

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA SAÚDE

ROBERTA DA SILVA CARNEIRO

FOSFOGESSO INDUZ ALTERAÇÕES COMPORTAMENTAIS EM
PEIXE-ZEBRA (*Danio rerio*)

Uberaba
2026

ROBERTA DA SILVA CARNEIRO

FOSFOGESSO INDUZ ALTERAÇÕES COMPORTAMENTAIS EM
PEIXE-ZEBRA (*Danio rerio*)

Dissertação apresentada ao curso de
Pós-Graduação em Ciências da Saúde,
da Universidade Federal do Triângulo
Mineiro, como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em
Ciências da Saúde.
Orientador: Prof. Dr. Matheus Marcon

Uberaba

2026

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

C29f Carneiro, Roberta da Silva
Fosfogesso induz alterações comportamentais em peixe-zebra
(*Danio rerio*) / Roberta da Silva Carneiro. -- 2026.
54 p. : il., fig., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) -- Universidade
Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2026
Orientador: Prof. Dr. Matheus Felipe Marcon

1. Poluição da Água. 2. Fosfogesso. 3. Peixe-zebra. 4. Síndromes
Neurotóxicas. 5. Ecotoxicologia. 6. Avaliação do comportamento.
I. Marcon, Matheus Felipe. II. Universidade Federal do Triângulo
Mineiro. III. Título.

CDU 628.193:631.416.2

FOSFOGESSO INDUZ ALTERAÇÕES COMPORTAMENTAIS EM PEIXE-ZEBRA (*Danio rerio*)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde, área de concentração “Ciências da Saúde” (Linha de Pesquisa: Aspectos Imunopatológicos, Morfológicos, Celulares E Moleculares Das Doenças) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 21 de julho de 2026

Banca Examinadora:

Dr. Matheus Felipe Marcon – Orientador
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Darlan Gusso
Instituto Butantan



Documento assinado eletronicamente por **MATHEUS FELIPE MARCON, Professor do Magistério Superior**, em 25/07/2026, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



[novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



Documento assinado eletronicamente por **Darlan Gusso, Usuário Externo**, em 28/07/2026, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1822466** e o código CRC **D456A7F0**.

Dedico este trabalho àqueles que dedicam suas vidas à busca pelo conhecimento, certos de que cada descoberta, por menor que pareça, tem o potencial de gerar grandes transformações para a sociedade e para as futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar, e iluminar meu caminho ao longo desta jornada, concedendo-me sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados.

À minha família, por todo o apoio e incentivo imensuráveis. Em especial, aos meus pais Antônio Carlos e Raquel e à minha irmã Renata, que nunca mediram esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos e realizar meus sonhos. Agradeço por cada lanchinho/xícara de café que me ofereceram quando os prazos estavam apertados e por todo carinho e paciência incondicionais.. Amo vocês!

Às minhas tias Mariana, Rosana e minhas avós Maria e Maria Auxiliadora, pelo carinho e por sempre acreditar em mim e celebrar comigo cada conquista.

Aos meus amigos, que compartilharam comigo os desafios, as alegrias, as inseguranças e as vitórias desta trajetória. Em especial, à Camila e à Leandra, pela amizade sincera, pelo companheirismo e pelo apoio constante sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Matheus Marcon, pela confiança depositada em mim, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos, pela paciência e pelas inúmeras oportunidades de crescimento acadêmico e profissional.

A todos os meus professores, desde a educação infantil até a pós-graduação, que contribuíram para a minha formação e me inspiraram a acreditar na educação. Espero um dia fazer diferença na vida de meus alunos como eles fizeram na minha.

À CAPES, pelo apoio financeiro, fundamental para a execução do trabalho.

Ao grupo de pesquisa Neurofar, pelo acolhimento, em especial a Paula Teixeira e a Lara Júlia, que me auxiliaram em todos os experimentos, nas disciplinas e no dia a dia. Agradeço por cada xícara de café e risadas compartilhadas que fizeram com que os desafios e as dificuldades fossem mais leves.

Às professoras do LEF, à técnica de laboratório Thais Farnesi e aos colaboradores Angelo Piato, Daniela Muller, Deusmaque Carneiro e Virmondes Rodrigues Jr., pela colaboração, disponibilidade, ensinamentos e apoio ao longo desta caminhada. Vocês foram fundamentais para chegar ao final desta etapa.

A UFTM e ao PGCS, pelo ensino de qualidade e gratuito, em especial à secretária Tuânia pela dedicação, atenção e ajuda durante esses dois anos.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a concretização desta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

O aumento da demanda global por alimentos impulsionou o uso de fertilizantes, resultando na geração em larga escala de fosfogesso, um subproduto industrial frequentemente armazenado a céu aberto e com potencial para gerar impactos sobre os ecossistemas. Apesar da crescente preocupação ambiental associada a esse resíduo, ainda são escassos os estudos que investigam seus efeitos neurocomportamentais, especialmente em relação à locomoção, ao comportamento semelhante à ansiedade e à preferência social. O presente estudo avaliou os efeitos do fosfogesso sobre os parâmetros físico-químicos da água e as respostas comportamentais de peixes-zebra adultos (*Danio rerio*) após exposição subaguda (7 a 10 dias) e prolongada (28 a 31 dias) ao fosfogesso. Os animais foram expostos a três concentrações de fosfogesso (0,025; 0,1 e 0,4 g/L), além de um grupo controle. Foram realizados os testes de tanque novo, claro/escuro e preferência social para avaliar locomoção, comportamento semelhante à ansiedade e preferência social, respectivamente. Todos os experimentos comportamentais e as análises estatísticas foram conduzidos de forma cegada. O fosfogesso alterou as características da água de forma concentração-dependente, a maior concentração de 0,4 g/L reduziu o pH em 9 %, aumentou a condutividade em 171%, a dureza em 412,5% e a turbidez em 16,9%. Em relação ao comportamento, a exposição subaguda de 0,4 g/L induziu comportamento semelhante à ansiedade no teste claro/escuro, e reduziu a preferência social. Já a exposição prolongada a 0,4 g/L resultou em aumento da atividade locomotora, e 0,025 g/L reduziu o comportamento semelhante à ansiedade no teste de tanque novo. Os resultados demonstram que o fosfogesso promove alterações físico-químicas no meio aquático e induz respostas neurocomportamentais dependentes da concentração e do tempo de exposição, evidenciando a sensibilidade do peixe-zebra para a avaliação dos efeitos ecotoxicológicos desse resíduo. Tais achados reforçam a necessidade de estratégias de monitoramento, manejo e destinação ambientalmente adequada desse resíduo.

Palavras-chave: *Danio rerio*; Ecotoxicologia; Fosfogesso; Neurotoxicidade; Comportamento.

ABSTRACT

The increase in global demand for food has driven the use of fertilizers, resulting in the large-scale generation of phosphogypsum, an industrial byproduct often stored outdoors and with the potential to impact ecosystems. Despite growing environmental concerns associated with this waste, studies investigating its neurobehavioral effects are still scarce, especially regarding locomotion, anxiety-like behavior, and social interaction. This study looked at the effects of phosphogypsum on the physical-chemical parameters of water and the behavioral responses of adult zebrafish (*Danio rerio*) after subacute exposure (7 to 10 days) and prolonged exposure (28 to 31 days) to phosphogypsum. The animals were exposed to three concentrations of phosphogypsum (0.025, 0.1, and 0.4 g/L), in addition to a control group. Novel tank, light/dark, and social preference tests were conducted to assess locomotion, anxiety-like behavior, and social interaction, respectively. The procedures and behavioral analyses were conducted blind to group allocation. The addition of phosphogypsum changed the water characteristics in a concentration-dependent way, causing at 0.4 g/L a 9% decrease in pH, a 171% increase in conductivity, a 412.5% increase in hardness, and a 16.9% increase in turbidity. Regarding behavior, subacute exposure led to anxiety-like behavior in the light/dark test, and in the social preference test, a reduced preference for the interaction zone at 0.4 g/L. On the other hand, prolonged exposure resulted in increased locomotor activity at the highest concentration and reduced anxiety-like behavior at the lowest concentration (0.025 g/L) in the novel tank test. The results show that phosphogypsum causes physico-chemical changes in the aquatic environment and triggers neurobehavioral responses depending on the concentration and exposure time, highlighting the sensitivity of zebrafish for assessing the ecotoxicological effects of this waste. These findings emphasize the need for strategies for monitoring, management, and environmentally proper disposal of this waste.

.

Keywords: *Danio rerio*; Ecotoxicology; Phosphogypsum; Neurotoxicity; Behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tanque de alojamento.....	19
Figura 2: Desenho experimental da exposição subaguda e prolongada.....	20
Figura 3: Tanque do teste de tanque novo.....	22
Figura 4: Tanque do teste de claro/escuro.....	23
Figura 5: Aparato utilizado no teste de preferência social.....	24
Figura 6: Efeito da exposição subaguda no teste de tanque novo.....	27
Figura 7: Efeito da exposição subaguda no teste claro/escuro.....	28
Figura 8: Efeito da exposição subaguda no teste de preferência social.....	29
Figura 9: Trajetórias representativas de natação (mapas de rastreio).....	30
Figura 10: Efeito da exposição prolongada no teste de tanque novo.....	31
Figura 11: Mapas de calor da densidade de ocupação.....	32
Figura 12: Efeito da exposição prolongada no teste de claro/escuro.....	33
Figura 13: Efeito da exposição prolongada no teste de preferência social.....	33

LISTA DE SIGLAS

ANOVA - Análise de Variância

APHA - *American Public Health Association*

As - Arsênio

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cd - Cádmio

CEUA - Comitê de Ética no Uso de Animais

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONCEA - Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal

Cr - Cromo

Mn - Manganês

NTU - Unidade nefelométrica de turbidez

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

Pb - Chumbo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos:.....	16
2.2.1 Avaliar os efeitos do fosfogesso sobre os parâmetros físico-químicos da água;.....	16
2.2.2 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (Danio rerio) adultos sobre o comportamento locomotor;.....	16
2.2.3 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (Danio rerio) adultos sobre o comportamento semelhante à ansiedade;.....	16
2.2.4 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (Danio rerio) adultos sobre o comportamento social.....	16
3 MÉTODOS.....	16
3.1 Aspectos éticos.....	16
3.2 Fosfogesso.....	16
3.3 Animais.....	18
3.4 Procedimentos experimentais.....	19
3.4.1 Análise dos parâmetros comportamentais.....	21
3.4.1.1 Teste de tanque novo.....	21
3.4.1.2 Teste claro/escuro.....	22
3.4.1.3 Teste de preferência social.....	23
3.5 Análise estatística.....	24
3.5.1 Cálculo amostral.....	24
3.5.2 Avaliação da normalidade e escolha dos testes estatísticos.....	24
4 RESULTADOS.....	25
4.1 Parâmetros físico-químicos da água de exposição.....	25
4.2 Comportamento.....	26
4.2.1 Resultados comportamentais após exposição subaguda.....	26
4.2.1.1 Teste de tanque novo.....	26
4.2.1.2 Teste de claro/escuro.....	27
4.2.1.3 Teste de preferência social.....	28
4.2.2 Resultados comportamentais após exposição prolongada.....	30
4.2.2.1 Teste de tanque novo.....	30
4.2.2.2 Teste de claro/escuro.....	32
4.2.2.3 Teste de preferência social.....	33
5 DISCUSSÃO.....	34
5.1 Fosfogesso induz alterações físico-químicas na água.....	34
5.2 Exposição de subaguda ao fosfogesso.....	36
5.3 Exposição prolongada ao fosfogesso.....	37
5.4 Fosfogesso induz alterações comportamentais dependentes do tempo de exposição.....	38
5.5 Fosfogesso, Saúde Única e sustentabilidade: implicações para a gestão ambiental e a saúde pública.....	40
5.6 Pontos fortes e limitações.....	42
6 CONCLUSÃO.....	43
8 REFERÊNCIAS.....	44
Anexo I: Parecer técnico CEUA: “Avaliação dos efeitos do fosfogesso em peixe-zebra (Danio rerio).....	51

1 INTRODUÇÃO

No século XIX, a população mundial atingiu 1 bilhão de pessoas. Desde então, o crescimento populacional tem sido expressivo, refletindo avanços no desenvolvimento humano, na medicina, no saneamento básico e na produção de alimentos (ONU, 2024). Em 15 de novembro de 2022, a população atingiu 8 bilhões de habitantes, representando um marco histórico (ONU, 2022). Projeções das Nações Unidas indicam que esse número continuará aumentando nas próximas décadas, podendo ultrapassar 9,7 bilhões de pessoas por volta de 2050 (ONU, 2019), evidenciando a contínua expansão da população global.

O aumento populacional intensifica a demanda por recursos fundamentais à vida e está associado a diversas consequências ambientais e sociais, como desmatamento, esgotamento dos solos e ampliação de problemas relacionados à fome (Van Bavel, 2013). Nesse contexto, a ampliação da produção de alimentos torna-se essencial, e estudos estimam que a demanda global por alimentos poderá aumentar entre 35% e 56% entre 2010 e 2050 (Van Dijk *et al.*, 2021). Esse cenário impulsiona o uso de fertilizantes, insumos indispensáveis para as atividades agrícolas atuais, que nas últimas décadas permitiram um expressivo aumento na capacidade global de produção de alimentos (Penuelas, Coello e Sardans, 2023).

A intensificação da produção de fertilizantes fosfatados tem gerado importantes desafios ambientais, dentre os quais se destaca a crescente geração de fosfogesso, um subproduto sólido resultante da produção de ácido fosfórico, principal matéria-prima utilizada na fabricação desses fertilizantes (Adalibieke *et al.*, 2023; Penuelas e Sardans, 2023). Considerado um dos maiores resíduos industriais do mundo, o fosfogesso é produzido em larga escala e sua geração acompanha diretamente a expansão da agricultura global. Estima-se que a produção anual mundial de fosfogesso possa atingir aproximadamente 438 milhões de toneladas até 2050, resultando em um estoque acumulado próximo de 11 bilhões de toneladas. Apesar dos elevados volumes produzidos, apenas uma pequena parcela desse material é atualmente utilizada, tornando sua disposição final um importante desafio ambiental e econômico (Akfas *et al.*, 2024).

No Brasil, considerado um dos principais produtores mundiais de fosfogesso, a geração anual desse resíduo é estimada entre 25 e 32 milhões de toneladas, concentrando-se principalmente nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Os

municípios de Uberaba (MG) e Cubatão (SP) destacam-se como importantes pólos associados à mineração fosfática e à indústria de fertilizantes, sendo responsáveis pela produção de grandes volumes de fosfogesso (Seven Resíduos, 2026). Em Uberaba, a presença de complexos industriais ligados à produção de fertilizantes fosfatados, incluindo unidades da Mosaic Fertilizantes e da Yara Brasil, contribui para o acúmulo de extensas pilhas desse resíduo. Segundo a Mosaic (2025), o município abriga a maior operação de distribuição de fosfogesso para uso agrícola do mundo, tornando-se uma área de especial interesse para estudos ambientais e toxicológicos.

