

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CAMPUS GOVERNADOR VALADARES
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA VIDA

Cynthia Lara de Carvalho Ferreira

Biomonitoramento da genotoxicidade na Bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática

Governador Valadares

2025

Cynthia Lara de Carvalho Ferreira

Biomonitoramento da genotoxicidade na Bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Farmácia da Universidade Federal de Juiz de Fora - Campus Governador Valadares, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Farmácia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Meneghin Mendonça

Governador Valadares

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ferreira, Cynthia Lara de Carvalho .
Biomonitoramento da genotoxicidade na Bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática / Cynthia Lara de Carvalho Ferreira. -- 2025.
32 f. : il.

Orientador: Leonardo Meneghin Mendonça
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Avançado de Governador Valadares, Instituto de Ciências da Vida - ICV, 2025.

1. Rompimento da barragem. 2. Testes de toxicidade. 3. Contaminação ambiental. I. Mendonça, Leonardo Meneghin, orient.
II. Título.

Cynthia Lara de Carvalho Ferreira

Biomonitoramento da genotoxicidade na Bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Farmácia da Universidade Federal de Juiz de Fora - Campus Governador Valadares, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Farmácia.

Aprovado em 08 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Meneghin Mendonça – Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora – Campus Governador Valadares

Profa. Dra. Andréia Peraro Nascimento

Universidade Federal de Juiz de Fora – Campus Governador Valadares

Profa. Dra. Carla da Silva Machado

Universidade Vale do Rio Doce

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
MÉTODO.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS	26

Biomonitoramento da genotoxicidade na Bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática

Biomonitoring of genotoxicity in the Doce river Basin: a systemic review

Cynthia Lara de Carvalho Ferreira; João Lucas Lopes Moreira; Leonardo Meneghin Mendonça*

Universidade Federal de Juiz de Fora, campus Governador Valadares, Instituto de Ciências da Vida, Departamento de Farmácia.

***Autor correspondente:** Leonardo Meneghin Mendonça. ORCID: 0000-0001-7351-6356. Universidade Federal de Juiz de Fora Campus Governador Valadares. R. Manoel Byrro, 241 – Vila Bretas, Gov. Valadares – MG, CEP 35032-620. E-mail: leonardo.mendonca@ufjf.br. Telefone: +55 (33) 99871-3303.

Data de Submissão: XX/XX/20XX; Data do Aceite: XX/XX/20XX.

Citar: FERREIRA, C.L.C.; MOREIRA, J.L.L.; MENDONÇA, L.M. Biomonitoramento da genotoxicidade na bacia do Rio Doce: uma revisão sistemática. **Brazilian Journal of Health and Pharmacy**, v. X, n. X, p. X - X, 202 X. DOI:

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 2015, liberou grande quantidade de rejeitos de mineração no Rio Doce, gerando impactos ambientais significativos. Dentre os diversos efeitos provocados, a genotoxicidade se destaca como um importante indicativo de risco ambiental e à saúde humana. Este artigo teve como objetivo revisar os estudos que avaliaram a genotoxicidade no Rio Doce após o evento, compreender os efeitos do rompimento da barragem sobre a genética dos organismos e sugerir direções para futuras investigações. Foram consultadas as bases de dados Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect e Google Acadêmico, utilizando os seguintes descritores: “Genotoxicidade” e “Rio Doce” ou “Genotoxicity” and “Doce River”; “Mutagênese” e “Rio Doce” ou “Mutagenesis” and “Doce River”; “Mutagenicidade” e “Rio Doce” ou “Mutagenicity” and “Doce River”. Sete artigos atenderam aos critérios de inclusão e foram analisados. Os resultados evidenciam efeitos genotóxicos em diferentes pontos da bacia, com destaque para as regiões próximas ao epicentro do rompimento, como Bento Rodrigues, Rio Gualaxo do Norte e Governador Valadares, onde foram observados danos significativos ao DNA, formação de micronúcleos e alterações nucleares em peixes e em células expostas. Em contrapartida, áreas mais distantes, como Regência e Colatina, apresentaram efeitos menos intensos ou com padrões distintos. Observou-se também acúmulos de efeitos genotóxicos ao longo do tempo. Apesar da relevância metodológica, conclusões mais abrangentes são limitadas devido à baixa disponibilidade de estudos. Recomenda-se ampliar as investigações, incluindo o teste de Ames, e reforçar o monitoramento contínuo em locais estratégicos, como Governador Valadares, para compreender a evolução dos impactos genéticos causados pelos rejeitos no longo prazo.

