

## POTENCIAL TÓXICO AGUDO E CRÔNICO DA ÁGUA DO RIO DOCE CINCO ANOS APÓS O ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE MINERAÇÃO

Jéssica Dutra Ferreira<sup>1</sup>, Nayra Bento Côgo<sup>2</sup>, Ingrid Lins Noé<sup>1</sup>, Diego Lacerda de Souza<sup>2</sup>, Cristiane dos Santos Vergílio<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, SN, Guararema - 29500-000, Alegre-ES, Brasil, jessicadutra017@gmail.com, ingridlnoe@gmail.com, cristiane.vergilio@ufes.br.

<sup>2</sup>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, 28013-602, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, nayracogo@gmail.com, diegolacerda@uenf.br.

### Resumo

O rompimento da barragem de Fundão liberou mais de 40 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro que percorreram o Rio Doce. O objetivo deste trabalho foi avaliar a toxicidade aguda e crônica da água do rio Doce, 5 anos após o rompimento, através de ensaios ecotoxicológicos com *D. similis* e *C. dubia*. Os resultados indicaram ausência de efeito agudo para *D. similis* na maioria dos pontos, no entanto foi observado toxicidade crônica para *C. dubia*, em especial no ano de 2022 (estação chuvosa). Também foi observado níveis de metais mais altos no ano de 2022, indicando possível efeito tóxico relacionado aos metais. Desta forma, os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo de áreas afetadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração.

**Palavras-chave:** *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia similis*, Ensaios ecotoxicológicos. Metais. Monitoramento.

**Área do Conhecimento:** Ciências biológicas - Ecologia.

### Introdução

O rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG), em novembro de 2015, liberou mais de 40 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro, que percorreram cerca de 650 km ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, até atingirem o Oceano Atlântico (IBAMA, 2015; Carmo *et al.*, 2017). O fluxo de rejeitos provocou o aumento da concentração de diversos elementos na água e nos sedimentos (IGAM, 2020), incluindo componentes característicos do minério (Fe e Mn), elementos tóxicos (As, Cr, Cd e Pb) e metais de terras raras (La e Sc) (Queiroz *et al.*, 2018; Vergílio *et al.*, 2021).

Com o passar do tempo, grande parte desses rejeitos foram transportados para a foz ou depositados no sedimento, porém, eventos naturais como chuvas, podem causar a remobilização desses contaminantes no rio tornando-os disponíveis na coluna d'água, o que levanta preocupações acerca dos possíveis efeitos adversos à longo prazo para a biota aquática (Sartori *et al.*, 2023; Lopes *et al.*, 2025).

Os organismos aquáticos podem absorver os metais por meio da filtração e alimentação, levando a bioacumulação desses elementos, o que pode afetar a sobrevivência e reprodução desses organismos, causando prejuízos para a biodiversidade das áreas afetadas pelo rompimento da barragem (Wood; Farrel; Brauner, 2012).

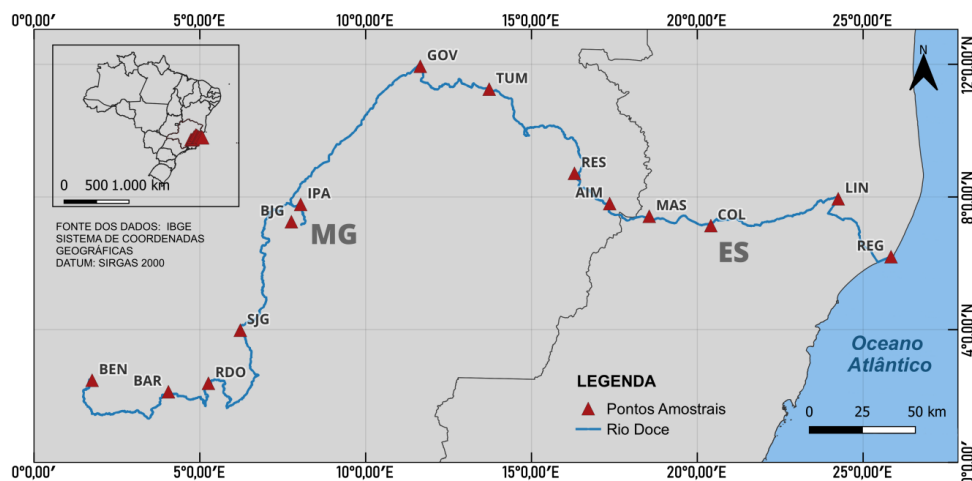
O monitoramento de áreas afetadas pelos rejeitos de mineração é importante para entender os efeitos da contaminação ambiental na biota, além de fornecer bases para estratégias de recuperação. Além disso, o monitoramento contínuo dessas áreas pode auxiliar na detecção de qualquer potencial recontaminação e efeitos subletais a longo prazo (Lopes *et al.*, 2025).