O fosfogesso é geralmente armazenado em grandes pilhas a céu aberto próximas às unidades produtoras, ficando exposto à ação de fatores climáticos como chuva e vento. Essas condições favorecem a dispersão e a lixiviação de seus constituintes para o ambiente, podendo resultar na contaminação de solos, águas superficiais, aquíferos subterrâneos e da atmosfera (Araújo e Fernandes, 2013). Além do sulfato de cálcio, sua composição pode incluir metais potencialmente tóxicos, como arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cromo (Cr), bem como compostos ácidos e radionuclídeos naturais (Akfas *et al.*, 2024). A liberação desses contaminantes tem sido associada à alteração dos parâmetros físico-químicos da água, à degradação de ecossistemas aquáticos e terrestres, à contaminação de recursos hídricos, à dispersão atmosférica de partículas e a potenciais riscos à saúde humana, incluindo efeitos respiratórios, hepáticos, carcinogênicos e doenças autoimunes (Mishra *et al.*, 2010; Tayibi *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2022). Diante desses potenciais impactos, torna-se essencial avaliar os efeitos do fosfogesso sobre organismos expostos em ambientes aquáticos.

A avaliação dos impactos ambientais decorrentes da liberação de contaminantes em ecossistemas aquáticos constitui um dos principais objetivos da ecotoxicologia, área que integra conhecimentos da ecologia, toxicologia, química ambiental e biologia para compreender os efeitos de substâncias potencialmente tóxicas sobre organismos e ecossistemas (Walker *et al.*, 2012). Os ambientes aquáticos estão entre os compartimentos ambientais mais vulneráveis à contaminação, uma vez que atuam como receptores finais de poluentes provenientes de atividades industriais, agrícolas e urbanas. Nesse contexto, a utilização de organismos bioindicadores tem se mostrado uma ferramenta fundamental para a detecção precoce de impactos ambientais, permitindo a

avaliação de respostas em diferentes níveis de organização biológica, desde alterações celulares e fisiológicas até modificações comportamentais e populacionais (Newman, 2019). Entre esses desfechos, as alterações comportamentais têm recebido destaque por apresentarem respostas sensíveis e precoces à exposição a contaminantes, podendo indicar comprometimentos neurológicos antes mesmo da ocorrência de danos morfológicos mais evidentes (Newman, 2019; Stewart *et al.*, 2014).

Dentre os organismos utilizados em estudos ecotoxicológicos, o peixe-zebra (*Danio rerio*) destaca-se como um dos principais modelos experimentais da atualidade e é amplamente reconhecido como bioindicador de contaminação ambiental (Braga *et al.*, 2024). Originário do sul da Ásia e pertencente à família Cyprinidae, esse organismo apresenta características que favorecem sua utilização em pesquisas ambientais e biomédicas, incluindo pequeno porte, fácil manutenção em laboratório, elevada fecundidade, rápido desenvolvimento embrionário, transparência dos embriões e baixo custo experimental (Choi *et al.*, 2021). Além disso, aproximadamente 70% dos genes humanos possuem homólogos no genoma do peixe-zebra, percentual que ultrapassa 80% para genes associados a doenças humanas, conferindo elevada relevância translacional aos resultados obtidos nessa espécie (Howe *et al.*, 2013). Seu sistema nervoso apresenta organização neuroanatômica e neuroquímica conservada entre os vertebrados, permitindo a investigação de processos relacionados à ansiedade, sociabilidade, aprendizagem, cognição e neurotoxicidade (Stewart *et al.*, 2014).

O peixe-zebra está continuamente exposto às substâncias presentes no ambiente aquático, cuja absorção pelo organismo pode ocorrer por diferentes vias, incluindo as brânquias, a pele e o trato gastrointestinal, a depender das características físico-químicas dos compostos e de sua biodisponibilidade no meio (Rong *et al.*, 2021; Armitage *et al.*, 2017). Entre essas vias, as brânquias constituem uma importante interface entre o organismo e a água, devido à sua ampla superfície de contato, elevada vascularização e participação nos processos de trocas gasosas e regulação iônica. Em peixe-zebra, estudos experimentais demonstram a captação de elementos diretamente do meio aquático, incluindo metais como cádmio e cobre, além da participação de mecanismos específicos de transporte (Komjarova; Bury, 2014; Kodzhahinchev *et al.*, 2023). Dessa forma, a exposição aquática constitui uma importante via de entrada de substâncias no organismo, podendo favorecer sua

posterior distribuição e acumulação em diferentes tecidos. Dessa forma, o peixe-zebra tem sido amplamente empregado em estudos de genética, neurociência, toxicologia, ecotoxicologia, farmacologia e modelagem de doenças humanas, contribuindo significativamente para a identificação de potenciais riscos ambientais e à saúde humana (Choi *et al.*, 2021; Szychlińska; Marino Gammazza, 2025).

Nesse contexto, a presença de elementos potencialmente tóxicos na composição do fosfogesso merece atenção, uma vez que processos de lixiviação podem favorecer sua liberação para a fase aquosa, dependendo das condições físico-químicas do meio. Estudos sobre o comportamento desse resíduo indicam que a mobilização de determinados elementos pode ser influenciada por fatores como o pH e a relação entre a quantidade de resíduo e o volume de água (Peng *et al.*, 2020; Ammar *et al.*, 2013). Uma vez disponibilizados na água, esses elementos podem apresentar diferentes graus de biodisponibilidade e constituir potenciais fontes de exposição para organismos aquáticos (Rutherford; Dudas; Arocena, 1995). Dessa forma, alterações na composição físico-química da água decorrentes da presença do fosfogesso podem favorecer o contato dos peixes com seus constituintes e, conseqüentemente, contribuir para a ocorrência de efeitos biológicos.

Nos últimos anos, diversos estudos têm demonstrado que a exposição a metais potencialmente tóxicos e outros poluentes ambientais pode desencadear alterações locomotoras, déficits de interação social, comportamentos semelhantes à ansiedade e prejuízos cognitivos em peixes-zebra, evidenciando a sensibilidade desse organismo para a detecção de efeitos neurotóxicos (Braga *et al.*, 2024). Entretanto, apesar da crescente preocupação com os impactos ambientais do fosfogesso e da ampla utilização do peixe-zebra como modelo ecotoxicológico (Silva *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2025) ainda são escassos os estudos que investigam os efeitos desse resíduo sobre o sistema nervoso central. Recentemente, Wang *et al.* (2025) demonstraram que a exposição ao fosfogesso pode promover estresse oxidativo, danos histológicos hepáticos, apoptose celular e genotoxicidade em peixes-zebra submetidos a condições de aquecimento ambiental. Contudo, os possíveis efeitos neurocomportamentais decorrentes da exposição a esse resíduo permanecem pouco compreendidos.

A relevância deste estudo também se estende à avaliação de risco ambiental e à gestão de resíduos industriais, uma vez que a identificação de alterações

físico-químicas da água e de respostas neurocomportamentais em peixe-zebra pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de biomonitoramento e para o acompanhamento de áreas potencialmente expostas à dispersão de constituintes do fosfogesso. Embora os resultados obtidos não permitam, isoladamente, estabelecer critérios regulatórios ou limites de exposição, eles fornecem evidências que podem subsidiar futuras avaliações de risco, programas de monitoramento ambiental e estratégias de contenção, manejo e destinação desse resíduo.

Essa perspectiva está alinhada aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, especialmente quanto à proteção da qualidade ambiental, à prevenção e à gestão ambientalmente adequada dos resíduos (Brasil, 2010). Além disso, a pesquisa contribui para os objetivos de desenvolvimento sustentável (United Nations, 2015), particularmente o ODS 3, saúde e bem estar para todos, o ODS 6, relacionado à redução da poluição e à proteção da qualidade da água, o ODS 12, voltado ao manejo ambientalmente adequado de produtos químicos e resíduos e à redução de sua liberação para o ambiente, o ODS 14 sobre vida na água e o ODS 15 sobre vida na terra.

Diante do aumento contínuo da produção e do acúmulo de fosfogesso em diferentes regiões do mundo, especialmente em importantes polos produtores brasileiros como o município de Uberaba (MG), torna-se fundamental ampliar o conhecimento acerca dos riscos ambientais associados a esse material. Considerando a possibilidade de dispersão de contaminantes presentes no fosfogesso para ecossistemas aquáticos, bem como a escassez de estudos que investiguem seus efeitos sobre o sistema nervoso central, esta pesquisa busca contribuir para o preenchimento de uma importante lacuna científica relacionada à toxicidade do fosfogesso, particularmente no que se refere aos efeitos neurocomportamentais associados à ansiedade, à locomoção e à preferência social em peixe-zebra. Parte-se, portanto, da hipótese de que a exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso seja capaz de induzir alterações neurocomportamentais em peixes-zebra adultos (*Danio rerio*), manifestadas por mudanças nos padrões de locomoção, no comportamento semelhante à ansiedade e na preferência social. Os resultados obtidos poderão contribuir para a compreensão dos potenciais riscos ecotoxicológicos associados ao fosfogesso, fornecendo subsídios para futuras estratégias de monitoramento ambiental, gestão de resíduos industriais e proteção dos ecossistemas aquáticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (*Danio rerio*) adultos.

2.2 Objetivos específicos:

2.2.1 Avaliar os efeitos do fosfogesso sobre os parâmetros físico-químicos da água;

2.2.2 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (*Danio rerio*) adultos sobre o comportamento locomotor;

2.2.3 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (*Danio rerio*) adultos sobre o comportamento semelhante à ansiedade;

2.2.4 Avaliar o efeito da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso em peixes-zebra (*Danio rerio*) adultos sobre o comportamento social.

3 MÉTODOS

3.1 Aspectos éticos

O presente estudo foi realizado após aprovação do protocolo experimental pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro sob protocolo nº 23085.003364/2025-11 (Anexo I), aprovado em 23 de maio de 2025. Todos os procedimentos foram conduzidos em conformidade com a legislação brasileira vigente (Lei nº 11.794/2008 e Decreto nº 6.899/2009), além das diretrizes nacionais do CONCEA (2023) e das normas internacionais para pesquisa animal. Além disso, o estudo foi registrado no *Open Science Framework* (OSF) com o título: Effects of phosphogypsum on zebrafish (*Danio rerio*).

3.2 Fosfogesso

O fosfogesso utilizado neste estudo foi doado pela Mosaic Fertilizantes, unidade de Uberaba-MG (CNPJ: 61.156.501/0110-00), localizada na Avenida Filomena Cartafina, nº 22180, Uberaba-MG, Brasil. O material foi coletado a partir do acerto de carga destinado à pilha final de disposição a céu aberto. No laboratório, o fosfogesso foi armazenado em temperatura ambiente, local seco e protegido da luz direta. A composição elementar do lote utilizado não foi determinada individualmente neste estudo, portanto, não foi possível estabelecer a contribuição específica de constituintes individuais do fosfogesso para os efeitos observados. Essa característica deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que a composição do fosfogesso pode variar de acordo com sua origem e com as características do processo industrial de produção (IAEA, 2010; Rutherford; Dudas; Arocena, 1995).

Para determinar as concentrações de fosfogesso utilizadas nos experimentos, sua solubilidade foi inicialmente estimada por cálculo teórico e complementada por avaliação visual da presença de material não dissolvido. A solubilidade teórica do fosfogesso em água, à temperatura ambiente, foi estimada em 0,52 g/L, sendo definida a concentração máxima experimental de 0,4 g/L. A partir desse valor, foram estabelecidas três concentrações experimentais: 0,4 g/L, 0,1 g/L e 0,025 g/L, sendo as duas últimas obtidas por diluição seriada em fator de quatro.

Para o preparo das suspensões experimentais, foram pesadas as massas de fosfogesso correspondentes às concentrações desejadas para um volume final de 15 L de água. Para concentração 0,025 g/L, 0,1 g/L, 0,4 g/L foi pesado 0,375 g, 1,5 g e 6 g, respectivamente. O material previamente pesado foi transferido para um balão volumétrico de 1 L e preenchido com q.s.p. 1 L de água decolorada. Sendo posteriormente homogeneizadas em banho ultrassônico por 20 minutos. Após esse procedimento, 1 L da suspensão preparada foi adicionado aos aquários contendo previamente 14 L de água decolorada, totalizando 15 L nas concentrações finais de 0,025 g/L, 0,1 g/L e 0,4 g/L.

Para minimizar possíveis vieses experimentais, o preparo e a administração das suspensões de fosfogesso foram conduzidos de forma cega. Um pesquisador foi responsável pelo preparo das suspensões, um segundo realizou a codificação dos tratamentos e um terceiro, sem conhecimento da identidade dos grupos experimentais, realizou a adição das suspensões aos aquários. O cegamento foi mantido durante toda a exposição, incluindo as renovações semanais da exposição

prolongada, nas quais as soluções foram preparadas, codificadas e adicionadas seguindo o mesmo procedimento. Os códigos dos tratamentos somente foram revelados após a conclusão das exposições e das análises comportamentais.

Após a imersão do fosfogesso nos tanques experimentais, foram coletadas amostras de água da torneira, do grupo controle e das três concentrações de fosfogesso testadas para verificar possíveis alterações nos parâmetros físico-químicos da água. O pH, a turbidez, a condutividade e a dureza total foram medidos com o auxílio de um pHmetro, turbidímetro, condutivímetro e pela titulação complexométrica utilizando uma solução de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), respectivamente.

3.3 Animais

Neste estudo, foram utilizados 160 peixes-zebra selvagens (*Danio rerio*), adultos (> 3 meses de idade), com peso aproximado de 350 mg e comprimento entre 3 e 4 cm, adquiridos de um fornecedor comercial local (Alfa Peixes, Uberaba, Minas Gerais, Brasil, CNPJ: 07.151.071/0001-34). Devido à origem comercial dos animais, a idade exata e o sexo não foram determinados individualmente antes da distribuição experimental, sendo considerados possíveis fatores de variabilidade biológica. Para minimizar sua influência sobre os resultados, os animais foram distribuídos aleatoriamente entre os grupos experimentais. Os animais foram mantidos em tanques de 20 L (Figura 1) contendo água decolorada, com volume útil de 15 L por tanque, permitindo espaço adequado para manejo e filtragem, em densidade de 1,33 peixes/L.