Palavras - chave: Rompimento da barragem; testes de toxicidade; contaminação ambiental.

ABSTRACT

The collapse of the Fundão dam in Mariana (MG), Brazil, in 2015 released a large amount of mining waste into the Doce River, causing significant environmental impacts. Among the various effects observed, genotoxicity stands out as an important indicator of environmental and human health risk. This article aimed to review the studies that assessed genotoxicity in the Doce River after the disaster, understand the effects of the dam failure on the genetic material of exposed organisms, and suggest directions for future investigations. The databases Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect, and Google Scholar were consulted using the following descriptors: “Genotoxicidade” and “Rio Doce” or “Genotoxicity” and “Doce River”; “Mutagênese” and “Rio Doce” or “Mutagenesis” and “Doce River”; “Mutagenicidade” and “Rio Doce” or “Mutagenicity” and “Doce River.” Seven articles met the inclusion criteria and were analyzed. The results highlight genotoxic effects at different points along the basin, with emphasis on regions near the disaster’s epicenter, such as Bento Rodrigues, the Gualaxo do Norte River, and Governador Valadares, where significant DNA damage, micronucleus formation, and nuclear abnormalities were observed in fish and exposed cells. In contrast, more distant areas, such as Regência and Colatina, showed less intense effects or distinct patterns. Cumulative genotoxic effects were also observed over time. Despite the methodological relevance, broader conclusions are limited due to the scarcity of studies. It is recommended that investigations be expanded to include assays such as the Ames test and that continuous genetic monitoring be reinforced at strategic locations, such as Governador Valadares, to better understand the long-term genetic impacts of mining waste exposure.

Keywords: Dam break; toxicity testing; environmental contamination.

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce tem aproximadamente 853 km de extensão, com mais de 80% de sua área localizada em Minas Gerais e uma pequena parte situada no nordeste do Espírito Santo. Suas nascentes estão nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, seguindo até desaguar no oceano Atlântico (CBH-DOCE, 2024).

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco, no município de Mariana (MG). Aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro foram liberados na Bacia do Rio Doce, contaminando todo o curso do rio até sua foz no Espírito Santo e afetando também o ambiente marinho adjacente (BRASIL, 2020). Desde então, diversos estudos têm sido realizados para avaliar os impactos ambientais, especialmente na qualidade da água, dos sedimentos, na saúde humana, na biodiversidade e no equilíbrio ecológico da região.

Entre os múltiplos impactos decorrentes do desastre, os efeitos genéticos têm recebido atenção crescente por refletirem danos que podem afetar tanto organismos individuais quanto populações inteiras.

Diante da magnitude desse evento e de seus desdobramentos, as avaliações ambientais baseadas em biomarcadores de toxicidade assumem papel fundamental na identificação dos impactos sobre os ecossistemas e na proteção da saúde humana (BRASIL, 2019). As avaliações toxicológicas oferecem base científica indispensável para ações de recuperação ambiental, proteção da biodiversidade e formulação de políticas públicas. A ausência desses estudos compromete a precisão do diagnóstico dos riscos e dificulta a adoção de medidas eficazes (COSTA et al., 2008; FENECH, 2000; NAIDU et al., 2021; DEMIR; KACEW, 2023). Segundo a Organização Mundial da Saúde (2025), a avaliação toxicológica constitui

uma ferramenta essencial na gestão de riscos químicos, fornecendo evidências fundamentais para salvaguardar a saúde pública e os sistemas naturais.

