substâncias tóxicas por meio da biomagnificação (MELETTI, 2003; OBAROH *et al.*, 2015).

As duas espécies alvo deste trabalho são: *Metynnis maculatus* (Kner, 1858) e *Pygocentrus nattereri* (Kner, 1858). *M. maculatus* é uma espécie popularmente conhecida como “pacu-cd”, são peixes nativos da América do Sul (JÉGU, 2003). Além disso, são amplamente encontrados em rios e reservatórios aquáticos brasileiros (DIA *et al.*, 2005; RAMOS *et al.*, 2008; ALVES *et al.*, 2011). São classificados como peixes de hábitos onívoros e seus hábitos alimentares incluem tanto a ingestão de outros peixes quanto à ingestão de vegetais (GOMES *et al.*, 2000; GUERINI *et al.*, 2014). *P. nattereri*, por sua vez, é a espécie conhecida popularmente como “piranha-vermelha”, são peixes de hábitos carnívoros, distribuídos nos rios da América Central e do Sul. Possuem mandíbulas fortes e dentes afiados e podem alcançar 50 cm de comprimento total. Sua presença em rios e lagos é abundante e possuem estrutura muscular substancial, tornando-se uma opção viável para o consumo humano (BARROS *et al.*, 2010).

Considerando as características biológicas e comportamentais das espécies *Metynnis maculatus* e *Pygocentrus nattereri*, é fundamental entender o impacto dos desastres ambientais, como o rompimento da barragem de Fundão, na saúde desses peixes. Vale ressaltar que estudos realizados há mais de três anos após o rompimento da barragem de Fundão, constataram alterações na morfologia de órgãos de peixes que podem ter sido causadas pelos metais presentes na água (WEBER *et al.*, 2020; MACÊDO *et al.*, 2020). Esses estudos reforçam a importância da histopatologia como uma ferramenta para avaliar os efeitos tóxicos dos metais pesados nos peixes afetados pelo desastre. Eles destacam que, mesmo após vários anos, os efeitos persistem, enfatizando a necessidade contínua de monitoramento.

Neste estudo, foram avaliados os danos morfológicos nas brânquias e fígado de duas espécies

alvos, coletadas nos lagos Nova e do Limão, localizadas no município de Linhares/ES, após o rompimento da barragem de Fundão. Foi realizada uma avaliação temporal para compreender as alterações durante três estações chuvosas consecutivas e uma avaliação espacial para comparar as alterações morfológicas dos animais coletados em um lago diretamente impactado pelos rejeitos (lago Nova) e um lago não impactado (lago do Limão).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

Os espécimes analisados neste estudo foram coletados no ambiente de água doce, no lago Nova (19°24'27.20 "S 40° 9' 24.17 "W) e lago do Limão (19°33'33.64"S 40°22'43.07"W), localizadas no município de Linhares, no Norte do estado do Espírito Santo (Figura 5).

O complexo lacustre na região do baixo rio Doce abriga dois lagos fundamentais: o Nova e o Limão. O lago Nova é o segundo maior ecossistema lacustre da região. A área circundante do lago, aproximadamente 100 m, é caracterizada pelo uso diversificado da terra, incluindo áreas de cultivo, áreas florestais e propriedades de veraneio (BARROSO & MELLO, 2013). Além disso, o lago Nova desempenha múltiplos papéis na região servindo para atividades de lazer, pesca e irrigação de culturas (GONÇALVES, 2015). O lago do Limão é um ambiente lântico, que se caracteriza pela presença abundante de algas e macrófitas, porém com pouca vegetação ciliar. Sua área circundante evidencia atividades humanas como construções, pastagens e plantações. O substrato do lago é predominantemente arenoso e profundidade média de 12 m. Com uma largura variando entre 500 m e 2 km, é perceptível a presença de resíduos sólidos na margem do lago, afetando sua aparência, que tende a ser de água clara com tonalidade esverdeada (BARROS, L. COMUNICAÇÃO PESSOAL).

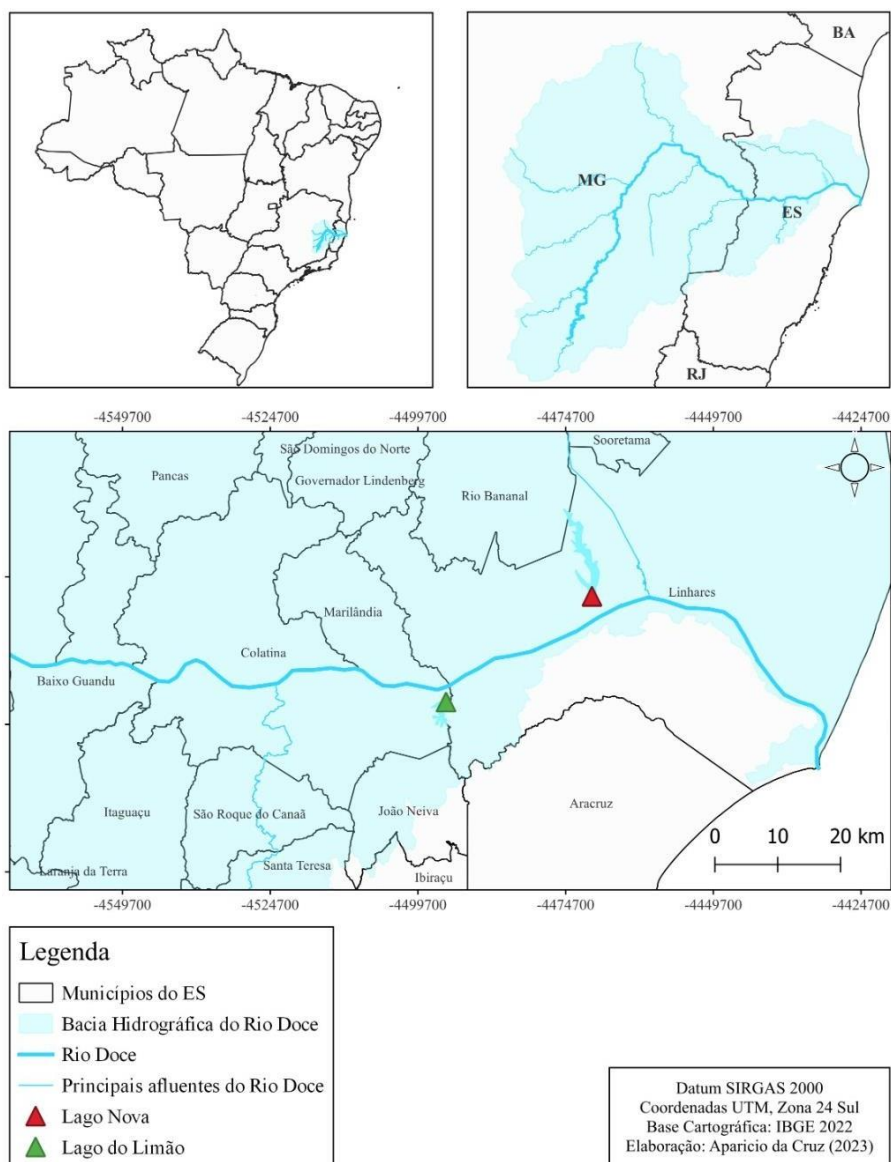


Figura 5: Mapa dos lago Nova e do Limão, Linhares, norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. **Fonte:** Aparício da Cruz, 2023.

OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS E PROCESSAMENTO

Coleta do Material Biológico

O material utilizado no presente estudo foi coletado pela equipe da ecotoxicologia do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA), estabelecido pela cooperação técnica firmada entre a FEST e a Fundação Renova. As coletas foram realizadas sob licença SISBIO - nº 64261-2. Após a coleta, as amostras foram analisadas no Laboratório de Biologia Estrutural do Centro Universitário Norte do Espírito Santo (LABEST CEUNES/UFES).

As coletas foram realizadas em três estações chuvosas consecutivas, nos meses de janeiro de 2021, março de 2022 e janeiro de 2023 e. Os peixes foram coletados utilizando redes de espera

e tarrafas. Em campo, 35 exemplares de *Metynnis maculatus* e 41 de *Pygocentrus nattereri* foram identificados, anestesiados com benzocaína (1% em água). Em seguida, foram dissecados, os órgãos de interesse (fígado e brânquias) foram retirados e imersos em solução fixadora Bouin por 8 horas e mantidas em etanol 70% até o processamento.

Processamento e preparo das amostras para microscopia de luz:

Posteriormente, os fragmentos dos tecidos foram desidratados em concentrações crescentes de etanol, diafanizados em xilol e incluídos em Paraplast (Leica). O material foi seccionado em micrótomo rotativo, na espessura de 5 micrômetros. Os cortes obtidos foram corados com hematoxilina/eosina.

Análises Histopatológicas:

As análises histopatológicas foram realizadas de acordo com o protocolo estabelecido por Bernet e colaboradores (1999). Esse método baseia-se na relevância patológica e no grau de extensão das lesões observadas nos órgãos analisados. Este valor foi atribuído pelo avaliador e pode variar de 0 a 6, onde (0) o tecido permanece inalterado; (1-2) leve; (3-4) moderada; (5-6) severa. As alterações são classificadas em cinco padrões de reação (distúrbios circulatórios, alterações regressivas, alterações progressivas, inflamação e tumores) e cada lesão possui um grau de importância, sendo: 1: baixo, o que significa que a lesão pode ser reversível ao final da exposição; 2: médio, com a neutralização do meio a lesão pode ser reversível; 3: alto, lesão grave e irreversível, que pode ocasionar a perda parcial ou total do órgão.

Assim, o grau do dano apresentado pelos órgãos (Índice de Lesão Órgão - Iorg) foi estimado pela fórmula 1, onde: rp: padrão de reação, alt: alteração, a: extensão da lesão, w: fator de importância. Já a gravidade das alterações (Índice de Reação - Irp) foi obtida pelo somatório do produto da multiplicação do tamanho da lesão pela relevância patológica (fórmula 2), onde: rp: padrão de reação, alt: alteração, a: extensão da lesão, w: fator de importância.

$$\mathbf{Iorg = \sum rp \sum alt (a \times w)} \quad (1)$$

$$\mathbf{Irp = \sum alt (a \times w)} \quad (2)$$

onde: rp: padrão de reação, alt: alteração, a: extensão da lesão, w: fator de importância.

A soma dos índices de lesão das brânquias e fígado obteve-se o índice de lesão do animal. A partir das respostas dos índices foi possível comparar os danos histopatológicos entre as diferentes espécies e períodos de coleta.

Análises Estatísticas

Os índices de lesão dos órgãos e dos animais foram comparados entre as espécies e período de coletas e entre os lagos. A normalidade dos dados foi avaliada através do teste de Shapiro-Wilk. Para os dados paramétricos foram realizados test t ou ANOVA, seguido do teste de Tukey; e para dados não paramétricos foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis seguido de Mann Whitney, utilizando os softwares BioEstat 5.3 e Past. O nível de significância adotado foi de $p < 0,05$.

RESULTADOS

A) Variação temporal

Os índices de lesão das brânquias das duas espécies analisadas, Pacu e Piranha, não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) quando comparados entre os diferentes períodos de coleta realizados no lago do Limão (figura 6).

O índice de lesão das brânquias de *Pygocentrus nattereri*, coletadas em 2023, no lago Nova, foi significativamente maior que o índice observado para os espécimes coletados em 2022 ($p < 0,05$). Já os índices de lesão das brânquias de *Metynnis maculatus*, coletadas no lago Nova, não foram significativos entre os períodos de coleta ($p > 0,05$) (figura 6).

O maior índice de lesão no fígado da espécie *P. nattereri* ($p < 0,05$), coletada no lago do Limão, foi observado em 2022. Já no caso da espécie *M. maculatus*, em 2023, observou-se o menor valor para o IL Fígado ($p < 0,05$), em relação aos demais períodos de coleta (2021 e 2022) no mesmo lago (figura 6). E, por fim, no lago Nova, os índices de lesão do fígado não apresentaram diferenças significativas durante os períodos de coleta, entre as duas espécies analisadas, *M. maculatus* e a *P. nattereri* (figura 6).

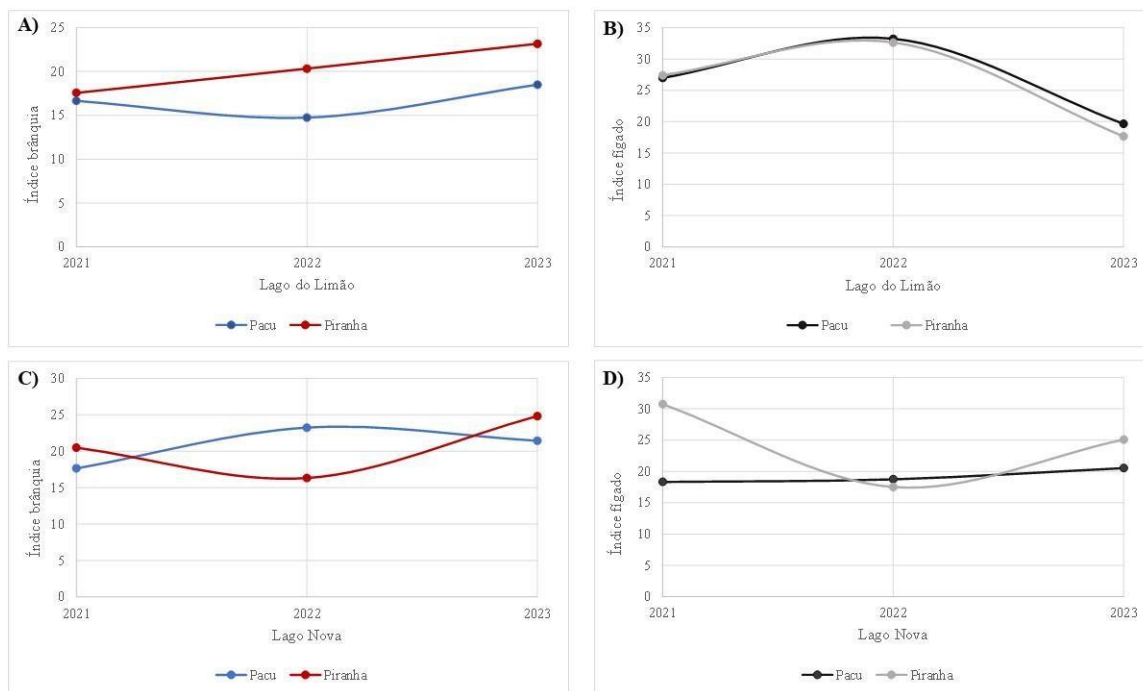


Figura 6: Índice de lesão das brânquias e fígado de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova no período chuvoso de 2021 a 2023.