Após a chegada ao laboratório, os animais foram aclimatados e passaram por um período mínimo de quarentena de três semanas. Todas as condições de manutenção seguiram as recomendações do Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), garantindo condições adequadas para a espécie (Brasil, 2023). A renovação total da água foi realizada semanalmente, exceto na exposição subaguda, onde os animais permaneceram no tratamento até o último teste, assim como na última semana da exposição prolongada. Após os testes comportamentais, os animais retornaram para o tanque exposição e permaneceram no mesmo até o dia do último teste. Foram mantidos os seguintes parâmetros físico-químicos: temperatura de 26 ± 1 °C, pH $7,0 \pm 0,3$ e amônia total <

0,01 mg/L, que são monitorados todos os dias. Os peixes permaneceram sob ciclo claro/escuro de 14:10 h e foram alimentados duas vezes ao dia com ração comercial em flocos (Poytara®, Brasil).

Durante todo o período experimental, a alimentação e o monitoramento dos parâmetros da água seguiram a rotina estabelecida pelo Laboratório de Zebrafish (ZebLab) da UFTM, citada anteriormente.

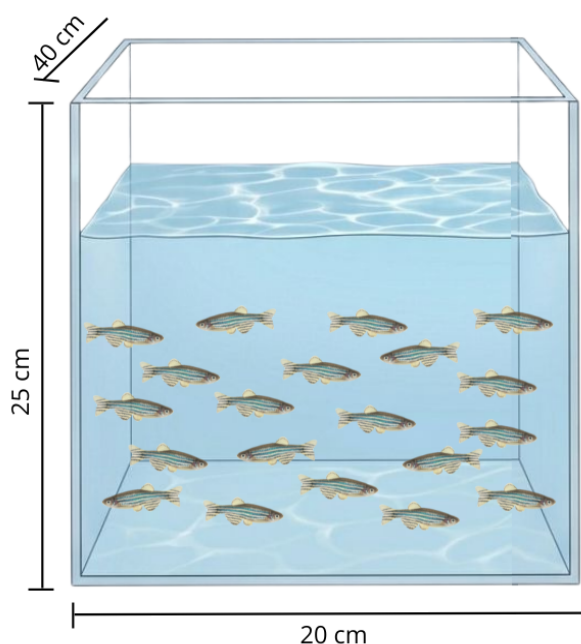


Figura 1. Tanque de alojamento. 20 animais foram mantidos em tanques de 20 L contendo água declorada, com volume útil de 15 L por tanque, permitindo espaço adequado para manejo e filtragem, em densidade de 1,33 peixes/L. Fonte: Autoria própria, 2026.

3.4 Procedimentos experimentais

O experimento foi conduzido a partir dos grupos experimentais: (1) controle; e fosfogesso (2) 0,025 g/L, (3) 0,1 g/L e (4) 0,4 g/L. Após o preparo dos tanques e a diluição do fosfogesso, os animais foram alocados individualmente de forma randomizada aos grupos experimentais em tanques estáticos com capacidade de 20 L preenchidos com um volume de 15 L por meio de uma sequência de números verdadeiramente aleatórios obtida por uma ferramenta online ([Random.org](https://www.random.org)).

Dois tempos de exposição ao fosfogesso foram avaliados em dois experimentos independentes. No experimento 1, o fosfogesso foi adicionado apenas no início da exposição e o tempo de exposição avaliado foi de 7 a 10 dias (exposição subaguda). No experimento 2, o fosfogesso foi adicionado aos tanques

dos grupos experimentais e toda a água dos tanques e as concentrações de fosfogesso foram renovadas a cada 7 dias (com exceção da última semana), e o tempo de exposição foi de 28 a 31 dias (exposição prolongada) (Figura 2).

Para minimizar possíveis vieses experimentais, o preparo, a administração das suspensões de fosfogesso e a análise dos dados comportamentais foram conduzidos de forma cega. Um pesquisador foi responsável pelo preparo das suspensões, um segundo realizou a codificação dos tratamentos e um terceiro, sem conhecimento da identidade dos grupos experimentais, realizou a adição das suspensões aos aquários.

O cegamento foi mantido durante todo o período de exposição, incluindo as renovações semanais no experimento de exposição prolongada, nas quais as soluções foram preparadas, codificadas e adicionadas seguindo o mesmo procedimento. Da mesma forma, as análises comportamentais foram realizadas sem conhecimento da identidade dos grupos experimentais, e os códigos dos tratamentos somente foram revelados após a conclusão das análises comportamentais e estatísticas.

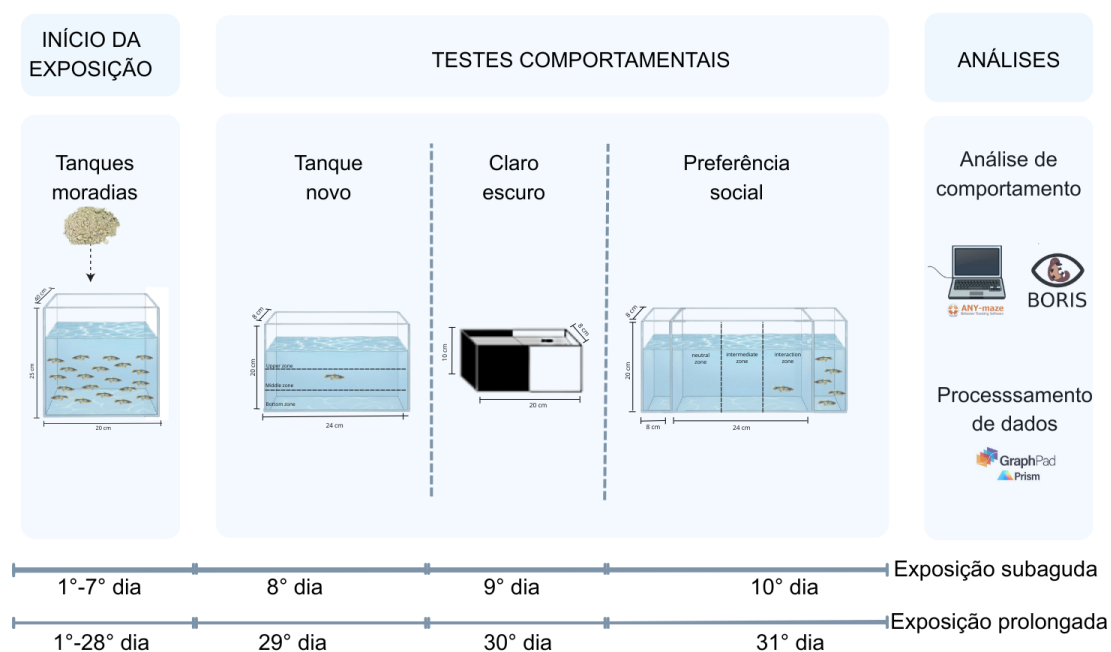


Figura 2. Desenho experimental da exposição subaguda e prolongada ao fosfogesso. 4 grupos: controle (1) e fosfogesso (0,025 g/L (2); 0,1 g/L (3) e 0,4 g/L (4). Expostos de forma subaguda (7 a 10 dias) e prolongada (28 a 31 dias). Teste de tanque novo realizado nos 8º e 29º dias de exposição. Teste claro/escuro realizado nos 9º e 30º dias de exposição. Teste de preferência social realizado no 10º e 31º dia de exposição. Após os testes comportamentais, os animais retornaram para o tanque exposição e permaneceram no mesmo até o dia do último teste. As análises de comportamento foram realizadas nos softwares ANY-maze® e BORIS®, e o processamento de dados foi realizado pelo software GraphPad Prism. Fonte: Autoria própria, 2026.

3.4.1 Análise dos parâmetros comportamentais

O comportamento dos animais foi registrado individualmente por meio de gravação em vídeo e, posteriormente, analisado utilizando os softwares ANY-maze® (Stoelting Co., USA) (Marcon *et al.*, 2019) e BORIS®. Ademais, todas as análises de dados foram realizadas de forma cega, sendo a decodificação efetuada apenas após a conclusão dessa etapa.

3.4.1.1 Teste de tanque novo

O teste de tanque novo foi realizado no 8º dia (exposição subaguda) e 29º dia (exposição prolongada) para a análise do comportamento semelhante à ansiedade e do comportamento locomotor. O teste é baseado na geotaxia, comportamento o qual o peixe-zebra apresenta um comportamento inato de cautela quando é colocado em um ambiente desconhecido. Permanecer inicialmente na região inferior reduz sua exposição a possíveis predadores e representa uma estratégia natural de proteção. Conforme percebe que o ambiente não oferece risco, passa a explorar as regiões superiores. Por isso, quanto mais rapidamente ele explora o tanque, menor tende a ser a resposta de ansiedade (Maximino *et al.*, 2010; Levin *et al.*, 2007).

O aparato utilizado consistiu em um tanque de teste com medidas de 24 × 8 × 20 cm, contendo nível de água de 15 cm (2,7 L úteis) (Figura 3), onde os animais foram colocados individualmente e tiveram seu comportamento registrado, individualmente, por um período de 7 minutos, sendo o primeiro minuto para aclimação do animal ao aparato e os outros 6 minutos para avaliação dos parâmetros. A análise dos vídeos foi realizada no software ANY-maze®, onde o tanque foi dividido virtualmente em três áreas horizontais iguais (superior, intermediária e inferior) e os seguintes parâmetros foram avaliados: distância percorrida, cruzamentos, tempo de permanência nas zonas inferior e superior do tanque (Marcon *et al.*, 2019).

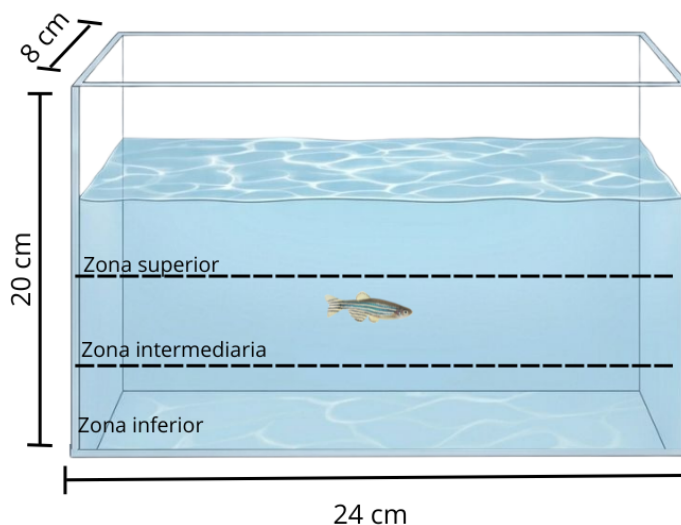


Figura 3 - Tanque do teste de tanque novo. Fonte: Autoria própria, 2026.

3.4.1.2 Teste claro/escuro

O teste claro/escuro foi realizado no 9º dia (exposição subaguda) e no 30º dia (exposição prolongada) para avaliar o comportamento semelhante à ansiedade e o comportamento locomotor. O teste tem como base a escototaxia, que é a preferência natural do peixe-zebra por ambientes escuros, considerados mais seguros contra predadores. O aquário é dividido em compartimentos claro e escuro, permitindo a livre movimentação do animal entre eles. Em condições normais, após um período de adaptação, o peixe explora ambos os compartimentos. No entanto, um aumento do comportamento do tipo ansioso é caracterizado por maior permanência na região escura, menor tempo na região clara e redução das transições entre os compartimentos (Maximino *et al.*, 2010; Stewart *et al.* 2012).

O aparato utilizado consistiu em um tanque com medidas de 20 × 8 × 10 cm , contendo nível de água de 600 ml (Figura 4). A metade do tanque estava com as paredes externas revestidas com papel vinílico autocolante preto e a outra metade com papel vinílico autocolante branco. Os tanques foram tampados para evitar possíveis fugas do tanque de teste durante as filmagens.

O comportamento dos animais foi registrado, individualmente, por um período de 6 minutos, sendo o primeiro minuto para aclimação e os outros 5 minutos para avaliação dos parâmetros. Com o auxílio do software BORIS®, os parâmetros avaliados foram: tempo de permanência no compartimento claro e o

número de cruzamentos entre os compartimentos claro e escuro (Maximino *et al.*, 2010).

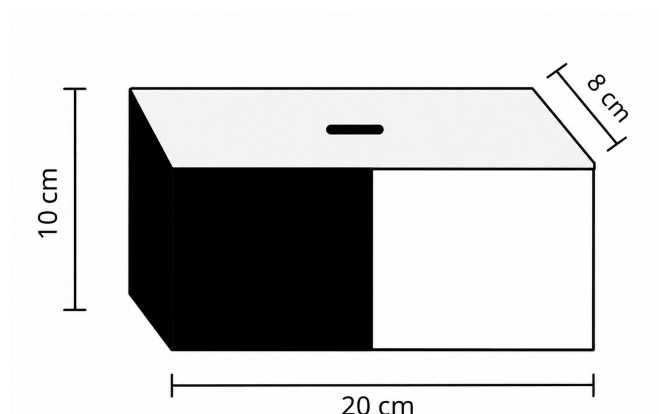


Figura 4. Tanque do teste de claro/escuro. Fonte: Gerada por IA, 2026.

3.4.1.3 Teste de preferência social

O teste de preferência social foi realizado no 10º dia (exposição subaguda) e no dia 31º dia (exposição prolongada) para a avaliação do comportamento de preferência social. O teste se baseia no comportamento naturalmente gregário do zebrafish, que tende a formar cardumes. Avalia a preferência do animal por permanecer próximo a um grupo de coespecíficos em comparação com uma área neutra. Quanto maior o tempo na zona de interação, maior a sociabilidade; a diminuição desse tempo pode indicar déficits no comportamento social (Gerlai, 2014).

O aparato experimental consistiu em um tanque central de teste, com dimensões de 24 × 8 × 20 cm, contendo nível de água de 15 cm (2,7 L úteis) (Figura 5). Em ambas as extremidades do tanque de teste foram posicionados tanques menores com dimensões de 8 × 8 × 20 cm e com o mesmo nível de água do tanque central. Em um dos compartimentos foram adicionados cinco coespecíficos, caracterizando a zona de interação (tanque estímulo), enquanto o compartimento oposto foi preenchido apenas com água, correspondendo à zona neutra.

O comportamento dos animais foi registrado, individualmente, durante 7 minutos, sendo os 2 primeiros destinados à aclimação e os 5 minutos seguintes à avaliação comportamental. Foram analisados os seguintes parâmetros: distância

percorrida, número de cruzamentos, tempo de permanência na zona de interação e tempo de permanência na zona neutra. Durante a análise dos vídeos no software ANY-maze, o tanque de teste foi virtualmente dividido em três áreas verticais iguais: interação, intermediária e neutra (Benvenuti *et al.*, 2021).