A genotoxicidade, definida como a capacidade de agentes químicos causarem danos ao material genético, é um indicador particularmente relevante, visto que tais danos podem desencadear efeitos de longo prazo, incluindo mutações, alterações reprodutivas, desenvolvimento de neoplasias e perda de biodiversidade (FENECH, 2000; CETESB, 2017; NAIDU et al., 2021).

No contexto ambiental, a avaliação da genotoxicidade constitui uma ferramenta sensível e eficiente para monitorar a presença de contaminantes capazes de comprometer a saúde dos ecossistemas e, conseqüentemente, a saúde humana (CETESB, 2017). Diversos ensaios *in vitro* e *in vivo* são amplamente empregados para detectar efeitos genotóxicos em ambientes contaminados. Dentre eles, destacam-se o ensaio do micronúcleo, o ensaio do cometa, o teste de *Allium cepa*, o teste de Ames e a análise de aberrações cromossômicas, todos amplamente empregados na detecção de danos genéticos em diferentes matrizes ambientais (VALENTE et al., 2017).

O ensaio do micronúcleo é utilizado para identificar mutações cromossômicas por meio da detecção de fragmentos cromossômicos ou cromossomos inteiros não incorporados ao núcleo após a divisão celular. Esse teste pode ser aplicado em diversos organismos, como peixes, moluscos e células humanas (OECD, 2016; ROCHA; ROCHA, 2016; TEODORO et al., 2015)

O ensaio do cometa, também conhecido como eletroforese em gel de célula única, é uma técnica sensível para mensurar danos ao DNA, que permite detectar quebras de fitas de DNA em células individuais. O método consiste na lise das células e posterior eletroforese do DNA. Ao ser visualizado em microscópio, o DNA forma uma imagem semelhante a um cometa,

cuja cauda reflete o grau de dano genético (SINGH et al., 1988; BRIANEZI et al., 2009). Por ser um método simples, rápido e versátil, o ensaio do cometa é considerado uma ferramenta eficaz para o monitoramento ambiental, ajudando a detectar os efeitos genotóxicos de contaminantes em áreas impactadas (VALVERDE; ROJAS, 2009; IPHASE, 2025).

O teste de *Allium cepa* é um bioensaio vegetal de baixo custo e fácil aplicação, que avalia efeitos genotóxicos, citotóxicos e mutagênicos por meio da observação de anormalidades cromossômicas em células das raízes de cebola. Apesar das diferenças metabólicas entre plantas e animais, esse teste é considerado eficaz na detecção de efeitos clastogênicos (quebras cromossômicas) e aneugênicos (alterações no número de cromossomos). (FISKESJÖ, 1985; CABRERA; RODRIGUEZ, 1999; PARVAN et al., 2020).

Além desses, o teste de Ames é amplamente utilizado para identificar substâncias com potencial mutagênico. Ele se baseia no uso de bactérias *Salmonella typhimurium*, que não conseguem crescer sem histidina. Se essas bactérias forem expostas a agentes mutagênicos, podem ocorrer mutações que restauram essa capacidade, fazendo com que voltem a crescer. O número de colônias que crescem indica o grau de mutagenicidade da substância testada (AMES et al., 1975; MORTELMANS; ZEIGER, 2000). A análise de aberrações cromossômicas, por sua vez, permite a identificação de alterações estruturais e numéricas nos cromossomos, sendo um indicador robusto de danos genéticos tanto em células vegetais quanto animais (PRESTON et al., 1987; SALES; VENTURA, 2023).

Apesar da ampla utilização e eficácia dos métodos de avaliação genotóxica na detecção de danos genéticos em ambientes contaminados, ainda é notável a presença de lacunas significativas na literatura científica acerca da avaliação sobre os impactos genotóxicos decorrentes da contaminação da Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. Dessa maneira, a presente revisão tem como objetivo reunir e analisar criticamente os

estudos realizados, compreender os efeitos do rompimento da barragem sobre a genética dos organismos e indicar caminhos para novos estudos.