B) Variação espacial

Os exemplares de *Metynnis maculatus* coletados nos lagos Nova e do Limão, em 2021, não apresentaram variações significativas nos índices de lesões das brânquias. O mesmo padrão foi observado para *M. maculatus* em 2023, em ambos os lagos. Porém, em 2022, os exemplares de *M. maculatus* coletados no lago Nova foi observado um maior índice de lesão das brânquias ($p < 0,05$) em relação àqueles do lago do Limão. Por outro lado, os índices de lesão nas brânquias não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) ao comparar as espécies de *Pygocentrus nattereri* coletadas nos dois lagos, como representado na figura 7.

Quanto ao índices de lesão do fígado, os exemplares de *Metynnis maculatus* coletados no lago Nova, em 2021 e 2022, apresentaram menores índices ($p < 0,05$) comparados aos espécimes coletados no lago do Limão. Não foram identificadas variações significativas nos índices de lesão hepática da espécie *P. nattereri*, ao comparar o mesmo período nos dois diferentes locais de coleta, como mostrado na (Figura 7).

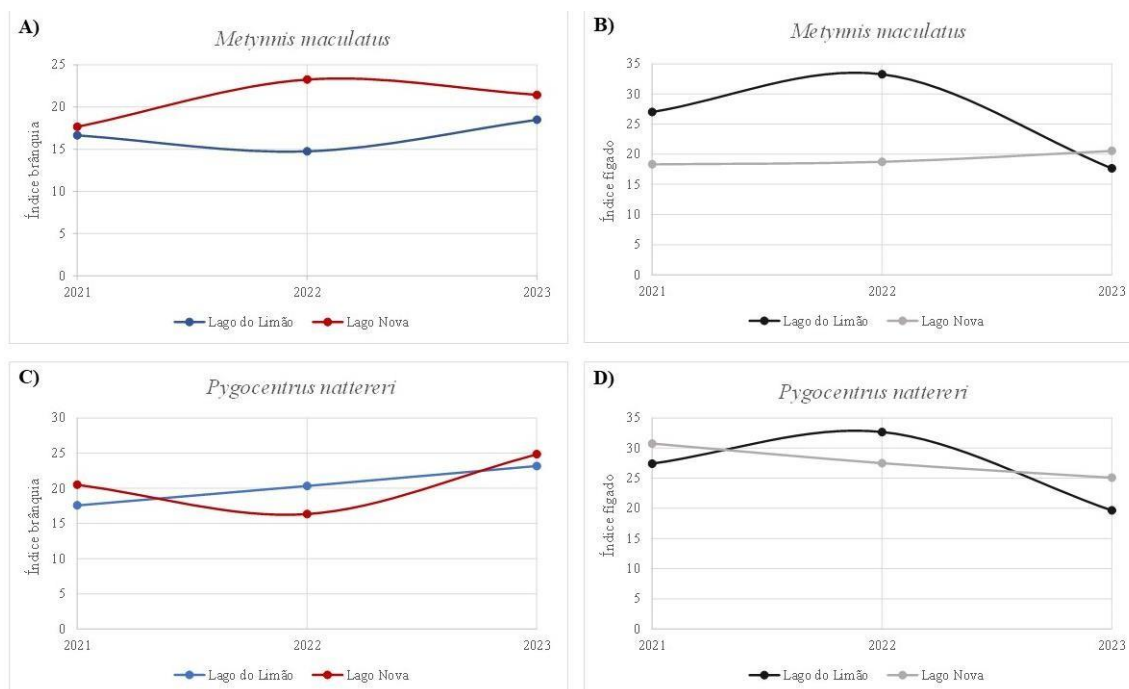


Figura 7: Índice dos padrões de lesão das brânquias e fígado de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova nos períodos chuvosos de 2021 a 2023.

C) Nível Trófico

Em relação ao índice de lesão do animal, os espécimes de *Pygocentrus nattereri*, do lago Nova, apresentaram variação significativa ($p < 0,05$) em comparação aos exemplares de *Metynnis maculatus*, no período de coleta de 2021. Nos outros períodos (2022 e 2023) não houve diferença entre as duas espécies. Não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) ao comparar as duas espécies coletadas no lago do Limão no período de 2021 a 2023. Os resultados mencionados foram apresentados na figura 8.

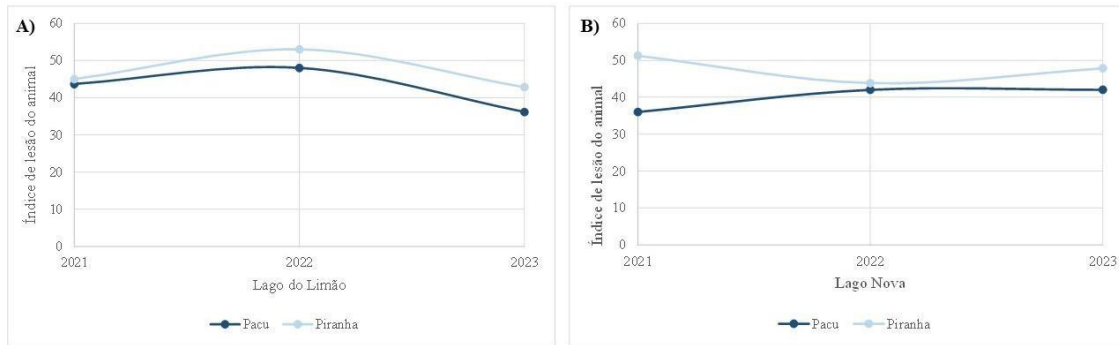


Figura 8: Índice de lesão dos animais de *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha), coletados nos lagos do Limão e Nova nos períodos chuvosos de 2021 a 2023.

Não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) nos índices de lesão das brânquias e do fígado ao comparar as duas espécies coletadas no Lago do Limão (Figura 9 A e B). Entretanto, foi observada variação significativa ($p < 0,05$) nos índices de lesões hepáticas ao comparar as espécies *Pygocentrus nattereri* e *Metynnis maculatus* coletadas no lago Nova, em 2022 (Figura 9D).