Os ensaios ecotoxicológicos usando diferentes organismos indicadores são uma ferramenta importante para o monitoramento da qualidade da água e sua utilização pode fornecer um panorama sobre os diferentes efeitos dos contaminantes na biota (Vergílio *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2025). Com essa perspectiva, o objetivo desse estudo foi avaliar a toxicidade aguda e crônica de amostras de água do Rio Doce, cinco anos após o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro.

## Metodologia

As amostras de água foram coletadas ao longo da calha principal do rio Doce, em dez pontos amostrais, sendo eles: Bento Rodrigues (BEN), Barra Longa (BAR), Rio Doce (RDO), Ipatinga (IPA), Governador Valadares (GOV), Resplendor (RES), Aimorés (AIM), Colatina (COL), Linhares (LIN) e Regência (REG) (Figura 1). A primeira coleta foi realizada no período entre 21 a 29 de junho de 2021, durante a estação seca, e a segunda coleta foi realizada entre 10 a 19 de fevereiro de 2022, durante a estação chuvosa.

Figura 1 - Mapa da distribuição espacial dos pontos de amostragem nos ambientes dulcícola/estuarino.



Fonte: Nayra Bento Côgo.

O ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia similis* foi baseado na normativa NBR 12713: 2016 (ABNT, 2016), onde quatro réplicas com cinco neonatos com 6 a 24 h de idade (20 organismos) foram expostos a 10 mL de amostra por 48 h em condições estáticas a  $20 \pm 2$  °C no escuro sem alimentação. O grupo controle foi mantido com meio MS. Após a exposição, os organismos imóveis foram contados. Os testes foram considerados válidos se a imobilidade nos controles negativos não excedesse 10%.

O ensaio de toxicidade crônica com *Ceriodaphnia dubia* foi baseado na normativa NBR 13373: 2017 (ABNT, 2017), onde 10 réplicas com 1 neonato de até 24 h de idade (10 organismos) foi exposto a 15 mL de amostra por 7 dias a  $20 \pm 2$  °C com trocas das amostras de água a cada 2 dias e alimentação diária. O grupo controle foi mantido com meio MS. Após a exposição, o número de fêmeas adultas sobreviventes e os neonatos produzidos foram contados. Os testes foram considerados válidos se a letalidade nos controles não excedesse 20% e se fosse produzido o número médio de organismos jovens igual ou maior que 15.

A determinação dos metais foi baseada na metodologia 3015A da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2007). As amostras passaram por uma digestão ácida com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 65% e foi utilizada a espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado (ICP MS, Agilent 7800) para determinação dos elementos-traço.

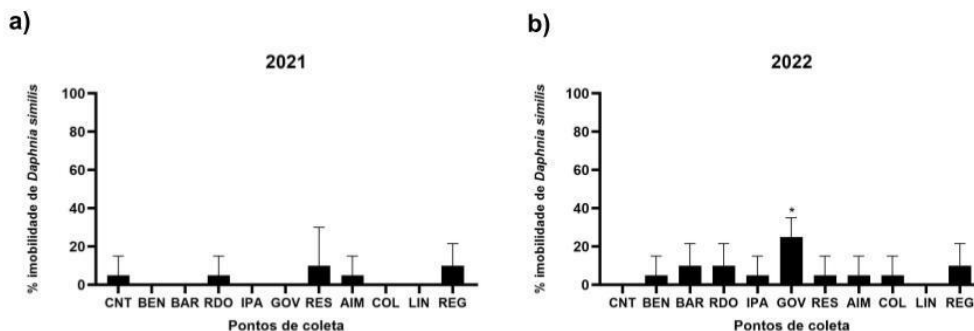
A análise de dados foi realizada através de Análise de Variância (One-Way ANOVA), seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, sendo considerada uma margem de erro de 5%. Os cálculos e os gráficos foram realizados com a utilização do software Graphpad Prism.

## Resultados

Os ensaios de toxicidade aguda com *Daphnia similis* não demonstraram diferenças significativas de imobilidade nos organismos em relação ao grupo controle, exceto para o ponto GOV em 2022, que apresentou uma imobilidade acima de 20%, demonstrando potencial efeito agudo (Figura 2).