MÉTODO

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) *Statement*. A pergunta orientadora que guiou o levantamento foi: “*Há presença de agentes químicos genotóxicos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce?*”.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect e Google Acadêmico, no período de 13 a 15 de fevereiro de 2025. Foram utilizados os seguintes descritores, combinados por operadores booleanos: (“Genotoxicidade” e “Rio Doce”); (“Genotoxicity” and “Doce River”); (“Mutagênese” e “Rio Doce”); (“Mutagenesis” and “Doce River”); (“Mutagenicidade” e “Rio Doce”); (“Mutagenicity” and “Doce River”).

Foram considerados elegíveis os artigos completos que atenderam simultaneamente aos seguintes critérios: (i) estarem publicados em português ou inglês; (ii) disponíveis na íntegra, sem necessidade de contato com os autores; e (iii) abordarem de forma direta a avaliação do potencial genotóxico em amostras da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, seja na água, sedimentos, solo ou organismos bioindicadores. Foram excluídos artigos que não abordavam diretamente a Bacia do Rio Doce, que não realizavam ensaios *in vitro* ou *in vivo* de avaliação de genotoxicidade, além de resumos e monografias.

O processo de triagem foi realizado em duas etapas. Inicialmente, foram analisados os títulos e resumos das publicações, a fim de identificar aquelas potencialmente relevantes. Na

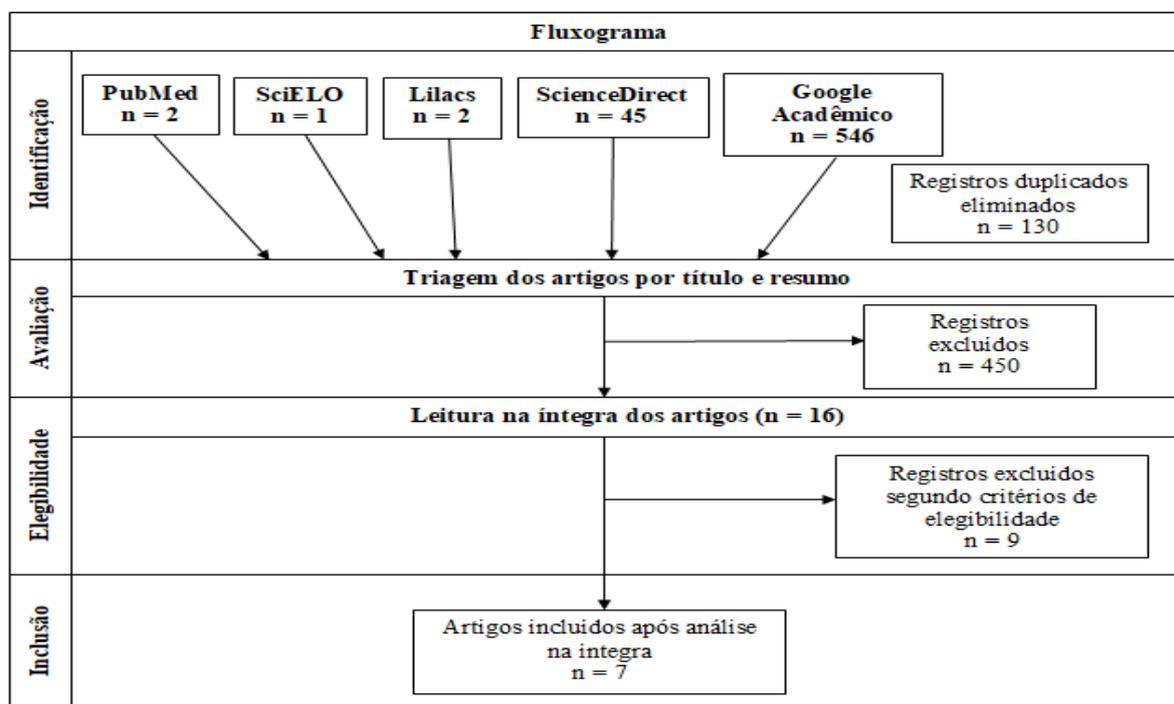
sequência, os textos selecionados foram avaliados integralmente, aplicando-se os critérios de inclusão e exclusão, bem como a remoção de duplicatas.