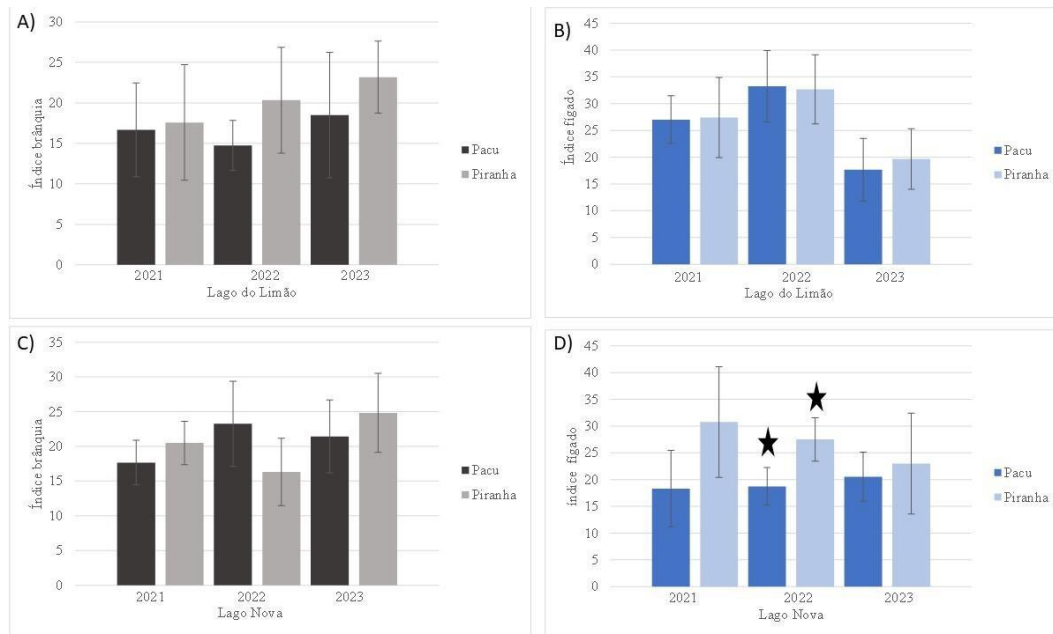


Figura 9: A) e B) Índice de lesão das brânquias e Fígado de *M. maculatus* e *P. nattereri* coletados no lago do Limão no período chuvoso de 2021 a 2023; C) e D) Índice de lesão das brânquias e Fígado de *M. maculatus* e *P. nattereri* coletados no lago Nova no período chuvoso de 2021 a 2023. Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. **Estrela indica diferença significativa ($p < 0,05$) entre as duas espécies, no mesmo período de coleta.**

D) Tipos de lesões

Os tipos de lesões branquiais e hepáticas observadas nos espécimes coletados nos lagos do Limão e Nova foram semelhantes. As lesões encontradas nas brânquias foram hemorragia, congestão de vasos, aneurisma, edema, descamação epitelial, necrose, deslocamento da primeira

lamela, fusão da segunda lamela, atrofia da primeira e segunda lamela, hipertrofia e hiperplasia celular. Entre as diversas alterações branquiais observadas, as mais frequentes incluem: hiperplasia e hipertrofia, descamação e necrose, as quais estão detalhadas na 1 e ilustradas na figura 10.

Tabela 1: Frequência (%) das lesões branquiais nos exemplares, *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha) coletados nos lagos do Limão e Nova referente aos 3 períodos chuvosos de 2021 a 2023.

Lesões Branquiais (%)	Lago do Limão	Lago Nova
Hiperplasia	91,42%	87,80%
Hipertrofia	74,28%	82,92%
Descamação	65,71%	70,73%
Necrose	62,85%	70,73%

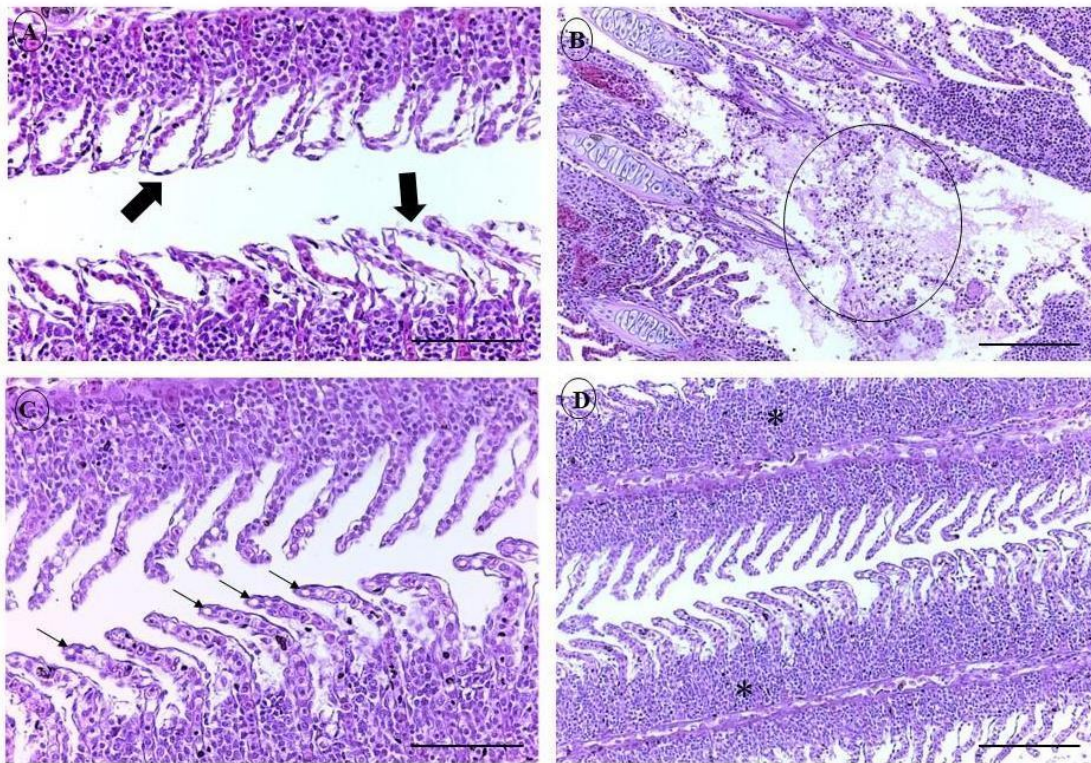


Figura 10: Fotomicrografia de brânquias de peixes avaliados nos lagos do Limão e Nova. A: Descamação epitelial (seta grossa); B: Necrose (círculo); C: hipertrofia (setas); D: hiperplasia (asterisco). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A e C = 50 μ m; B e D: 10 μ m.

As lesões hepáticas encontradas em ambas as espécies foram: hemorragia, congestão, alterações e inclusões citoplasmáticas, alterações nucleares, atrofia e necrose. Dentre as inúmeras alterações encontradas no fígado, as mais frequentes foram necrose, alteração citoplasmática, alteração nuclear e congestão de vasos. Essas lesões estão detalhadas na 2 e ilustradas na figura 11.