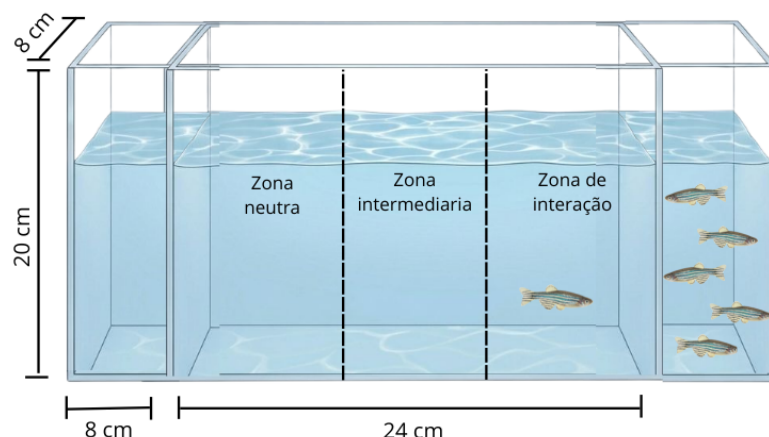


Figura 5. Aparato utilizado no teste de preferência social. Fonte: Autoria própria, 2026.

3.5 Análise estatística

3.5.1 Cálculo amostral

O tamanho da amostra foi definido com base em estudos anteriores e confirmado por meio de um cálculo a priori do tamanho da amostra. Esse cálculo foi realizado utilizando o software G*Power (versão 3.1.9.2; Franz Faul, Universidade de Kiel, Alemanha) com base nos seguintes parâmetros: probabilidade de erro tipo I (α) = 0,05, poder estatístico ($1-\beta$) = 0,8 e um tamanho de efeito grande ($f = 0,4$). A amostra total do estudo compreende 160 peixes-zebra adultos.

3.5.2 Avaliação da normalidade e escolha dos testes estatísticos

A normalidade foi avaliada utilizando os testes de Kolmogorov-Smirnov e D'Agostino & Pearson. Dependendo da distribuição, os dados foram analisados utilizando um teste paramétrico (ANOVA de uma via) ou um teste não paramétrico (Kruskal-Wallis). Os dados foram apresentados como média $\pm$ desvio padrão para dados paramétricos e como mediana com intervalo interquartil para dados não

paramétricos. Comparações *post-hoc* foram realizadas utilizando os testes de Tukey para dados paramétricos ou o *post-hoc* de Dunn para dados não paramétricos.

Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o GraphPad Prism 10.1.0. Houve exclusão dos animais apenas para morte. Animais foram considerados outliers apenas para o teste de claro/escuro em que alguns tiveram congelamento (*freezing*) > 50% do tempo total do teste. Adicionalmente, todas as análises de dados foram realizadas de forma cega, sendo a decodificação efetuada apenas após a conclusão dessa etapa.

4 RESULTADOS

4.1 Parâmetros físico-químicos da água de exposição

Os parâmetros físico-químicos da água de exposição foram alterados de acordo com o aumento da concentração de fosfogesso (Tabela 1). Foi observada uma redução no pH dependente da concentração de fosfogesso utilizada, com diminuição de 7,44 no grupo controle para 6,77 (9,0%) na concentração mais alta (0,4 g/L). Em contraste, a condutividade aumentou progressivamente com a adição das concentrações de fosfogesso, variando de 74,9 μ S no controle para 203 μ S (171,0%) na maior concentração testada. A dureza da água também apresentou aumento marcante e concentração-dependente, passando de 480 mg/L no controle para 2.460 mg/L (412,5%) em 0,4 g/L. De forma semelhante, a turbidez elevou-se entre os grupos expostos, atingindo 6,83 NTU na maior concentração, em comparação com 0,04 NTU no controle (16.975 %). Em contrapartida, a temperatura manteve-se relativamente estável entre os tratamentos, apresentando apenas pequenas variações ao longo das condições experimentais. Apesar das mudanças nos parâmetros físico-químicos da água, o bem-estar dos animais foi avaliado com base no Guia Brasileiro de Produção, Manutenção ou Utilização de Animais para Atividades de Ensino ou Pesquisa Científica (BRASIL, 2023), considerando indicadores como mudança de coloração, que pode refletir estresse fisiológico ou resposta a estímulos ambientais, anormalidades morfológicas em brânquias, olhos ou nadadeiras, e alterações comportamentais, como nado incomum, letargia ou imobilidade. Visualmente nenhuma dessas mudanças foi observada, assim como não houve mortes.

Tabela 1. Resultado da avaliação dos parâmetros de água da exposição.

PARÂMETROS	AMOSTRAS				
	Torneira	Controle	0,025 g/L	0,1 g/L	0,4 g/L
pH	7,84	7,44	7,26	7,13	6,77
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	67,5	74,9	73,3	107,7	203
Dureza (mg/L de CaCO_3)	540	480	740	940	2.460
Turbidez (NTU)	0,04	0,04	0,73	0,83	6,83
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	24,1	23,8	23,4	24	23,6

$\mu\text{S}/\text{cm}$: microsiemens por centímetro; mg/L de CaCO_3 : miligramas de carbonato de cálcio por litro; NTU: unidade nefelométrica de turbidez; $^{\circ}\text{C}$: grau celsius.

4.2 Comportamento

4.2.1 Resultados comportamentais após exposição subaguda

4.2.1.1 Teste de tanque novo

A Figura 6 mostra os resultados do teste comportamental do tanque novo após o protocolo de exposição de subaguda ao fosfogesso. Os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicam que não houve efeito significativo nos parâmetros analisados.

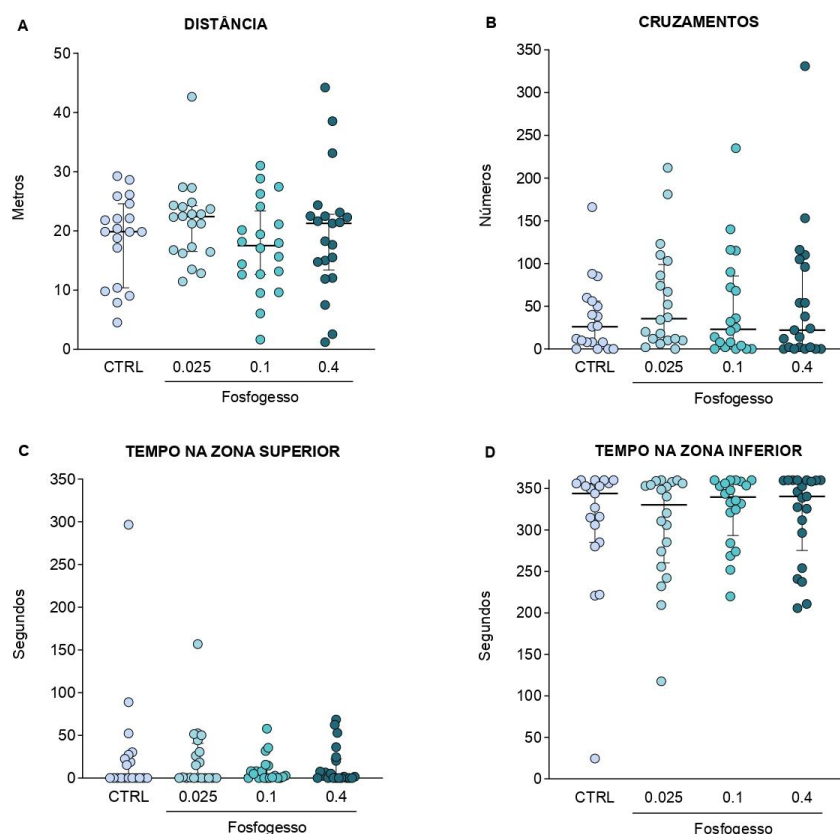


Figura 6. Efeito da exposição subaguda ao fosfogesso no teste de tanque novo. Os dados foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis e são apresentados como medianas $\pm$ intervalo interquartil. $n = 20$, exceto para controle ($n = 19$) e fosfogesso 0,4 g/L ($n = 21$).

4.2.1.2 Teste de claro/escuro

A Figura 7 apresenta os resultados do teste claro/escuro após o protocolo de exposição de subaguda ao fosfogesso. A análise da ANOVA indicou efeito significativo no número de cruzamentos ($F_{3,76} = 4,592$; $p = 0,0052$). As análises *post-hoc* revelaram aumento significativo no número de cruzamentos no grupo exposto à concentração de 0,1 g/L de fosfogesso em comparação aos grupos expostos às concentrações de 0,025 g/L ($p < 0,05$) e 0,4 g/L ($p < 0,01$) (Figura 7A). Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre os grupos expostos ao fosfogesso e o grupo controle para esse parâmetro. Além disso, o teste de Kruskal-Wallis demonstrou efeito significativo no tempo de permanência na zona clara ($H = 12,59$; $p = 0,0056$). As análises *post-hoc* evidenciaram que os animais expostos às concentrações de 0,025 g/L ($p < 0,01$) e 0,4 g/L ($p < 0,05$) de fosfogesso permaneceram menos tempo na zona clara em comparação ao grupo controle (Figura 7B).

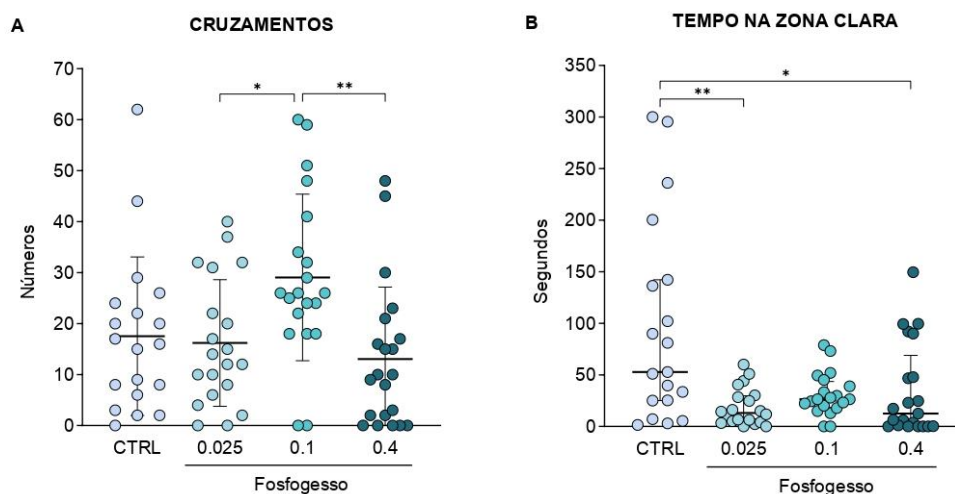


Figura 7. Efeito da exposição subaguda ao fosfogesso no teste claro/escuro. Os dados de cruzamentos foram analisados através da análise de variância (ANOVA) de uma via seguida pelo teste *post-hoc* de Tukey e são apresentados por média $\pm$ desvio padrão. Os dados de tempo na zona clara foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste *post-hoc* de Dunn e são apresentados como medianas $\pm$ intervalo interquartil. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$. $n = 20$, exceto para controle ($n = 19$) e fosfogesso 0,4 g/L ($n = 21$).

4.2.1.3 Teste de preferência social

A Figura 8 apresenta os resultados do teste de preferência social após o protocolo de exposição subaguda ao fosfogesso. O teste de Kruskal–Wallis indicou que não houve efeito significativo na distância percorrida ($H = 1,521$; $p = 0,6775$) (Figura 8A), entretanto, houve um efeito significativo no número de cruzamentos entre os grupos ($H = 20,81$; $p = 0,0001$). As análises *post-hoc* revelaram que o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L de fosfogesso apresentou maior número de cruzamentos em comparação aos grupos expostos às concentrações de 0,025 g/L e 0,1 g/L ($p < 0,001$) (Figura 8B).

Adicionalmente, o teste de Kruskal–Wallis demonstrou efeito significativo no tempo de permanência na zona de interação ($H = 48,05$; $p < 0,0001$). As análises *post-hoc* evidenciaram que o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L de fosfogesso permaneceu menos tempo na zona de interação em comparação ao grupo controle ($p < 0,001$) e aos grupos expostos às concentrações de 0,025 g/L e 0,1 g/L ($p < 0,0001$) (Figura 8C). Da mesma forma, foi observado efeito significativo no tempo de permanência na zona neutra ($H = 47,34$; $p < 0,0001$), onde o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L permaneceu mais tempo nessa zona em

comparação ao grupo controle e aos grupos expostos às concentrações de 0,025 g/L e 0,1 g/L ($p < 0,0001$) (Figura 8D).

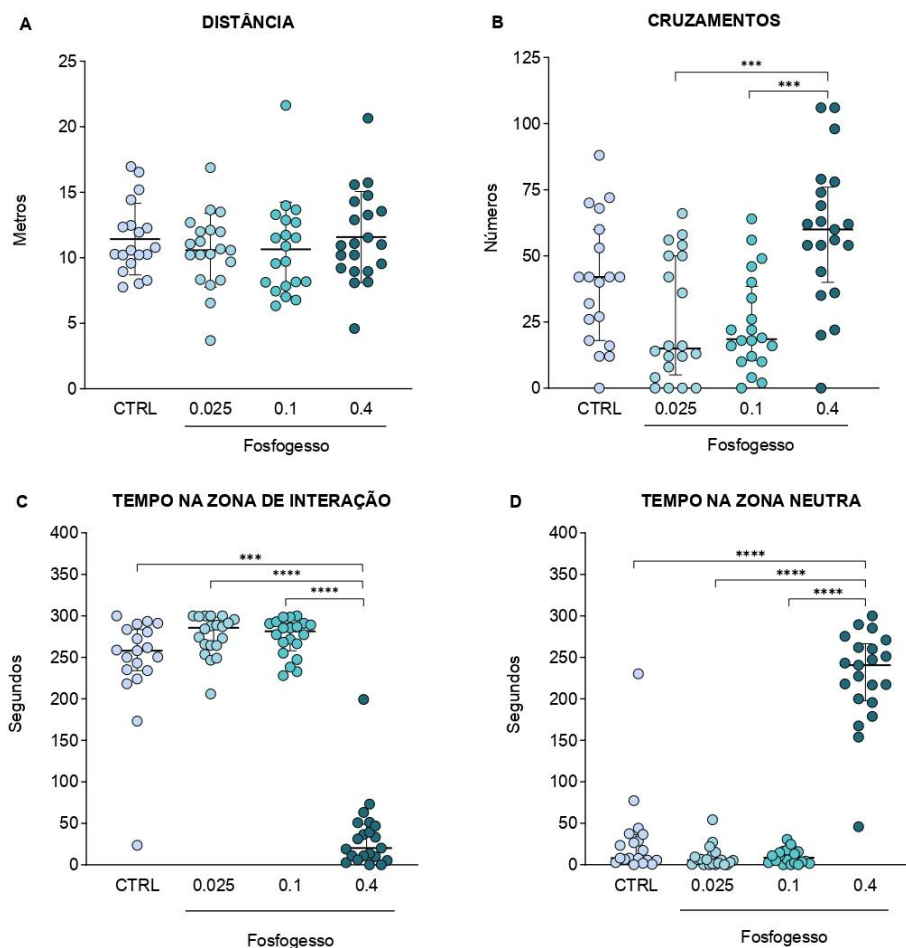


Figura 8. Efeito da exposição subaguda ao fosfogesso no teste de preferência social. Os dados foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste *post-hoc* de Dunn e são apresentados como medianas $\pm$ intervalo interquartil, exceto para a distância, que foi analisada através da análise de variância (ANOVA) de uma via seguida pelo teste *post-hoc* de Tukey, e são apresentados como média $\pm$ desvio padrão. *** $p < 0,001$, **** $p < 0,0001$. $n = 20$, exceto para controle ($n = 19$) e fosfogesso 0,4 g/L ($n = 21$).