A pesquisa foi conduzida por dois revisores, sendo que a triagem inicial dos estudos foi realizada por um deles, com a resolução de eventuais divergências mediante consulta ao segundo. Os dados coletados incluíram informações como autor, ano de publicação, amostra, tipo de ensaio e os resultados encontrados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de seleção dos artigos incluídos nesta revisão, elaborado de acordo com as diretrizes do PRISMA. Ao todo, foram identificados 596 estudos nas bases de dados, conforme os resultados detalhados no Quadro 1. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, sete artigos foram selecionados para compor esta revisão, conforme listado no Quadro 2. Os estudos analisados revelaram, em sua maioria, resultados positivos para efeitos genotóxicos associados às amostras de água, solo e sedimentos da Bacia do Rio Doce, utilizando diferentes ensaios *in vitro* e *in vivo*, conforme sintetizado no Quadro 3.

Figura 1: Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme as diretrizes PRISMA.



Quadro 1: Resultados da busca eletrônica nas bases de dados, segundo os descritores e estratégias utilizadas.

Base de dados	Estratégia de busca	Resultados	Total
SciELO	“Genotoxicidade” e “rio doce”	0	01
	“Mutagênese” e “rio doce”	0	
	“Mutagenicidade” e “rio doce”	0	
	“Genotoxicity” and “doce river”	1	
	“Mutagenesis” and “doce river”	0	
	“Mutagenicity” and “doce river”	0	
PubMed	“Genotoxicidade” e “rio doce”	0	02
	“Mutagênese” e “rio doce”	0	
	“Mutagenicidade” e “rio doce”	0	
	“Genotoxicity” and “doce river”	2	
	“Mutagenesis” and “doce river”	0	
	“Mutagenicity” and “doce river”	0	
Lilacs	“Genotoxicidade” e “rio doce”	1	02
	“Mutagênese” e “rio doce”	0	
	“Mutagenicidade” e “rio doce”	0	
	“Genotoxicity” and “doce river”	1	
	“Mutagenesis” and “doce river”	0	
	“Mutagenicity” and “doce river”	0	

Science Direct	“Genotoxicidade” e “rio doce”	0	45
	“Mutagênese” e “rio doce”	5	
	“Mutagenicidade” e “rio doce”	0	
	“Genotoxicity” and “doce river”	28	
	“Mutagenesis” and “doce river”	1	
	“Mutagenicity” and “doce river”	11	
Google Acadêmico	“Genotoxicidade” e “rio doce”	98	546
	“Mutagênese” e “rio doce”	43	
	“Mutagenicidade” e “rio doce”	94	
	“Genotoxicity” and “doce river”	191	
	“Mutagenesis” and “doce river”	64	
	“Mutagenicity” and “doce river”	56	

Quadro 2: Artigos selecionados para inclusão nesta revisão sistemática.

COPPO G.C. et al. Genotoxic, biochemical and bioconcentration effects of manganese on <i>Oreochromis niloticus</i> (Cichlidae). Ecotoxicology , v. 27, n. 8, p. 1150-1160, 2018.
GOMES L. C. et al. Genotoxicity effects on <i>Geophagus brasiliensis</i> fish exposed to Doce River water after the environmental disaster in the city of Mariana, MG, Brazil. Brazilian Journal Of Biology , v. 79, n. 4, p. 659-664, 2019.
QUADRA G.R. et al. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. Chemosphere , v. 215, p. 753-757, 2019.
SEGURA F.R. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). Environmental Pollution , v. 218, p. 813-825, 2016.
VARGAS I.B. et al. Potencial mutagênico e genotóxico de peixes expostos ao sedimento do rio doce após o rompimento da barragem. Revista Univap , v. 22, n. 40, p. 595, 2017.
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.
YAMAMOTO F.Y. et al. Earlier biomarkers in fish evidencing stress responses to metal and organic pollution along the Doce River Basin. Environmental Pollution , v. 329, p. 121720, 2023.