Tabela 2: Frequência (%) das lesões hepáticas nos exemplares, *Metynnis maculatus* (Pacu) e *Pygocentrus nattereri* (Piranha) coletados nos lagos do Limão e Nova referente aos 3 períodos chuvosos de 2021 a 2023.

Lesões Hepáticas (%)	Lago do Limão	Lago Nova
Necrose	94,28%	85,36%
Alteração citoplasmática	85,71%	75,60%
Alteração nuclear	85,71%	65,85%
congestão de vasos	74,28%	82,92%

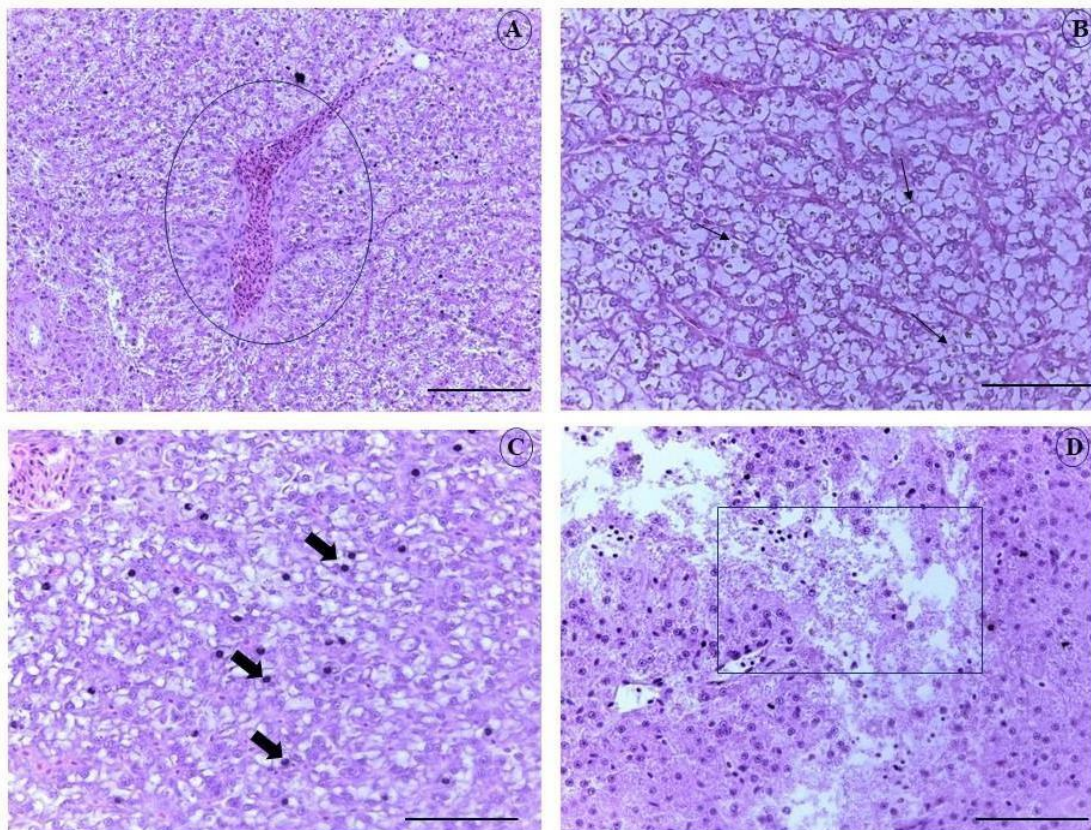


Figura 11: Fotomicrografia de fígado de peixes avaliados nos lagos do Limão e Nova. A: Congestão de vasos sanguíneos (Círculo) B: Alteração citoplasmática (setas finas) C: Alteração Nuclear (setas grossas) D: Necrose (quadrado). Coloração: Hematoxilina & Eosina. A - B = 10 μ m e C e D = 50 μ m.

DISCUSSÃO

A poluição aquática, muitas vezes relacionada à descarga de efluentes domésticos, industriais ou agrícolas (MANSON, 1996), pode ocorrer de diversas maneiras, seja de forma intencional ou acidental, decorrente de fontes naturais ou devido à ação humana (JOBLING, 1995). Além disso, a presença de metais ocorre de forma natural, porém tem sido agravada pelas atividades humanas, contribuindo para o aumento das concentrações desses metais em ambientes

aquáticos, tornando-os facilmente acessíveis para os organismos aquáticos (BAIRD, 2000). Costa *et al.* (2022) avaliou a bioacumulação de metais na biota aquática após o rompimento da barragem de Fundão e observou o aumento nas concentrações de metais, como Cr, Cu, Hg, Mn, Pb e Zn nas brânquias e no fígado de peixes onívoros e carnívoros de água doce coletados em janeiro de 2020, quando comparados com peixes coletados em setembro de 2018.

Em resposta às mudanças no ambiente, as brânquias são os primeiros órgãos a enfrentar as condições prejudiciais, uma vez que estão em contato direto com a água (BENLI *et al.*, 2008). Neste estudo, as lesões mais frequentes observadas nas brânquias em ambas as espécies avaliadas nos três períodos de coleta nos lagos do Limão e Nova foram: descamação epitelial, hipertrofia, hiperplasia e necrose. Vieira *et al.* (2022), ao avaliar brânquias de peixes onívoros/herbívoros e carnívoros coletados em ambientes dulcícolas afetados pelos rejeitos de lama da barragem de Fundão, em 2018 e 2019, também observaram descamação do epitélio e hiperplasia lamelar. Da mesma maneira, Ballotin (2019), ao analisar brânquias das espécies *Oreochromis niloticus* e *Geophagus brasiliensis*, coletadas na bacia do rio Doce, após o rompimento da barragem em Mariana/MG, observaram hipertrofia, descamação e hiperplasia.

Dentre as lesões branquiais observadas, a hipertrofia e hiperplasia apresentaram frequências altas nos lagos avaliados. De acordo com Paulino & Fernandes (2011), a hipertrofia e hiperplasia são um meio de defesa contra substâncias tóxicas, uma vez que atuam como barreiras para evitar a entrada dessas substâncias no organismo. No entanto, esse mecanismo de defesa apresenta efeitos colaterais, dentre eles, o de ampliar a distância entre a água e o sangue, visto que pode prejudicar as trocas gasosas (MALLAT, 1985; FERNANDES & MAZON, 2003). A hiperplasia é dada pelo aumento na quantidade de células situadas na base das lamelas e/ou no epitélio respiratório, isso acontece por causa de uma alta atividade mitótica. Já a hipertrofia é o aumento do tamanho das células, sem que aconteça mitose (THOMSON, 1978). Essas duas lesões foram observadas por Garcia-Santos *et al.* (2007) ao analisarem o tecido branquial da espécie *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) expostas ao cádmio, durante quatro dias.