Complementarmente às análises quantitativas, as trajetórias representativas de nado de um animal de cada grupo ilustram qualitativamente o padrão de exploração espacial no aparato (Figura 9). Observa-se que os grupos controle, 0,025 g/L e 0,1 g/L apresentam trajetórias predominantemente concentradas na zona de interação. Já o grupo exposto a 0,4 g/L apresenta maior permanência na zona neutra.

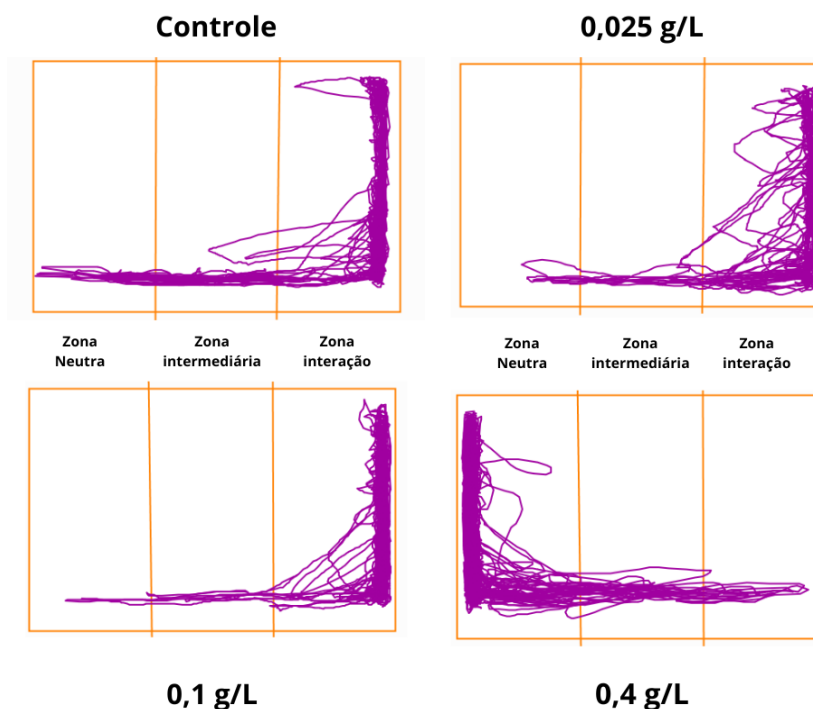


Figura 9. Trajetórias representativas de natação (mapas de rastreio) obtidas no teste de preferência social após a exposição subaguda ao fosfogesso. A imagem ilustra o padrão de exploração espacial de um animal representante de cada grupo experimental, evidenciando a distribuição de nado entre as zonas neutra, intermediária e de interação. Fonte: any-maze.

4.2.2 Resultados comportamentais após exposição prolongada

4.2.2.1 Teste de tanque novo

A Figura 10 apresenta os resultados do teste do tanque novo após o protocolo de exposição prolongada ao fosfogesso. O teste de Kruskal–Wallis revelou efeito significativo na distância percorrida ($H = 19,88$; $p = 0,0002$). As análises *post-hoc* revelaram que o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L de fosfogesso apresentou aumento na distância percorrida em comparação ao grupo exposto à concentração de 0,025 g/L de fosfogesso ($p < 0,0001$) (Figura 10A). Além disso, a análise da ANOVA demonstrou efeito significativo no número de cruzamentos ($F_{3,75} = 5,274$; $p = 0,0024$). As análises *post-hoc* evidenciaram que o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L apresentou maior número de cruzamentos em comparação ao grupo controle e ao grupo exposto à concentração de 0,025 g/L ($p < 0,01$) (Figura 10B).

Em relação ao tempo de permanência na zona superior, a análise por ANOVA revelou efeito significativo ($F_{3,75} = 8,598$; $p < 0,0001$), e os animais expostos à

concentração de 0,025 g/L de fosfogesso permaneceram mais tempo na zona superior do tanque em comparação ao grupo controle e ao grupo exposto à concentração de 0,4 g/L ($p < 0,001$) (Figura 10C). Ademais, o teste de Kruskal–Wallis demonstrou efeito significativo no tempo de permanência na zona inferior ($H = 2,13$; $p < 0,0001$). As análises *post-hoc* mostraram redução no tempo de permanência na zona inferior no grupo exposto à concentração de 0,025 g/L em comparação ao grupo controle ($p < 0,0001$) e ao grupo exposto à concentração de 0,4 g/L ($p < 0,001$) (Figura 10D).

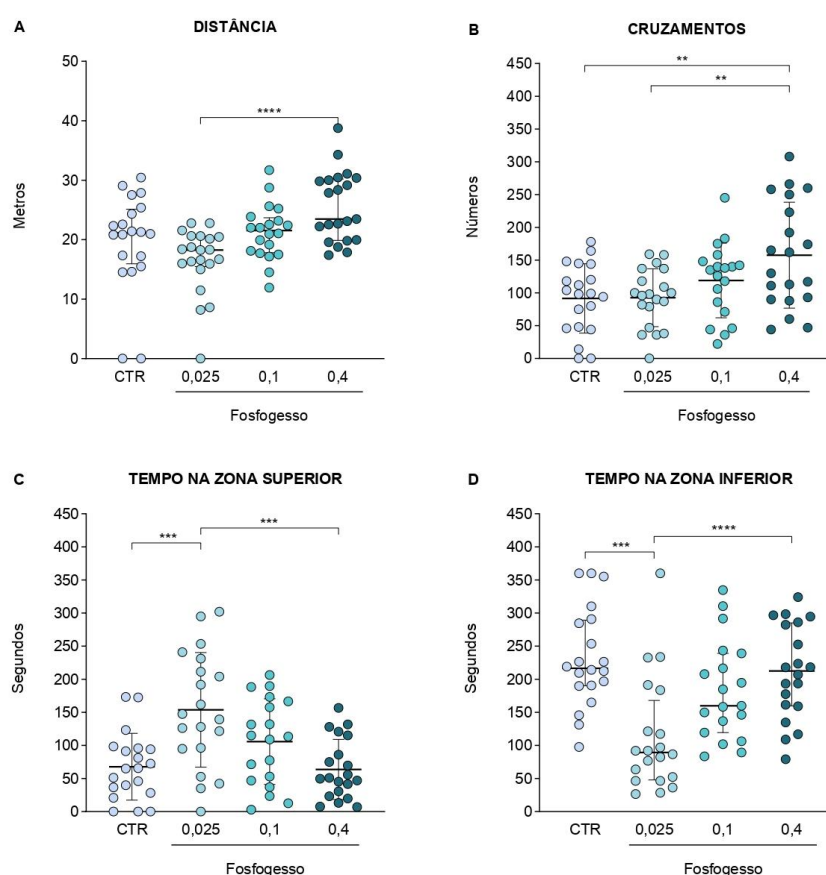


Figura 10. Efeito da exposição prolongada ao fosfogesso no teste de tanque novo. Os dados foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste *post-hoc* de Dunn e são apresentados como medianas $\pm$ intervalo interquartil, exceto para cruzamentos e tempo na zona superior, que foram analisados através da análise de variância (ANOVA) de uma via seguida pelo teste *post-hoc* de Tukey e são apresentados como média $\pm$ desvio padrão. ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, **** $p < 0,0001$. $n = 20$, exceto para fosfogesso 0,025 g/L ($n = 19$).

Complementarmente às análises quantitativas, os mapas de calor ilustram qualitativamente o padrão de distribuição espacial e a densidade de ocupação da média dos animais de cada grupo no tanque (Figura 11). Observa-se maior densidade de ocupação na região superior do tanque no grupo exposto a 0,025 g/L.

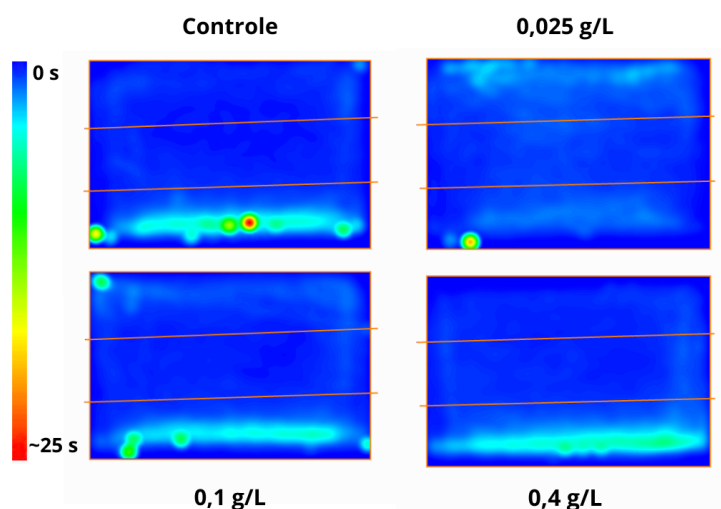


Figura 11. Mapas de calor da densidade de ocupação no teste de tanque novo após a exposição prolongada ao fosfogesso. A representação visual ilustra a distribuição espacial e o tempo de permanência média de cada grupo experimental (Controle, 0,025 g/L, 0,1 g/L e 0,4 g/L). A escala de cores indica a densidade de presença no aparato, onde cores mais quentes (tendendo ao vermelho) representam áreas de maior permanência (~25 s), enquanto as mais frias (tendendo ao azul) representam áreas de menor permanência (~0 s). Fonte: any-maze.

4.2.2.2 Teste de claro/escuro

A Figura 12 apresenta os resultados do teste claro/escuro após o protocolo de exposição prolongada ao fosfogesso. A análise por ANOVA revelou efeito significativo no número de cruzamentos ($F_{3,74} = 3,357$; $p = 0,0233$). As análises *post-hoc* evidenciaram que o grupo exposto à concentração de 0,4 g/L de fosfogesso apresentou maior número de cruzamentos em comparação ao grupo controle ($p < 0,05$) (Figura 12A). Entretanto, os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicam que não houve efeito significativo em relação ao tempo de permanência na zona clara (Figura 12B).

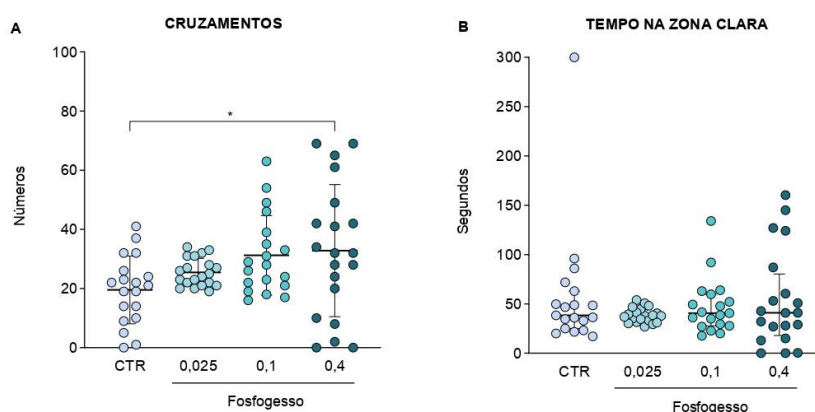


Figura 12. Efeito da exposição prolongada ao fosfogesso no teste de claro/escuro. Os dados de cruzamentos foram analisados através da análise de variância (ANOVA) de uma via seguida pelo teste *post-hoc* de Tukey e são apresentados por média $\pm$ desvio padrão. Os dados de tempo na zona clara foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis e são apresentados como medianas $\pm$ intervalo interquartil. * $p < 0,05$. $n = 20$, exceto fosfogesso 0,025 g/L e 0,4 g/L, $n = 19$.

4.2.2.3 Teste de preferência social

A Figura 13 apresenta os resultados do teste de preferência social após o protocolo de exposição prolongada ao fosfogesso. A análise da ANOVA revelou que não houve efeito significativo entre os parâmetros analisados.

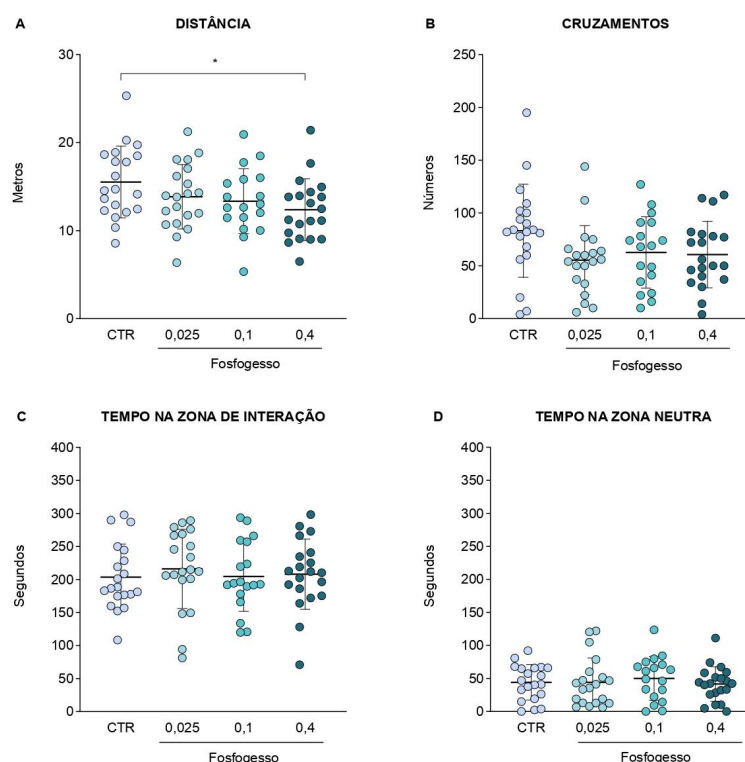


Figura 13. Efeito da exposição prolongada ao fosfogesso no teste de preferência social. Os dados foram analisados através da análise de variância (ANOVA) de uma via e são apresentados por média $\pm$ desvio padrão. $n = 20$, exceto para fosfogesso 0,025 g/L ($n = 18$).