Quadro 3: Caracterização dos ensaios de genotoxicidade aplicados nos estudos incluídos.

Autor	Amostra	Ensaio	Modelo	Resultado
Segura et al., 2016	Solo	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Positivo (pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues, estrada para Bento Rodrigues e rio da barragem da Samarco)
				Negativo (nas demais regiões)
	Água	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Positivo (pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues, estrada para Bento Rodrigues e rio da barragem da Samarco)
				Negativo (nas demais regiões)
	Solo	Cometa <i>in vitro</i>	HepG2	Positivo (Morro ao sul de Bento Rodrigues e subdistrito Bento Rodrigues)
				Negativo (nas demais regiões)
	Água	Cometa <i>in vitro</i>	HepG2	Positivo (Rio da barragem da Samarco, estrada para Bento Rodrigues bloqueada pela lama e pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues)
				Negativo (nas demais regiões)
Solo	Micronúcleo <i>in vitro</i>	HepG2	Positivo (morro ao sul de Bento Rodrigues e subdistrito de Bento Rodrigues)	
			Negativo (nas demais regiões analisadas)	
Água	Micronúcleo <i>in vitro</i>	HepG2	Negativo	
Vargas et al., 2017	Sedimento	Micronúcleo <i>in vivo</i>	<i>Oreochromis niloticus</i> (tilápia)	Negativo
	Sedimento	Anormalidades nucleares	<i>Oreochromis niloticus</i> (tilápia)	Positivo

Coppo et al., 2018	Concentração de manganês presente no Rio Doce após rompimento da barragem	Micronúcleo <i>in vivo</i>	<i>Oreochromis niloticus</i> (tilápia)	Positivo
	Concentração de manganês presente no Rio Doce após rompimento da barragem	Cometa <i>in vivo</i>	<i>Oreochromis niloticus</i> (tilápia)	Positivo
Quadra et al., 2019	Água das regiões depois da chegada do rejeito	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Positivo
	Água da região antes da chegada do rejeito	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Negativo
Gomes et al., 2019	Água antes do rompimento	Micronúcleo <i>in vivo</i>	<i>Geophagus brasiliensis</i> (cará)	Positivo
	Água antes do rompimento	Cometa <i>in vivo</i>	<i>Geophagus brasiliensis</i> (cará)	Positivo
	Água depois do rompimento	Micronúcleo <i>in vivo</i>	<i>Geophagus brasiliensis</i> (cará)	Positivo
	Água depois do rompimento	Cometa <i>in vivo</i>	<i>Geophagus brasiliensis</i> (cará)	Positivo
Vergílio et al., 2021	Água	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Positivo
	Sedimento	Aberrações cromossômicas	<i>Allium cepa</i>	Positivo
	Água	Micronúcleo	<i>Allium cepa</i>	Positivo
	Sedimento	Micronúcleo	<i>Allium cepa</i>	Positivo

Yamamoto et al., 2023	Água	Micronúcleo <i>in vivo</i>	<i>Astyanax lacustres</i> (Lambari) e <i>Rhamdia quelen</i> , <i>Pimelodus maculatus</i> , <i>Trachelyopterus striatulus</i> , <i>Loricariichthys castaneus</i> e <i>Hypostomus affinis</i> (Bagres)	Positivo
-----------------------	------	----------------------------	--	-----------------