A descamação do epitélio (ou elevação), observada neste estudo, pode ter sido estimulada por estresse químico, resultando em disfunção respiratória ocasionada pela diminuição da superfície do epitélio respiratório (CAMPOS, 2007; ZENI *et al.*, 2017).

Macêdo *et al.*, 2020, ao analisarem alterações histopatológicas de brânquias de espécie *Astyanax lacustris* expostos à água da bacia do rio Doce após ruptura da barragem de fundão, encontraram nos peixes, elevação epitelial, semelhante à lesão encontrada neste estudo.

O fígado é um órgão responsável por diversas funções no organismo, tais como no

metabolismo das substâncias, produção de anticorpo, depósito de ferro, carboidratos, lipídios, vitamina A e hematopoese (TAKASHIMA & HIBIYA, 1995). Assim, esse órgão é capaz de sofrer com vários estressores, incluindo a contaminação por metais (BRUSLÉ, ANADON, 1996). Além disso, é importante destacar que a necrose, uma lesão frequente nas brânquias neste estudo, foi observada em níveis ainda mais elevados nos fígados das duas espécies estudadas. A lesão é ocasionada pela morte celular ou tecidual, decorrente de lesões citoplasmáticas e nucleares irreversíveis (THOMSON, 1978).

Peixes onívoros/herbívoros e carnívoros coletados no rio doce, durante dois anos de monitoramento (Setembro de 2018 a fevereiro de 2020), após o rompimento da barragem de Fundão, apresentaram lesões hepáticas semelhantes às observadas neste estudo, sendo a necrose a mais frequente (VIEIRA *et al.*, 2022). Weber *et al.* (2020) também observaram necrose no fígado de *Hoplias intermedius* e *Hypostomus affinis* coletados no Rio Doce. As lesões descritas acima refletem as condições críticas no ambiente e podem indicar tanto a intensidade quanto a duração da exposição dos organismos às mudanças ambientais (MACEDO-VEIGA *et al.*, 2013).

Neste estudo, observou-se que a espécie *Pygocentrus nattereri* apresentou maior índice de lesão nos dois lagos amostrados, quando comparada à espécie *Metynnis maculatus*, em ambos os períodos de coleta. Além disso, em 2022, o índice de lesão no fígado do *P. nattereri* foi superior ao do *M. maculatus* durante o mesmo período no Lago Nova. Espécies que apresentam níveis tróficos mais elevados, como os peixes carnívoros (*P. nattereri*), têm a capacidade de bioacumular altos níveis de poluentes em seus tecidos corporais, em comparação com espécies posicionadas em níveis tróficos mais baixos, como os peixes onívoros (*M. maculatus*) (YI *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018; LACERDA *et al.*, 2020).

As espécies foram coletadas durante três estações chuvosas consecutivas. Durante o período de chuva, um grande volume de material inorgânico como sedimentos e outros detritos que estavam presentes nas margens dos rios, lagos e lagoas são ressuspensos para o corpo d'água (DUARTE *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2022). Essa exposição direta e significativa a materiais inorgânicos provenientes dos rejeitos da barragem de Fundão pode estar relacionada às alterações significativas nas as brânquias dos peixes encontrados no lago Nova. Esses achados podem ser justificados pela proximidade do epitélio respiratório com o ambiente externo, que se caracteriza pela considerável extensão de sua área superficial, tornando-o particularmente sensível às mudanças ambientais (CANTANHÊDE *et al.*, 2014). Considerando que a exposição prolongada a contaminantes tende a gerar organismos mais resistentes, às lesões no fígado dos peixes estão intimamente relacionadas à presença crônica de substâncias orgânicas na água. Essa ligação esclarece os danos morfológicos identificados nos tecidos hepáticos, uma vez que o fígado demonstra ser suscetível a reações

prolongadas devido à presença contínua de contaminantes (RABITTO *et al.*, 2005; BEVITÓRIO *et al.*, 2022)

A diferença significativa no índice de lesão do fígado das duas espécies analisadas observada no lago não impactado diretamente pelos rejeitos da barragem de Fundão pode ser explicada pelas características do lago do Limão, que é um lago profundo. As características de lagos profundos, como áreas de deposição para materiais transportados por rios tributários, tornam-os suscetíveis a impactos. Nesse cenário, a topografia mais complexa, as variações nas condições da água e na disponibilidade de nutrientes, típicas de lagos profundos, impactaram diretamente as espécies de peixes estudadas, principalmente o fígado, órgão de metabolização de diferentes compostos, incluindo xenobióticos (VIEIRA *et al.*, 2022).

A análise das lesões em peixes expostos aos rejeitos da barragem de Fundão revela graves impactos ambientais. As lesões observadas nas brânquias e no fígado, indicam adaptações a substâncias tóxicas, porém prejudiciais às trocas gasosas e à saúde dos órgãos. A prevalência dessas lesões entre espécies destaca a bioacumulação especialmente em peixes carnívoros. A diferença nas lesões entre lagos impactados e não impactados destaca a influência das características dos corpos d'água. A sazonalidade e as chuvas agravam a situação ao aumentar a exposição aos materiais tóxicos. Isso destaca a vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos diante de desastres, destacando a necessidade de medidas para mitigar danos, monitorar a saúde dos organismos e preservar a qualidade dos corpos d'água afetados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AU, D., W., T. **The application of histo-cytopathological biomarkers in marine pollution monitoring a review.** Marine Pollution Bulletin, v.48, p.817-834, 2004.

ANDRADES, R., GUABIROBA, H.C., HORA, M.S.C., MARTINS, R.F., RODRIGUES, V.L.A., VILAR, C.C., GIARRIZZO, T., JOYEUX, J.C. **Early evidences of niche shifts in estuarine fishes following one of the world's largest mining dam disasters.** Mar. Pollut. Bull. 154, 111073, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111073>

AGUIAR, V. M. C., BASTOS, A. C., QUARESMA, V. D. S., ORRLANDO, M. T. D'A., VEDOATO, F., CAVICHINI, A. S. **Trace metals distribution along sediment profiles from the Doce River Continental Shelf (DRCS) 3 years after the biggest environmental disaster in Brazil, the collapse of the Fundão Dam.** Regional Studies in Marine Science, V. 63, p. 103001, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103001>

ALVES, C. B. M.; VIEIRA, F.; POMPEU, P. S. **Ictiofauna da Bacia Hidrográfica do Rio**

São Francisco. In: Ministério do Meio Ambiente (Ed.). Diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. Pp 226-241. 2011.

BARROS, L. A., Mateus LAF, Braum DT, Bonaldo J. **Aspectos ecológicos de endoparasitos de piranha vermelha (*Pygocentrus nattereri*, Kner, 1860) proveniente do rio Cuiabá.** Arq Bras Med Vet Zootec 2010; 62(1): 228- 231. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-09352010000100033>.

BARROSO, G.F.; MELLO, F.A. de O. (2013). **Landscape compartments and indicators of environmental pressures on fluvial and lacustrine ecosystems of the Lower Doce River Valley.** Proceedings of the 15th Brazilian Symposium of Applied Physical Geography. Vitória, UFES, 158-165p. available at <http://www.xvsbgfa2013.com.br/anais/> (In Portuguese).