# A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

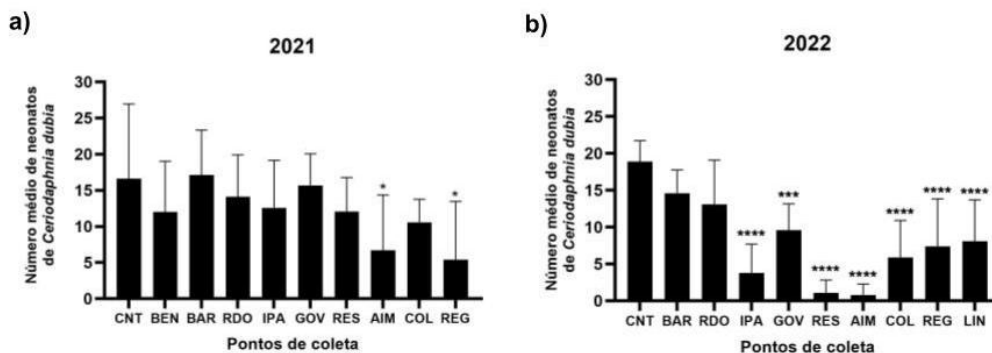
Figura 2 - Percentual de imobilidade de *Daphnia similis* exposta a água do Rio Doce dos anos de (a) 2021 (estação seca) e (b) 2022 (estação chuvosa).



Fonte: Os autores.

Os ensaios de toxicidade crônica com *Ceriodaphnia dubia* demonstraram diferenças significativas no número médio de neonatos em relação ao grupo controle nos pontos AIM e REG, no ano de 2021. Já no ano de 2022, houve maior número de pontos com diferenças significativas no número médio de neonatos em relação ao grupo controle (IPA, GOV, RES, AIM, COL, REG e LIN). Estes resultados demonstram potencial efeito crônico para as amostras de água do rio Doce, mesmo 5 anos após o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro (Figura 3).

Figura 3 - Número médio de neonatos de *Ceriodaphnia dubia* exposta a água do Rio Doce nos anos de (a) 2021 (estação seca) e (b) 2022 (estação chuvosa).



Fonte: Os autores.

Após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão, a maior parte dos elementos apresentou níveis dentro do padrão estabelecido pela CONAMA 357/2005 para águas doces de Classe 1, 2 e 3, exceto para Al dissol. no ponto BEN em 2021 e nos pontos BEN, BAR, RDO, IPA, GOV, RES, AIM, COL em 2022. Valores acima do permitido pela CONAMA 357/2005 também foram observados para Pb nos pontos BEN, BAR, RDO E IPA e Zn no ponto BEN no ano de 2022 (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentração de metais ( $\mu\text{g/L}$ ) nas amostras de água coletadas ao longo do Rio Doce nos anos de 2021 (estação seca) e 2022 (estação chuvosa).

Pontos de coleta	Elementos ( $\mu\text{g/L}$ )									
	Al dissol.		Cr		Fe dissol		Pb		Zn	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
BEN	250,7	456,3	2,2	11,0	50,6	139,6	0,4	12,8	8,9	401,4
BAR	20,6	359,6	0,8	5,8	10,3	15,1	0,1	11,2	8,6	46,9

## A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

<b>RDO</b>	36,2	421,8	2,8	5,6	5,5	8,9	0,1	18,3	5,5	35,9
<b>IPA</b>	9,2	597,0	1,6	5,6	3,6	12,7	0,1	12,0	6,6	53,9
<b>GOV</b>	8,3	435,5	0,9	3,9	3,9	15,5	0,1	9,7	4,1	28,0
<b>RES</b>	25,4	257,0	1,1	3,3	5,7	16,2	0,1	9,4	3,1	48,7
<b>AIM</b>	5,5	300,4	1,1	2,6	10,6	30,1	0,1	6,9	2,3	47,6
<b>COL</b>	4,6	105,3	0,9	2,1	5,6	8,2	0,1	5,6	2,2	35,8
<b>LIN</b>	2,4	3,6	1,4	0,1	2,6	10,0	0,0	0,1	<0.2	10,3
<b>REG</b>	6,6	10,2	0,4	<0.06	2,5	4,7	0,2	0,1	<0.2	35,5
<b>CONAMA 357/2005 (Classe 1 e 2)</b>	100,0		50,0		300,0		10,0		180,0	
<b>CONAMA 357/2005 (Classe 3)</b>	200,0		50,0		5000,0		33,0		5000,0	

Legenda: Alumínio dissolvido (Al dissol), cromo (Cr), ferro dissolvido (Fe dissol), chumbo (Pb) e zinco (Zn).