5 DISCUSSÃO

Neste estudo, os resultados obtidos demonstraram que os efeitos da exposição ao fosfogesso sobre parâmetros físico-químicos da água e sobre o comportamento do peixe-zebra. De maneira geral, a exposição ao resíduo promoveu a redução do pH e o aumento da condutividade, dureza e turbidez da água de forma concentração-dependente. Nos ensaios comportamentais, a exposição subaguda ao fosfogesso induziu respostas compatíveis com comportamento semelhante à ansiedade no teste claro/escuro e prejuízo na preferência social no teste de preferência social. Por outro lado, a exposição prolongada ao fosfogesso induziu comportamento semelhante à ansiedade no teste de tanque novo e alterações na locomoção nos testes claro/escuro.

5.1 Fosfogesso induz alterações físico-químicas na água

Os parâmetros físico-químicos da água foram modificados de forma concentração-dependente pela adição de fosfogesso, evidenciando alterações nas características do meio experimental. Observou-se redução gradual do pH, aumento da condutividade elétrica, da dureza e da turbidez, enquanto a temperatura permaneceu estável entre os tratamentos. Apesar da diminuição observada, os valores de pH permaneceram dentro da faixa estabelecida pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces destinadas à proteção da vida aquática (pH entre 6,0 e 9,0). Da mesma forma, os valores de turbidez registrados, mesmo na maior concentração testada (6,83 NTU), permaneceram inferiores ao limite de 100 NTU estabelecido para águas doces de Classe 2.

Além dessas alterações, a exposição ao fosfogesso promoveu um aumento expressivo da dureza e da condutividade elétrica da água (412,5% e 171%), indicando maior concentração de íons dissolvidos provenientes do material adicionado. Esse comportamento é esperado devido à composição química do fosfogesso, constituído predominantemente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), além de impurezas contendo fluoretos, fosfatos, metais-traço e radionuclídeos naturais, que podem ser liberados para o meio aquático (Saadaoui *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2022). Embora a Resolução CONAMA nº 357/2005 não

estabeleça limites específicos para dureza e condutividade, esses parâmetros são amplamente utilizados como indicadores da composição iônica e da qualidade da água, refletindo alterações na mineralização e na disponibilidade de sais dissolvidos, fatores capazes de influenciar a fisiologia dos organismos aquáticos (APHA, 2023; Boyd & Tucker, 1998). Assim, os resultados demonstram que a presença do fosfogesso foi capaz de modificar significativamente as características físico-químicas da água de exposição, especialmente em relação à mineralização do meio, representada pelo aumento da dureza e da condutividade.

O aumento da dureza (412,5%) observado na maior concentração (2.460 mg/L de CaCO_3) caracteriza uma condição de água extremamente dura, muito superior aos valores normalmente encontrados em ecossistemas naturais de água doce (Boyd & Tucker, 1998). De forma semelhante, o aumento da condutividade (171%) sugere maior disponibilidade de íons dissolvidos, alterando o equilíbrio osmótico e podendo interferir nos processos fisiológicos dos peixes, como os mecanismos de osmorregulação e trocas iônicas pelas brânquias (Evans *et al.*, 2005). Além disso, estudos recentes demonstram que o lixiviado de fosfogesso promove alterações significativas na composição da água e desencadeia efeitos tóxicos em peixes-zebra, incluindo estresse oxidativo, danos histopatológicos e genotoxicidade, indicando que as modificações físico-químicas do meio podem contribuir para a resposta biológica dos organismos expostos (Wang *et al.*, 2025). Dessa forma, além da presença de possíveis contaminantes associados ao fosfogesso, as próprias alterações físico-químicas da água devem ser consideradas na interpretação dos efeitos observados nos organismos expostos.

As modificações observadas na qualidade da água podem ter contribuído para os efeitos biológicos registrados, uma vez que alterações no pH, na dureza e na composição iônica influenciam a biodisponibilidade e a toxicidade de contaminantes presentes em matrizes complexas, como o fosfogesso (Newman, 2019; APHA, 2023). Esse resíduo contém metais potencialmente tóxicos, como arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb) e manganês (Mn) (Akfas *et al.*, 2024), capazes de se bioacumular nos tecidos dos peixes e desencadear processos de estresse oxidativo. Metais não essenciais, como Cd, Pb e As, são particularmente nocivos por favorecerem a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e comprometerem o sistema antioxidante por meio da interação com grupos tiol ($-\text{SH}$), contribuindo para danos celulares em órgãos como fígado, rins e cérebro. Esses

mecanismos podem resultar em alterações metabólicas, neurológicas e comportamentais, comprometendo a homeostase dos organismos aquáticos (Sevcikova *et al.*, 2011; Valko *et al.*, 2005).

Nesse sentido, a resposta biológica à exposição ao fosfogesso não deve ser interpretada exclusivamente a partir de sua concentração nominal, mas também considerando a fração de seus constituintes efetivamente disponível para absorção pelos organismos (Campbell, 1995; Playle, 1998). A redução do pH observada após a adição do fosfogesso pode modificar a especiação química e, conseqüentemente, alterar sua biodisponibilidade (Wood *et al.*, 2012). Da mesma forma, a elevação da dureza e as mudanças na composição iônica podem interferir na interação entre íons metálicos e superfícies biológicas, particularmente nas brânquias, influenciando processos de absorção e toxicidade (Paquin *et al.*, 2002; Niyogi & Wood, 2004). Assim, as modificações na qualidade da água identificadas no presente estudo podem representar não apenas conseqüências da presença do fosfogesso, mas também fatores capazes de modular a exposição interna aos seus constituintes, estabelecendo uma possível relação entre as alterações ambientais e as respostas comportamentais observadas.

5.2 Exposição de subaguda ao fosfogesso

No teste de tanque novo, não houve diferenças significativas no comportamento dos peixes-zebra expostos ao fosfogesso. Essa ausência de alterações pode estar relacionada à influência de diferentes fatores endógenos e exógenos, capazes de modular a resposta dos animais frente ao ambiente experimental. Entre os fatores endógenos, destacam-se a variabilidade individual, diferenças fisiológicas e mecanismos adaptativos ao estresse. Paralelamente, fatores exógenos, como condições ambientais, manejo experimental, luminosidade, ruídos e até mesmo a sensibilidade do próprio teste comportamental, podem interferir nos parâmetros avaliados (Kalueff, A. V. *et al.* 2013; Stewart *et al.*, 2014; Ogi *et al.*, 2021).

No teste claro/escuro, a redução do tempo na zona clara dos grupos expostos a 0,025 g/L e 0,4 g/L sugere comportamento semelhante à ansiedade induzida pelo fosfogesso. Esse padrão está associado à escototaxia, uma resposta natural do peixe-zebra na qual ambientes escuros são percebidos como locais mais seguros

em situações de estresse (Maximino *et al.*, 2010; Stewart *et al.*, 2011). Além disso, alterações oxidativas e possíveis danos neuroquímicos provocados pelos metais presentes no resíduo podem afetar neurotransmissores envolvidos na modulação emocional e exploratória (Zahran *et al.*, 2025), contribuindo para o fenótipo observado.

Em contrapartida, o grupo exposto à concentração intermediária de 0,1 g/L não apresentou essa mesma redução no tempo na área clara. Esse fenômeno pode estar relacionado a uma curva dose-resposta em formato de U, conhecida como hormese, na qual concentrações mais baixas e mais altas causam efeitos evidentes, enquanto concentrações intermediárias provocam respostas atenuadas ou semelhantes ao controle. Esse tipo de perfil já foi descrito em estudos toxicológicos e costuma ocorrer devido à ativação de mecanismos de compensação ou adaptação do organismo frente à exposição inicial ao contaminante (Calabrese e Baldwin, 2001).

Já no teste de preferência social, os peixes expostos à maior concentração (0,4 g/L) apresentaram menor permanência na zona de interação e maior tempo na zona neutra, indicando um prejuízo no comportamento social. Como o peixe-zebra apresenta hábitos naturalmente gregários (Brasil, 2023), a redução da preferência social sugere um comprometimento neurocomportamental. O aumento dos cruzamentos do grupo 0,4 g/L em comparação com as concentrações de 0,025 g/L e 0,1 g/L também pode refletir agitação locomotora ou comportamento de fuga frente ao estímulo social. Essas alterações podem estar relacionadas à neurotoxicidade induzida pelos componentes do fosfogesso, uma vez que o estresse oxidativo e os danos ao sistema nervoso central podem interferir diretamente na sociabilidade, locomoção e percepção ambiental dos organismos (Zahran *et al.*, 2025).

5.3 Exposição prolongada ao fosfogesso

Após a exposição prolongada, no teste de tanque novo, os animais expostos à concentração de 0,4 g/L apresentaram aumento da distância percorrida e maior número de cruzamentos, indicando hiperatividade locomotora e um possível estado de agitação induzido pela exposição prolongada. Alterações locomotoras desse tipo são frequentemente associadas à neurotoxicidade causada por contaminantes ambientais, especialmente metais capazes de interferir em neurotransmissores

relacionados ao controle motor e à resposta ao estresse (Jaishankar *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2024). O aumento da atividade exploratória também pode refletir um comportamento de fuga ou tentativa de adaptação frente às condições adversas (Egan *et al.*, 2009). Por outro lado, o grupo exposto a 0,025 g/L apresentou um aumento significativo no tempo de permanência na zona superior do tanque novo, o que se associa a um efeito do tipo ansiolítico. Essa resposta, restrita à menor concentração, sugere uma curva dose-resposta em formato de U, indicando que o resíduo induz efeitos neurocomportamentais distintos a depender do nível de exposição (Calabrese e Baldwin, 2001).

No teste claro/escuro, o aumento do número de cruzamentos observado no grupo 0,4 g/L reforça a hipótese de hiperatividade locomotora induzida pelo estresse ou por alterações neurotóxicas associadas à exposição prolongada. Já o teste de preferência social não revelou diferenças significativas entre os parâmetros analisados. Em conjunto, os resultados da exposição prolongada sugerem que os efeitos do fosfogesso são dependentes da concentração. Enquanto a maior concentração (0,4 g/L) promoveu aumento da atividade locomotora, sugerindo alterações neurocomportamentais associadas à exposição prolongada, a menor concentração (0,025 g/L) esteve relacionada a um comportamento compatível com redução da ansiedade. Por outro lado, a ausência de alterações no teste de preferência social sugere que os efeitos do fosfogesso foram mais evidentes sobre parâmetros locomotores e emocionais do que sobre a sociabilidade. Esses achados reforçam a ocorrência de respostas neurocomportamentais distintas em função da concentração de exposição (Jaishankar *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2024).

5.4 Fosfogesso induz alterações comportamentais dependentes do tempo de exposição

Os resultados demonstram que os efeitos do fosfogesso em peixe-zebra variam substancialmente conforme o tempo de exposição. A exposição subaguda promoveu predominantemente respostas relacionadas à ansiedade e ao prejuízo da preferência social, evidenciadas pela redução da exploração da zona clara no teste claro/escuro e pela diminuição da sociabilidade (Maximino *et al.*, 2010). Por outro lado, a exposição prolongada desencadeou alterações locomotoras e exploratórias mais pronunciadas nas concentrações altas, caracterizadas por hiperatividade e

mudanças no padrão de exploração do ambiente, exceto para o grupo de 0,025 g/L, que manifestou um efeito ansiolítico.

Essa diferença entre os períodos de exposição sugere uma transição no fenótipo comportamental induzido pelo fosfogesso. Na exposição subaguda, predominaram respostas defensivas compatíveis com um estado de estresse agudo, refletidas principalmente pelo aumento do comportamento tipo ansioso no teste claro/escuro e pelo prejuízo da preferência social na concentração de 0,4 g/L. Após a exposição prolongada, entretanto, o perfil comportamental tornou-se distinto, sendo marcado principalmente por alterações locomotoras e exploratórias, como a hiperatividade observada na maior concentração.

Esses achados sugerem que a exposição contínua ao fosfogesso pode, inicialmente, induzir respostas defensivas e de estresse, evoluindo posteriormente para alterações neurocomportamentais mais complexas que podem estar relacionadas tanto à adaptação fisiológica dos animais ao ambiente contaminado, considerando a elevada plasticidade fenotípica apresentada pelos peixes frente a diferentes estressores ambientais (Abdelnour *et al.*, 2024), quanto ao comprometimento progressivo do sistema nervoso decorrente da bioacumulação de contaminantes metálicos (Zahran *et al.*, 2025).

Um aspecto interessante foi a resposta da preferência social ao longo do tempo. Embora a concentração de 0,4 g/L tenha reduzido significativamente a sociabilidade após a exposição subaguda, esse efeito não foi observado após a exposição prolongada. Esse resultado pode refletir uma adaptação fisiológica dos animais ou, alternativamente, a hiperatividade locomotora observada no período prolongado pode ter alterado o padrão de exploração do aparato experimental, reduzindo a sensibilidade do teste para detectar alterações específicas na interação social.

Além disso, a menor concentração (0,025 g/L) apresentou respostas opostas dependendo do tempo de exposição. Enquanto após a exposição subagudas promoveu comportamento semelhante à ansiedade no teste claro/escuro, a exposição prolongada induziu um perfil compatível com efeito tipo ansiolítico no teste do tanque novo. Esses resultados reforçam que a duração da exposição pode ser tão determinante quanto a concentração para definir a direção da resposta neurocomportamental ao fosfogesso.

5.5 Fosfogesso, Saúde Única e sustentabilidade: implicações para a gestão ambiental e a saúde pública

Os resultados deste estudo devem ser interpretados não apenas sob a perspectiva da toxicidade para o peixe-zebra, mas também no contexto mais amplo da interação entre qualidade ambiental, saúde dos organismos e sustentabilidade dos sistemas produtivos (Walker *et al.*, 2012; Newman, 2020). A presença de resíduos industriais em ambientes aquáticos pode desencadear alterações nas características do meio e afetar organismos expostos, estabelecendo uma cadeia de eventos que ultrapassa os limites do organismo individual e pode repercutir sobre níveis superiores de organização ecológica (Newman, 2020). Nesse contexto, a biodisponibilidade e a bioacumulação de constituintes potencialmente tóxicos assumem papel central na avaliação de risco, uma vez que a concentração total de um elemento no resíduo não necessariamente corresponde à fração disponível para absorção pelos organismos (OECD, 2000; Baird & Cann, 2012). Assim, a avaliação integrada das características físico-químicas do meio e das respostas biológicas constitui uma abordagem relevante para compreender os efeitos ambientais associados ao fosfogesso (Walker *et al.*, 2012).