BENLI, A., Ç., K.; KOKSAL, G.; ÖZKUL, A. **Sublethal ammonia exposure of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.): Effects on gill, liver and kidney histology.** Chemosphere v. 72, p. 1355 1358, 2008.

BERNARDINO, A., F.; PAIS, F.,S.; OLIVEIRA, L., S.; GABRIEL, F., A.; FERREIRA, T., O.; QUEIROZ, H., M.; MAZZUCO, A., C., A. **Chronic trace metals effects of mine tailings on estuarine assemblages revealed by environmental DNA.** PeerJ 7:e8042, 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.8042>

BEVITÓRIO L. Z. SILVA N. G., PIROVANI J. C. M., MARQUES J. A. VIEIRA C. E. D., ZEBRAL Y. D., DAMASCENO E. M., LOPES L. L. R. SANT'ANA L. P., MARUBE L., COSTA S. R., MARTINS C. M. G. SANDRINI J. Z. SOUZA M. M. BIANCHINI A., VALE-OLIVEIRA M. **Impacts of tailings of Fundão dam (Brazil) rupture on marine fish: Metals bioaccumulation and physiological responses.** Marine Pollution Bulletin, 2022.

CAMARGO, M. M. P.; MARTINEZ, C. B. R. **Histopathology of gills, kidney and liver of a Neotropical fish caged in an urban stream.** Neotropical Ichthyology, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 327-336, 2007.

CANTANHÊDE, S. M.; MEDEIROS, A. M.; FERREIRA, F. S.; FERREIRA, J. R. C.; ALVES, L. M. C.; CUTRIM, M. V. J.; & SANTOS, D. M. S. **Uso de biomarcador histopatológico em brânquias de *Centropomus undecimalis* (Bloch, 1972) na avaliação da qualidade da água do Parque Ecológico Laguna da Jansen, São Luís-MA.** Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, v. 66, n. 2, p. 593-601, 2014.

CARVALHO-NETA, R., N., F.; SOUZA, D., B., P.; SOBRINHO, I., C., M.; HORTON, E., Y.; ALMEIDA, Z., S.; TCHAICKA, L; SOUZA, A., L. **Genotoxic and hematological parameters in *Colossoma macropomum* (Pisces, Serrasalminidae) as biomarkers for environmental impact assessment in a protected area in northeastern Brazil.** Environ Sci Pollut Res, v. 22, p.15994–

16003, 2015.

CBH-Doce» a **Bacia.** *Cbhdoce.org.br*, 2020, disponível em: www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia. Acesso em 29 de maio de 2023.

DIAS, A. C. M. L., BRANCO, C. W. C. & LOPES, V. G. **Estudos da dieta natural de peixes no reservatório de Ribeirão das Lajes, Rio de Janeiro.** *Acta Scientiarum Biological Sciencies*, v. 27, p. 355-364. 2005.

DIAS, C. A.; DA COSTA, A. S. V.; GUEDES, G. R.; DE MATOS UMBELINO, G. J.; DE SOUSA, L. G.; ALVES, J. H.; & SILVA, T. G. M. **Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce.** *Revista Espinhaço| UFVJM*, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2018.

FERNANDES, M., N.; MAZON, A. F. *Environmental Pollution and Fish gill Morphology*, In Val. A. L., Kapoor, B. G. (Eds.), *Fish Adaptations Science Publishers, Inc. Enfield, USA*, 203-231. 2003.

GOMES, L. DE C. et al. **Biologia do jundiá *Rhamdia quelen* (Teleostei, Pimelodidae).** *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 30, n.1, p. 179-185. 2000.

GOMES, L.E.O.; CORREA, L.B.; SÁ, F.; NETO, R.R.; BERNARDINO, A.F. **The impacts of the Samarco minetailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil.** *Mar Pollut. Bull.* 120, 28-36, 2017.

GONÇALVES, M. A.. **Ecohidrologia e gestão integrada de recursos hídricos em uma bacia lacustre costeira (Lago Nova, Linhares, ES).** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Oceanografia Ambiental)-Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.

GUERINI, S. PRADO, G. P., DOS PASSOS, M. G. **Hábito alimentar de *Rhamdia quelen* (siluriformes: Pimelodidae) em um trecho do rio Bonito no município de São Domingos, Santa Catarina.** *Revista Uningá Review*, v. 18, n. 2. 2014.

IBAMA. 2015. **Laudo Técnico Preliminar.** URL: <https://am37.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminardo-ibama-sobre-mariana.pdf>

JIANG, Z.; XU, N.; LIU, B.; ZHOU, L.; WANG, J.; WANG, C.; DAI, B.; XIONG, W. **Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China.** *Ecotoxicology and environmental Safety*, v. 157, p. 1-8, 2018

JÉGU, M. **Subfamily Serrasalminae.** 2003 In: Reis, RE, Kullander, SO, Ferraris, C.J. (Eds). *Check list of the freshwater fishes of south and Central America. (CLOFFSCA).* EDIPUCRS, Porto Alegre. p. 182-196.

JOBLING, M. **Environmental biology of fishes.** London: Chapman & Hall, 1995. p. 455.

KULLANDER, S. O. **Family Cichlidae (Cichlids).** In: Reis, R. E., S. O. Kullander & C. J.

Ferraris Jr. (Eds.). Check list of the freshwater fishes of South and Central America. Edipucrs, Porto Alegre, 2003.

LACERDA, D.; DOS SANTOS VERGILIO, C.; DA SILVA SOUZA, T.; COSTA, L., H., V.; RANGEL, T. P.; DE OLIVEIRA, B., C., V.; DE ALMEIDA, D., Q., R.; PESTANA, I., A.; DE ALMEIDA, M., G.; REZENDE, C., E.. **Comparative metal accumulation and toxicogenetic damage induction in three neotropical fish species with distinct foraging habits and feeding preferences.** Ecotoxicology and environmental Safety, v. 195, p. 110449, 2020.

MACÊDO, A.K.S., DOS SANTOS, K.P.E., BRIGHENTI, L.S., WINDMOLLER, C.C., BARBOSA, F.A.R., DE AZAMBUJA RIBEIRO, R.I.M., DOS SANTOS, H.B., THOMÉ, R.G. **Histological and molecular changes in gill and liver of fish (*Astyanax lacustris* Lütken, 1875) exposed to water from the Doce basin after the rupture of a mining tailings dam in Mariana, MG.** Brazil Science of the Total Environment v. 735, p. 139505, 2020.

MALLATT, J. **Fish gill structural changes induced by toxicants and other irritants: a statistical review.** Can. J. Fish. Aquat. Sci., v. 42, p. 630-648, 1985.

MASON, C. F. **Biology of freshwater pollution.** 3.ed. Londres: Longman, 1996.