Fonte: Os autores.

### Discussão

Os ensaios de toxicidade aguda com *Daphnia similis* (Figura 2) não demonstraram efeito tóxico na maioria dos pontos, corroborando com os estudos realizados por Mendes *et al.* (2020), que não observou efeito agudo para *D. similis* em amostras coletadas entre os meses de novembro de 2015 e janeiro de 2017. Resultados semelhantes também foram encontrados por Lopes *et al.* (2025), que utilizou o microcrustáceo *D. magna* para avaliação da toxicidade aguda em amostras de água ao longo de 6 anos após o rompimento da barragem de minério de ferro, sem observação de efeito agudo.

As amostras de água do Rio Doce demonstraram efeito crônico para o microcrustáceo *Ceriodaphnia dubia*, em especial no ano de 2022 (Figura 3b). Essa diferença entre os anos pode ser explicada pela estação do ano em que foi realizada a coleta das amostras. A coleta de 2022 foi realizada na estação chuvosa, caracterizada por maior volume de chuvas, e com isso, maior carreamento de partículas provenientes da bacia de drenagem para o rio, e ressuspensão de partículas depositadas no sedimento de fundo para a coluna d'água. Segundo Richard *et al.* (2020), os maiores valores de turbidez no Rio Doce ocorrem durante o período chuvoso. Com mais partículas suspensas na coluna d'água, organismos filtradores como a *C. dubia* podem ter suas estruturas de absorção de alimentos obstruídas, levando à efeitos adversos a sua sobrevivência e reprodução.

Além do aumento da turbidez, o maior carreamento e ressuspensão de partículas pode contribuir para o aumento dos níveis de metais na coluna d'água. A maior parte dos elementos analisados neste estudo apresentou maiores concentrações no ano de 2022 (Tabela 1), indicando possível toxicidade relacionada aos metais. Estudos de Lopes *et al.* (2025) realizaram a filtragem de amostras de água do Rio Doce, a fim de diminuir as partículas suspensas, mantendo as formas dissolvidas dos metais, e ainda assim observaram efeitos tóxicos para *C. dubia*, evidenciando que concentrações elevadas de metais podem causar efeitos a sobrevivência e reprodução desses organismos.

### Conclusão

Os resultados deste estudo indicam que após cinco anos do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, as amostras de água não apresentaram efeito agudo para os organismos, no entanto ainda é observado efeito crônico, em especial no período chuvoso, o que pode estar relacionado ao aumento da turbidez e da elevada concentração de metais.

Desta forma, os resultados demonstram que mesmo após vários anos do rompimento da barragem, ainda é possível observar efeitos adversos para a biota, reforçando a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água, a fim de fornecer bases para a proteção da biota aquática em áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

### Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12713: 2016. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia* spp (Crustacea, Cladocera). 27p. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13373:2017. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica - Método de ensaio com *Ceriodaphnia* spp (Crustacea, Cladocera). 27p. Rio de Janeiro, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CARMO, F. F. *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (2015). **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília, 74p.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (2020). **Encarte especial sobre a qualidade das águas do Rio Doce após 5 anos do rompimento da barragem de Fundão 2015-2020**. Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Belo Horizonte, 74 p.

LOPES, T. O. M. *et al.* A six-year ecotoxicological assessment of the Doce river and coastal marine areas impacted by the Fundão tailings dam failure, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 371, p. 125897, 2025.

MENDES, L. B. *et al.* Ecotoxicological assessment of the Doce River surface water after the Fundão dam collapse. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 608-614, 2020.

QUEIROZ, H. *et al.* The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination?. **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 498-506, 2018.

RICHARD, E. C. *et al.* Influence of Fundão tailings dam breach on water quality in the Doce River watershed. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 583-595, 2020.

SARTORI, É. *et al.* Trace metal concentration along the Brazilian coast: An assessment of the influence of the Doce River plume. **Marine Pollution Bulletin**, v. 188, p. 114640, 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Method 3015A (SW-846): microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. Revision 1. Washington, DC, 2007.

VERGILIO, C.S. *et al.* Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tailing dam failure worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). **Science of The Total Environment**, v. 756, p. 143697, 2021.

WOOD, C. M.; FARRELL, A. P.; BRAUNER, C. J. (Ed.). **Homeostasis and toxicology of essential metals**. Vol. 1. Academic press, 2012.

## Agradecimentos



## A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Os dados são parte integrante do projeto financiado pela CHAMADA FAPES/FAPEMIG/Fundação Renova (Termo de Outorga nº 006/2021; Processo nº 2021-5KQR9) e contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).