Embora os mecanismos moleculares responsáveis pelas alterações neurocomportamentais observadas não tenham sido diretamente investigados neste estudo, evidências da literatura indicam que metais potencialmente tóxicos podem exercer efeitos neurotóxicos por meio de mecanismos envolvendo estresse oxidativo, desequilíbrio redox, alterações na neurotransmissão e comprometimento da homeostase celular (Flora; Mittal; Mehta, 2008; Vellingiri *et al.* 2022). Esses processos podem afetar funções neurológicas relacionadas à locomoção, exploração ambiental, respostas ao estresse e interação social (Kalueff *et al.*, 2013; Stewart *et al.*, 2014). Dessa forma, as alterações comportamentais observadas neste estudo podem ser interpretadas como respostas integradas do organismo à exposição ambiental, embora estudos futuros envolvendo bioacumulação tecidual, biomarcadores de estresse oxidativo, neurotransmissores, histopatologia e expressão gênica sejam necessários para estabelecer relações mecanísticas mais diretas (Newman, 2020; Walker *et al.*, 2012).

Sob a perspectiva ecológica, alterações comportamentais não devem ser consideradas apenas como respostas individuais. Modificações persistentes na

locomoção, na exploração do ambiente ou na preferência social podem interferir na capacidade dos organismos de localizar alimento, evitar predadores, utilizar habitats e interagir com outros indivíduos, podendo repercutir sobre processos ecológicos em níveis superiores de organização (Scott; Sloman, 2004; Sih *et al.*, 2004). Nesse sentido, a utilização de parâmetros comportamentais como indicadores de efeito pode complementar análises físico-químicas e outros biomarcadores tradicionais, contribuindo para uma avaliação mais abrangente dos impactos ecotoxicológicos associados a resíduos industriais (Hellou, 2011; Melvin; Wilson, 2013; Newman, 2020).

Essa perspectiva é particularmente relevante quando considerada sob o conceito de Saúde Única (*One Health*), que reconhece a interdependência entre a saúde humana, animal e ambiental e propõe abordagens integradas para a prevenção e o enfrentamento de riscos à saúde (WHO; FAO; UNEP; WOA, 2022). A Organização Mundial da Saúde destaca que a poluição e outros estressores ambientais podem afetar simultaneamente os ecossistemas e a saúde dos organismos, reforçando a necessidade de ações intersetoriais e de sistemas de monitoramento integrados (WHO, 2026). Nesse contexto, investigar os efeitos ecotoxicológicos do fosfogesso contribui para uma compreensão preventiva dos riscos associados à geração, armazenamento e manejo deste resíduo, considerando não apenas a proteção da fauna aquática, mas também a conservação dos recursos naturais dos quais as populações humanas dependem (WHO; FAO; UNEP; WOA, 2022).

Os achados também apresentam implicações para a gestão ambiental e para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento de resíduos da indústria de fertilizantes. Embora os resultados obtidos não permitam, isoladamente, estabelecer limites regulatórios ou critérios de exposição ambiental, eles fornecem evidências que podem subsidiar futuras avaliações de risco, programas de biomonitoramento e estratégias de prevenção da dispersão de constituintes do fosfogesso para corpos d'água (USEPA, 1998; Newman, 2020). A combinação de indicadores físico-químicos e respostas comportamentais pode ser particularmente útil para complementar abordagens tradicionais de monitoramento, permitindo identificar alterações biológicas associadas à exposição antes que consequências ecológicas mais amplas sejam evidenciadas (Hellou, 2011; Melvin; Wilson, 2013). Dessa forma, estudos como este podem contribuir para o aprimoramento de políticas públicas

voltadas à gestão, armazenamento, aproveitamento e destinação ambientalmente adequada de resíduos da indústria de fertilizantes (IAEA, 2010; International Fertilizer Association, 2016).

Os resultados deste estudo também podem ser interpretados à luz da agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, ao evidenciarem a importância da avaliação ecotoxicológica de resíduos industriais para a conservação ambiental e a promoção da sustentabilidade. Os achados dialogam diretamente com o objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 6: Água Potável e Saneamento, ao fornecer subsídios científicos para a prevenção da contaminação de ambientes aquáticos por resíduos industriais, contribuindo para estratégias voltadas à melhoria da qualidade da água. Da mesma forma, relacionam-se ao ODS 12: Consumo e Produção Responsável, ao gerar informações que podem apoiar práticas mais seguras de gestão, armazenamento, reaproveitamento e destinação do fosfogesso, favorecendo modelos de produção mais sustentáveis. A pesquisa também contribui para o ODS 14: Vida na Água, ao ampliar o conhecimento sobre os efeitos de contaminantes em organismos aquáticos, e para o ODS 15: Vida Terrestre, ao reforçar a importância da prevenção da dispersão de contaminantes entre os diferentes compartimentos ambientais e da conservação da biodiversidade. De forma transversal, os resultados convergem com o ODS 3: Saúde e Bem-Estar, ao adotar uma abordagem preventiva fundamentada no conceito de Saúde Única (One Health), reconhecendo a interdependência entre a saúde humana, animal e ambiental e a necessidade de estratégias integradas para o enfrentamento dos impactos da poluição ambiental (UNITED NATIONS, 2015; WHO; FAO; UNEP; WOA, 2022).

5.6 Pontos fortes e limitações

Este estudo apresenta como ponto forte o fato de ser, até o momento, o primeiro a investigar os efeitos do fosfogesso sobre as respostas comportamentais de peixe-zebra. A avaliação de dois protocolos de exposição (subagudo e prolongado) permitiu uma avaliação dinâmica da toxicidade, demonstrando que os efeitos neurocomportamentais do fosfogesso não são estáticos, mas dependem da duração da exposição. Enquanto a exposição subaguda evidenciou predominantemente alterações relacionadas à ansiedade e à sociabilidade, a exposição prolongada revelou modificações locomotoras e exploratórias mais

pronunciadas, evidenciando uma mudança no perfil comportamental ao longo do tempo, contribuindo para uma análise abrangente, destacando a relevância do fosfogesso como contaminante ambiental crítico, especialmente diante da ausência de uma padronização rigorosa para o descarte desse resíduo, frequentemente armazenado a céu aberto. Essa abordagem amplia a relevância ecotoxicológica dos resultados, uma vez que organismos presentes em áreas próximas a pilhas de fosfogesso podem estar sujeitos à exposição contínua decorrente da lixiviação de contaminantes para o ambiente (Tayibi *et al.*, 2009). Dessa forma, este estudo estabelece um importante precedente para futuras investigações, demonstrando que a avaliação dos efeitos do fosfogesso deve considerar não apenas a concentração do contaminante, mas também a duração da exposição.

Entretanto, o estudo apresenta limitações, uma vez que as condições experimentais não reproduzem integralmente a complexidade do ambiente natural. Também não foi possível mensurar individualmente a quantidade de fosfogesso absorvida pelos animais e os peixes utilizados não tiveram idade exata e sexo previamente determinados devido à aquisição de fornecedor local. Além disso, não foram realizadas análises bioquímicas ou histológicas para a confirmação direta dos mecanismos envolvidos na toxicidade observada, assim como não foi possível isolar quais metais presentes no fosfogesso foram diretamente responsáveis pelos efeitos registrados.

6 CONCLUSÃO

O fosfogesso promoveu alterações concentração-dependentes nos parâmetros físico-químicos da água, com redução do pH e aumento da condutividade elétrica, dureza e turbidez. Em peixes-zebra adultos, a exposição subaguda induziu comportamento semelhante à ansiedade e reduziu a preferência social na maior concentração avaliada. A exposição prolongada promoveu alterações locomotoras e exploratórias, sem modificar a preferência social. Esses achados demonstram que a exposição ao fosfogesso é capaz de alterar o comportamento de peixes-zebra adultos, sendo seus efeitos dependentes do tempo de exposição e da concentração utilizada.

Contudo, os achados deste estudo reforçam a necessidade de manejo, monitoramento, armazenamento e descarte adequados do fosfogesso, considerando

o potencial neurotóxico do resíduo e seus possíveis impactos sobre organismos vivos. Além disso, os resultados evidenciam a importância da adoção de estratégias que minimizem os riscos ambientais associados à dispersão e ao acúmulo desse resíduo no ambiente.

7 AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde (PGCS) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde pelas contribuições à formação acadêmica e científica, bem como aos técnicos e servidores da UFTM pelo apoio prestado durante a execução deste trabalho.

Ademais, agradeço a CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

8 REFERÊNCIAS

ABDELNOUR, S. A. *et al.* Environmental epigenetics: Exploring phenotypic plasticity and transgenerational adaptation in fish. **Environmental Research**, v. 252, pt. 1, e118799, 2024. doi: 10.1016/j.envres.2024.118799.

ADALIBIEKE, Wulahati *et al.* Global crop-specific nitrogen fertilization dataset in 1961–2020. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 617, 11 set. 2023. doi:10.1038/s41597-023-02526-z.

AKFAS, Fatima *et al.* Environmental assessment of phosphogypsum: A comprehensive geochemical modeling and leaching behavior study. **Journal of Environmental Management**, v. 359, p. 120929, 1 maio 2024. doi:10.1016/j.jenvman.2024.120929.

AMMAR, R.; EL SAMRANI, A. G.; KAZPARD, V.; BASSIL, J.; LARTIGES, B.; SAAD, Z.; CHOU, L. Applying physicochemical approaches to control phosphogypsum heavy metal releases in aquatic environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 12, p. 9014–9025, 2013. doi: 10.1007/s11356-013-1875-7.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2023.

ARAÚJO, ANA; LUIS, ANDRÉ; FERNANDES, ANDRÉ. O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados e as possibilidades de aproveitamento. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, p. 2959, 1 set. 2013.

ARMITAGE, J. M.; ERICKSON, R. J.; LUCKENBACH, T.; NG, C. A.; PROSSER, R. S.; ARNOT, J. A.; SCHIRMER, K.; NICHOLS, J. W. Assessing the bioaccumulation potential of ionizable organic compounds: current knowledge and research priorities. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 36, n. 4, p. 882–897, 2017. doi:10.1002/etc.3680.

BAIRD, C.; CANN, M. **Environmental chemistry**. 5. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2012.

BENVENUTTI, Radharani *et al.* **How do zebrafish (*Danio rerio*) respond to MK-801 and amphetamine? Relevance for assessing schizophrenia-related endophenotypes in alternative model organisms**. *Journal of Neuroscience Research*, v. 99, n. 11, p. 2844–2859, Nov. 2021. doi:10.1002/jnr.24948.

BOYD, C. E.; TUCKER, C. S. **Pond Aquaculture Water Quality Management**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.

BRAGA, Ana Paula Andrade *et al.* The Zebrafish as an Alternative Animal Model for Ecotoxicological Research and Testing. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, 2024. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2024220968>

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece diretrizes ambientais para o seu enquadramento**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Resolução CONCEA nº 61, de 02 de maio de 2023. Dispõe sobre as condições que deverão ser observadas para a criação, a manutenção e a experimentação com peixes mantidos em instalações de instituições de ensino ou pesquisa científica**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou>>. Acesso em: 18 de maio de 2026.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Hormesis: U-shaped dose responses and their centrality in toxicology. **Trends in Pharmacological Sciences**, v. 22, n. 6, p. 285–291, jun. 2001. doi: 10.1016/s0165-6147(00)01719-3.

CAMPBELL, P. G. C. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model. In: TESSIER, A.; TURNER, D. R. (ed.). **Metal speciation and bioavailability in aquatic systems**. New York: John Wiley & Sons, 1995. p. 45–102.

CHOI, Tae-Young *et al.* Zebrafish as an animal model for biomedical research. **Experimental & Molecular Medicine**, v. 53, n. 3, p. 310–317, mar. 2021. doi: 10.1038/s12276-021-00571-5

EGAN, Rupert J. *et al.* Understanding behavioral and physiological phenotypes of stress and anxiety in zebrafish. **Behavioural Brain Research**, v. 205, n. 1, p. 38–44, 14 dez. 2009. doi: 10.1016/j.bbr.2009.06.022

EVANS, D. H.; PIERMARINI, P. M.; CHOE, K. P. The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid–base regulation, and excretion of nitrogenous waste. **Physiological Reviews**, v. 85, n. 1, p. 97–177, 2005. doi: 10.1152/physrev.00050.2003.

FLORA, S. J. S.; MITTAL, M.; MEHTA, A. Heavy metal induced oxidative stress & its possible reversal by chelation therapy. **Indian Journal of Medical Research**, v. 128, n. 4, p. 501–523, 2008.

Fosfogesso: Indústria Fertilizante Fosfato BR e Rotas, Seven Resíduos, [S.d.]. Disponível em:

<<https://sevenresiduos.com.br/fosfogesso-industria-fertilizante-fosfato-protocolo-seven>>. Acesso em: 15 de maio. 2026

GERLAI, R. Social behavior of zebrafish: from synthetic images to biological mechanisms of shoaling. **Journal of Neuroscience Methods**, v. 234, p. 59–65, 2014. doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.04.028.

HELLOU, J. Behavioural ecotoxicology, an “early warning” signal to assess environmental quality. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 18, n. 1, p. 1–11, 2011. doi: 10.1007/s11356-010-0367-2.

HOWE, K. *et al.* The zebrafish reference genome sequence and its relationship to the human genome. **Nature**, v. 496, n. 7446, p. 498–503, 2013. doi: 10.1038/nature12111.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Determination of radionuclides in phosphogypsum: IAEA Analytical Quality Series No. 34**. Vienna: IAEA, 2010.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Phosphogypsum: sustainable management and use**. 1. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2016. Editado por A. E. Johnston, B. Birky e J. Hilton.

JAISHANKAR, Monisha *et al.* Toxicity, mechanism, and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, v. 7, n. 2, p. 60–72, Jun. 2014.

KALUEFF, A. V.; STEWART, A. M.; GERLAI, R. Towards a comprehensive catalog of zebrafish behavior 1.0 and beyond. **Zebrafish**, v. 10, n. 1, p. 70–86, 2013. doi: 10.1089/zeb.2012.0861.

KODZHAHINCHEV, V.; SHEKH, K.; MANEK, A.; WEBER, L. P.; NIYOGI, S. Modulation of Cd and BaP uptake rate during acute aqueous co-exposure in adult

zebrafish (*Danio rerio*). **Aquatic Toxicology**, v. 256, p. 106414, 2023. doi: 10.1016/j.aquatox.2023.106414.