MELETTI, P. C. **Avaliação da degradação ambiental por meio de testes de toxicidade com sedimento e de análises histopatológicas em peixes.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MILLER, M. E., GHISOLFI, R. D., BARROSO, G. F. **Remote sensing monitoring of mining tailings in the fluvial-estuarine-coastal ocean continuum of the Lower Doce River Valley (Brazil).** Environmental Monitoring and Assessment, v. 195, n. 5, p. 542, 2023.

MYERS, M. S.; JOHNSON, L. L.; OLSON, O. P.; STEHR, C. M.; HORNESS, B. H.; COLLIER, T. K. & MCCAIN, B. B. **Toxicopathic Hepatic lesions as biomarkers of chemical contaminant exposure and effects in marine bottom fish species from the Northeast and pacific coasts, USA.** 1998.

OBAROH, I. O.; ABUBAKAR, U.; HARUNA, M. A.; ELINGE, M. C. **Evaluation of some Heavy Metals Concentration in River Argungu.** Journal of Fisheries and Aquatic Science, v.10, p.581- 586, 2015.

de OLIVEIRA, S. R. S., PINHEIRO-SOUSA, D. B., de ALMEIDA, Z. D. S., da Silva CASTRO, J., & CARVALHO-NETA, R. N. F. **Lesões histopatológicas como biomarcadores de contaminação aquática em *Oreochromis niloticus* (Osteichthyes, Cichlidae) de uma área protegida no Maranhão.** Revista Brasileira de Engenharia de Pesca, v. 9, n. 1, p. 12-26, 2016.

PAULINO, Marcelo Gustavo. **Efeito da exposição à atrazina nas brânquias de curimatá, *Prochilodus lineatus* (Teleósteo, Prochilodontidae).** Dissertação (Mestrado em Ciências

Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

RABITO, I. S.; ALVES COSTA, J. R. M.; DE ASSIS, H. C. S.; PELLETIER, E.; AKAISHI, F. M.; ANJOS, A.; RANDI, M. A. F.; RIBEIRO, C. A. **Effects of dietary Pb(II) and tributyltin on neotropical fish, *Hoplias malabaricus*: histopathological and biochemical findings.** *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 60, n. 2, p. 147-156, 2005.

RAMOS, I. P., VIDOTTO-MAGNONI, A. P. & CARVALHO, E. D. **Influence of cage fish farming on the diet of dominant fish species of a Brazilian reservoir (Tietê River, High Paraná River basin).** *Acta Limnologica Brasiliensia*, v, 20, p. 245-252. 2008.

STENTIFORD, G. D.; LONGSHAW, M.; LYONS, B. P.; JONES, G.; GREEN, M.; & FEIST, S. W. **Histopathological biomarkers in estuarine fish species for the assessment of biological effects of contaminants.** *Marine Environmental Research*, v. 55, n. 2, p. 137-159, 2003.

TAKASHIMA, F.; HIBIYA T. **An atlas of fish histology – Normal and Pathological Features.** Kodansha Ltd., Tóquio. p. 195. 1995.

VIEIRA, C. E. D.; MARQUES, J. A.; DA SILVA, N. G.; BEVITÓRIO, L. Z.; ZEBRAL, Y. D.; MARASCHI, A. C.; COSTA, S. R.; COSTA, P. G.; DAMASCENO, E. M.; PIROVANI, J. C. M.; DO VALE-OLIVEIRA, M.; SOUZA, M. M.; DE MARTINEZ GASPARD MARTINS, C.; BIANCHINI, A.; SANDRINI, J. Z. **Ecotoxicological impacts of the Fundão dam failure in freshwater fish community; Metal bioaccumulation, biochemical, genetic and histopathological effects.** *Science of the total environment*, v. 832, p. 154878. 2022.

WEBER, A. A.; SALES, CF.; DE SOUZA FARIA, F.; MELO, RMC; BAZZOLIB, N.; RIZZO, E. **Efeitos da contaminação do metal no fígado em duas espécies de peixes de um rio neotropical altamente impactado: um estudo de caso da barragem de Fundão Brasil.** *Ecotoxicol. Ambiente. Saf*, v. 190, p. 110165. 2020.

YI, Y.; TANG, C.; YI, T.; YANG, Z.; ZHANG, S. **Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China.** *Ecotoxicology and environmental Safety*, v. 145, p. 295-302, 2017.

ZENI, T. D. O. **O uso de histopatologia por microscopia de luz em estudos com peixes dulcícolas em condições ambientais controladas.** Tese (Doutorado em Zoologia) - Pós Graduação em Ciências Biológicas, Zoologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

No Lago Nova, afetado pelos rejeitos de minérios do rompimento da barragem de Fundão, houve alteração significativa nas brânquias dos organismos devido à exposição direta com os resíduos de mineração, os quais são re-suspensos durante as estações chuvosas. Por outro lado, no lago do Limão, embora seja um lago grande e propensa à deposição de sedimentos, não há contato direto com os rejeitos do rompimento de Fundão. Levando em consideração que a exposição prolongada a contaminantes tende a gerar organismos mais resistentes, às alterações significativas no fígado dos peixes estão intimamente relacionadas à presença crônica de substâncias orgânicas na água. Essa ligação esclarece os danos morfológicos identificados nos tecidos hepáticos, uma vez que o fígado demonstra ser suscetível a reações prolongadas devido à presença contínua de contaminantes. Em relação ao nível trófico, no Lago Nova, durante a estação chuvosa, as piranhas coletadas mostraram uma maior alteração nas brânquias, sendo esta a responsável pela modificação nos índices de lesões observados, Isso ocorre porque as piranhas, por estarem em um nível trófico elevado (carnívoras), têm uma maior capacidade de acumular concentrações mais altas de metais do que os peixes de níveis tróficos mais baixos (onívoros). Essa diferença no nível trófico influencia a extensão das alterações nas brânquias e nos índices de lesões entre as diferentes espécies de peixes.

As espécies de *Metynnis maculatus* e *Pygocentrus nattereri* exibiram alterações morfológicas contínuas ao longo de três estações chuvosas consecutivas. Assim, este estudo ressalta a persistência das alterações morfológicas ao longo do tempo, enfatizando a importância do monitoramento contínuo de organismos, em resposta às condições ambientais.

A interação entre um rio e seus lagos marginais é um processo complexo que pode apresentar riscos ambientais significativos. As águas de um rio, frequentemente, carregam consigo uma alta carga de nutrientes, sedimentos, matéria orgânica e uma variedade de contaminantes ambientais, que podem incluir metais tóxicos e pesticidas agrícolas. Nesse contexto, é importante ressaltar que a resposta observada em relação às lesões dos animais não pode ser diretamente atribuída a um metal específico ou contaminante, já que a interação entre esses fatores ambientais complexos podem resultar em uma série de efeitos adversos sobre a saúde dos organismos aquáticos.

Por fim, a histopatologia emerge como uma ferramenta crucial no monitoramento ambiental. Seu papel na identificação detalhada dos efeitos adversos oferece uma compreensão mais ampla da saúde do ecossistema como um todo, fornecendo subsídios essenciais para a conservação e gestão adequada dos recursos naturais.