KOMJAROVA, I.; BURY, N. R. Evidence of common cadmium and copper uptake routes in zebrafish *Danio rerio*. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 21, p. 12946–12951, 2014. doi: 10.1021/es5032272.

KUMAR, Harender; KAUR, Kawalpreet; KAUR, Ravneet. Stress-resilient effect of *Spirulina platensis* on zebrafish chronic unpredictable stress model. **Physiology & Behavior**, v. 287, p. 114691, 1 dez. 2024. doi: 10.1016/j.physbeh.2024.114691.

LEVIN, E. D.; BENCAN, Z.; CERUTTI, D. T. Anxiolytic effects of nicotine in zebrafish. **Physiology & Behavior**, v. 90, p. 54–58, 2007. doi: 10.1016/j.physbeh.2006.08.026.

MARCON, Matheus *et al.* Acetyl-L-carnitine as a putative candidate for the treatment of stress-related psychiatric disorders: Novel evidence from a zebrafish model. **Neuropharmacology**, v. 150, p. 145–152, 15 maio 2019. doi: 10.1016/j.neuropharm.2019.03.024.

MAXIMINO, Caio *et al.* Measuring anxiety in zebrafish: a critical review. **Behavioural Brain Research**, v. 214, n. 2, p. 157–171, 25 dez. 2010. doi: 10.1016/j.bbr.2010.05.031.

MELVIN, S. D.; WILSON, S. P. The utility of behavioral studies for aquatic toxicology testing: a meta-analysis. **Chemosphere**, v. 93, n. 10, p. 2217–2223, 2013. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.036.

MISHRA, C. S. K.; NAYAK, S.; GURU, B. C.; RATH, M. Environmental impact and management of wastes from phosphate fertilizer plants. **Journal of Industrial Pollution Control**, v. 26, n. 1, p. 57–60, 2010.

Mosaic realiza evento inédito em Uberaba para destacar a maior operação de fosfogesso do mundo. Disponível em:

<<https://mosaicco.com.br/Article/https%3A%2F%2Fmosaicco.com.br%2FArticle%2F%2FMosaic%2520realiza%2520evento%2520in%2520C3%2520A9dito%2520em%2520Uberaba%2520para%2520destacar%2520a%2520maior%2520opera%2520C3%2520A7%2520C3%2520A3o%2520de%2520fosfogesso%2520do%2520mundo>>. Acesso em: 21 maio. 2026.

NEWMAN, M. C. **Fundamentals of Ecotoxicology: The Science of Pollution**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

NIYOGI, S.; WOOD, C. M. Biotic ligand model, a flexible tool for developing site-specific water quality guidelines for metals. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 23, p. 6177–6192, 2004. doi: 10.1021/es0496524.

OGI, A. *et al.* Social preference tests in zebrafish: a systematic review. **Frontiers in Behavioral Neuroscience**, v. 15, 2021. doi: 10.3389/fnbeh.2021.678825.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. New York: United Nations, 2022.

PAQUIN, P. R.; GORSUCH, J. W.; APTE, S.; BATLEY, G. E.; BOWLES, K. C.; CAMPBELL, P. G. C.; DELos, C. G.; DI TORO, D. M.; DWYER, R. L.; GALVEZ, F.; GENSEMER, R. W.; HOGSTRAND, C.; JANSSEN, C. R.; MCGEEr, J. C.; NADDY, R. B.; PLAYLE, R. C.; SANTORE, R. C.; SCHNEIDER, U.; WU, K. B. The biotic ligand model: a historical overview. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology**, v. 133, n. 1–2, p. 3–35, 2002. doi: 10.1016/S1532-0456(02)00112-6.

PENG, X.; DENG, Y.; ZHANG, X.; LIU, L.; HU, J.; DUAN, X.; WEI, Z.; FENG, Q.; SHEN, K. The leaching characteristics of common toxic elements in phosphogypsum. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 20, n. 4, p. 473–479, 2020. doi: 10.1144/geochem2019-062.

PEÑUELAS, J.; SARDANÍS, J. Global change and the increasing demand for phosphorus fertilizers. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, p. 339–352, 2023. doi: 10.1186/s40066-023-00409-5

PENUELAS, Josep; COELLO, Fernando; SARDANS, Jordi. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. **Agriculture & Food Security**, v. 12, n. 1, p. 5, 23 mar. 2023. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>

PLAYLE, R. C. Modelling metal interactions at fish gills. **Science of the Total Environment**, v. 219, n. 2–3, p. 147–163, 1998. doi:10.1016/s0048-9697(98)00232-0

População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU | As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83427-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-deve-chegar-9-7-bilh%C3%B5es-de-pessoas-em-2050-diz-relat%C3%B3rio-da-onu>. Acesso em: 21 maio. 2026.

RANDOM.ORG. **True Random Number Service**. Dublin, Irlanda, [s.d.]. Disponível em: <https://www.random.org>. Acesso em: 8 de julho 2025.

RONG, J.; HE, Y.; TANG, J.; QIAO, R.; LIN, S. “Fishing” nano–bio interactions at the key biological barriers. **Nanoscale**, v. 13, n. 12, p. 5954–5964, 2021. doi: 10.1039/D1NR00328C.

RUTHERFORD, P. M.; DUDAS, M. J.; AROCENA, J. M. Radioactivity and elemental composition of phosphogypsum produced from three phosphate rock sources. **Waste Management & Research**, v. 13, n. 5, p. 407–423, 1995. doi: 10.1177/0734242X9501300502.

RUTHERFORD, P. M.; DUDAS, M. J.; AROCENA, J. M. Trace elements and fluoride in phosphogypsum leachates. **Environmental Technology**, v. 16, n. 4, p. 343–354, 1995. doi: 10.1080/09593331608616276.

SAADAoui, E.; GHAZEL, N.; ROMDHANE, C. B.; MASSOUD, S. Phosphogypsum: potential uses and problems: a review. **International Journal of Environmental Studies**, v. 74, n. 4, p. 558–567, 2017. doi: 10.1080/00207233.2017.1330582

SCOTT, G. R.; SLOMAN, K. A. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. **Aquatic Toxicology**, v. 68, n. 4, p. 369–392, 2004. doi: 10.1016/j.aquatox.2004.03.016.

SEVCIKOVA, M.; MODRÁ, H.; SLANINOVA, A.; SVOBODOVA, Z. Metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. **Veterinární Medicína**, v. 56, n. 11, p. 537–546, 2011. doi: 10.17221/4272-VETMED

SIH, A.; BELL, A. M.; JOHNSON, J. C.; ZIEMBA, R. E. Behavioral syndromes: an integrative overview. **The Quarterly Review of Biology**, v. 79, n. 3, p. 241–277, 2004. doi: 10.1086/422893.

SILVA, L. F. O.; OLIVEIRA, M. L. S.; CRISSIEN, T. J.; SANTOSH, M.; BOLIVAR, J.; SHAO, L.; DOTTO, G. L.; GASPAROTTO, J.; SCHINDLER, M. **A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles**. **Chemosphere**, v. 286, p. 131513, 2022. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131513.

STEWART, A. M. *et al.* Perspectives of zebrafish models of experimental epilepsy. **Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry**, 2012. doi: 10.1016/j.brainresbull.2011.11.020.

STEWART, A. M.; BRAUBACH, O.; SPITSBERGEN, J.; GERLAI, R.; KALUEFF, A. V. Zebrafish models for translational neuroscience research: from tank to bedside. **Trends in Neurosciences**, v. 37, n. 5, p. 264–278, 2014. doi: 10.1016/j.tins.2014.02.011.

STEWART, A. M.; BRAUBACH, O.; SPITSBERGEN, J.; GERLAI, R.; KALUEFF, A. V. Zebrafish models for translational neuroscience research: from tank to bedside. **Trends in Neurosciences**, v. 37, n. 5, p. 264–278, 2014. doi: 10.1016/j.tins.2014.02.011.

STEWART, Adam *et al.* Pharmacological modulation of anxiety-like phenotypes in adult zebrafish behavioral models. **Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry, Novel experimental models and paradigms for neuropsychiatric disorders**. v. 35, n. 6, p. 1421–1431, 1 ago. 2011. doi: 10.1016/j.pnpbp.2010.11.035.

SZYCHLINSKA, Marta Anna; MARINO GAMMAZZA, Antonella. The Zebrafish Model in Animal and Human Health Research. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 5, p. 1945, jan. 2025. doi: 10.3390/ijms26051945.

TAYIBI, H.; CHOURA, M.; LÓPEZ, F. A.; ALGUACIL, F. J.; LÓPEZ-DELGADO, A. Environmental impact and management of phosphogypsum. **Journal of**

Environmental Management, v. 90, n. 8, p. 2377–2386, 2009. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.

UNITED NATIONS. General Assembly. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Resolution A/RES/70/1. New York: United Nations, 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for ecological risk assessment**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, 1998. (EPA/630/R-95/002F).

VALKO, M. *et al.* Metals, toxicity and oxidative stress. **Current Medicinal Chemistry**, v. 12, n. 10, p. 1161–1208, 2005. doi: 10.2174/0929867053764635.

VAN BAVEL, J. The world population explosion: causes, backgrounds and projections for the future. **Facts, Views & Vision in ObGyn**, v. 5, n. 4, p. 281–291, 2013.

VAN DIJK, Michiel *et al.* A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. **Nature Food**, v. 2, n. 7, p. 494–501, 21 jul. 2021. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>

VELLINGIRI, B. *et al.* Role of heavy metals (copper (Cu), arsenic (As), cadmium (Cd), iron (Fe) and lithium (Li)) induced neurotoxicity. **Chemosphere**, v. 301, p. 134625, 2022. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134625.

WALKER, C. H.; SIBLY, R. M.; HOPKIN, S. P.; PEAKALL, D. B. **Principles of ecotoxicology**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

WANG, X. *et al.* Effects of phosphogypsum and elevated temperature exposure on liver injury, oxidative stress, apoptosis, and genotoxicity in zebrafish (*Danio rerio*). **Science of the Total Environment**, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118904>

ZAHARAN, Eman *et al.* The impact of heavy metal pollution: bioaccumulation, oxidative stress, and histopathological alterations in fish across diverse habitats. **Aquaculture International**, v. 33, n. 5, p. 371, 31 maio 2025. doi: 10.1007/s10499-025-02045-1

Anexo I: Parecer técnico CEUA: "Avaliação dos efeitos do fosfogesso em peixe-zebra (*Danio rerio*).



Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Comissão de Ética no Uso de Animais
R. Conde Prados, nº 191 - Bairro Abadia Uberaba/MG CEP 38025-260
(34) 3700-6802 E-mail: ceua@uftm.edu.br

Uberaba, 23 de maio de 2025

PARECER Nº 23/2025/CEUA/PROPPG
PROCESSO Nº 23085.003364/2025-11
INTERESSADO: MATHEUS MARCON
ASSUNTO: Parecer técnico: "Avaliação dos efeitos do fosfogesso em peixe-zebra (*Danio rerio*)".

Certificamos que a proposta intitulada "**Avaliação dos efeitos do fosfogesso em peixe-zebra (*Danio rerio*)**", registrada com o **23085.003364/2025-11**, sob a responsabilidade de Matheus Marcon – que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica – encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794 de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle e Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovada pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, em reunião de **23/05/2025**.

Após a conclusão dos experimentos pilotos e a emissão da capacitação específica dos envolvidos, os respectivos comprovantes deverão ser inseridos no processo para validação pela coordenação/secretaria, possibilitando assim a liberação da quantidade remanescente de animais autorizada no projeto.

Finalidade	Projeto Piloto (treinamento específico)
Vigência da autorização	12/08/2025 à 31/12/2026
Espécie/Linhagem/Raça	Peixe-zebra (<i>Danio rerio</i>)/ Wild-type
Nº de animais	10
Peso/idade	350mg/3 meses
Gênero	5 machos/ 5 fêmeas
Origem	Alfa Peixes (Juliana Soares de Oliveira Eirelli, Avenida Prudente de Moraes, 765-B. Nossa Senhora da Abadia, CNPJ 32.310.903/0001-65)
Treinamento específico dos colaboradores	- Roberta da Silva Carneiro; - Paula Pinheiro Teixeira.

Finalidade	() Ensino (x) Pesquisa Científica
Vigência da autorização	12/08/2025 à 31/12/2026
Espécie/Linhagem/Raça	Peixe-zebra (<i>Danio rerio</i>)/ Wild-type
Nº de animais	160
Peso/idade	350mg/3 meses
Gênero	80 machos/80 fêmeas
Origem	Alfa Peixes (Juliana Soares de Oliveira Eirelli, Avenida Prudente de Moraes, 765-B. Nossa Senhora da Abadia, CNPJ 32.310.903/0001-65)

Segue abaixo a relação de todos os envolvidos e as respectivas funções no referido projeto:

Responsável	Funções no projeto
Matheus Marcon	Planejamento e supervisão; manipulação; monitoramento do bem-estar animal; teste físico e/ou comportamental – especificar: análise de comportamento; administração de substâncias - especificar a via: imersão na água; eutanásia – especificar: resfriamento por imersão do peixe-zebra em água gelada (0 a 4°C) de acordo com o item 8.14.13 da resolução normativa número 37 de 15 de fevereiro de 2018; outro procedimento– especificar: coleta de encéfalo após eutanásia e análise de amostras ou dados experimentais.
Colaboradores	Funções no projeto
Paula Pinheiro Teixeira	Manipulação; monitoramento do bem-estar animal; teste físico e/ou comportamental – especificar: teste claro/escuro, teste de comportamento social e teste do tanque novo; administração de substâncias - especificar a via: imersão na água; eutanásia – especificar: imersão em água gelada; outro procedimento– especificar: coleta do encéfalo após eutanásia e análise de amostras ou dados experimentais.
Roberta da Silva Carneiro	Manipulação; monitoramento do bem-estar animal; teste físico e/ou comportamental – especificar: análise de comportamento; administração de substâncias - especificar a via: imersão na água; eutanásia – especificar: Resfriamento pela imersão do peixe-zebra em água gelada (0 a 4°C) de acordo com item 8.14.13 da Resolução normativa nº 37, de 15 de fevereiro de 2018; outro procedimento– especificar: coleta de encéfalo após eutanásia e análise de amostras ou dados experimentais.

Carlo José Freire de Oliveira
Coordenador da CEUA/UFTM



Documento assinado eletronicamente por **CARLO JOSE FREIRE DE OLIVEIRA, Coordenador(a) da Comissão de Ética no Uso de Animais**, em 29/05/2025, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 215, de 16 de julho de 2024](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1523233** e o código CRC **A550E2A2**.