No estudo conduzido por Segura et al. (2016), foram coletadas amostras de água e solo em diferentes pontos (Trilha no topo do morro – sul de Bento Rodrigues; Morro ao sul de Bento Rodrigues; Rio da barragem da Samarco; Estrada para Bento Rodrigues – bloqueada pela lama; Água potável a beira da estrada; Rio Gualaxo do Norte – próximo à estrada; Rio Gualaxo do Norte; Acesso ao Rio Gualaxo do Norte; Perto da estrada; Subdistrito de Bento Rodrigues; Pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues; Rua Carlos Pinto – Bento Rodrigues; Água encanada potável – casa na Rua Carlos Pinto, em Bento Rodrigues) seis dias após o rompimento da barragem de Fundão, no subdistrito de Mariana, Bento Rodrigues (MG). A avaliação da genotoxicidade foi realizada por meio do teste de *Allium cepa*, bem como dos ensaios cometa e micronúcleo na linhagem celular HepG2. O teste de *Allium cepa* indicou efeitos genotóxicos em todas as amostras, tanto de água quanto de solo das regiões: pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues, estrada para Bento Rodrigues e no rio da barragem da Samarco, evidenciando a presença de agentes capazes de induzir danos cromossômicos. De forma consistente, os resultados do ensaio de cometa revelaram um aumento significativo nos danos ao DNA em algumas amostras de água (estrada para Bento Rodrigues – bloqueada pela lama, rio da barragem da Samarco e pequeno rio ao norte de Bento Rodrigues) e solo (morro

ao sul de Bento Rodrigues e Subdistrito de Bento Rodrigues), quando comparadas aos controles negativos. Entretanto, no teste de micronúcleo, apenas duas amostras de solo das regiões morro ao sul de Bento Rodrigues e Subdistrito de Bento Rodrigues apresentaram uma elevação significativa na frequência de micronúcleos em relação ao controle. Nas amostras de água, não foi observado aumento na indução de micronúcleos.

Para avaliar a indução de micronúcleos e anormalidades nucleares, Vargas et al. (2017) coletaram amostras de sedimentos nas localidades de Regência (ES), Colatina (ES), Aimorés (MG), Tumiritinga (MG), Governador Valadares (MG) e Ipatinga (MG) no dia 22 de novembro de 2015 e expuseram peixes da espécie *Oreochromis niloticus* (tilápia) às referidas amostras. Em Ipatinga e Regência não foi observado aumento na frequência de micronúcleos e nas demais regiões a ocorrência de micronúcleos não foram estatisticamente significativas em comparação ao controle negativo. Por outro lado, os peixes de todas as localidades avaliadas apresentaram aumento significativo nas anormalidades nucleares, como núcleo lobulado (com projeções arredondadas ou divisões tipo fragmentação), núcleo com bolhas (pequenas vesículas que se projetam da membrana nuclear) e núcleo entalhado (com recortes na borda nuclear). Notavelmente, os resultados observados nas localidades de Regência e Ipatinga foram superiores até mesmo ao controle positivo, indicando a ocorrência de danos celulares substanciais associados à exposição aos sedimentos do Rio Doce.

Na pesquisa conduzida por Coppo et al. (2018), os efeitos do manganês (Mn) foram investigados em *Oreochromis niloticus*, comparando a concentração permitida pelo CONAMA com a detectada no Rio Doce após o rompimento da barragem (2,9 mg/L). Os testes de micronúcleo e cometa indicaram que essa concentração (2,9 mg/L) provocou indução de danos ao DNA no ensaio do cometa, e aumento significativo na formação de micronúcleos, quando comparados ao grupo controle e a outras concentrações testadas.

O teste com *Allium cepa* foi realizado por Quadra et al. (2019) para avaliar os efeitos genotóxicos de amostras de água coletadas dez dias após o rompimento da barragem próximos às cidades de Ipatinga (MG) e Governador Valadares (MG), além de um local próximo a cidade de Linhares (ES), no qual a coleta foi feita antes que o rejeito chegasse. Foram detectadas aberrações cromossômicas, como pontes, quebras e micronúcleos, nas amostras provenientes dos locais afetados.

Gomes e colaboradores (2019) exploraram o potencial genotóxico da água do Rio Doce em peixes da espécie *Geophagus brasiliensis* (cará), coletando amostras de água em Colatina (ES) antes e após o rompimento da barragem de Fundão. Os peixes foram avaliados por meio dos ensaios de micronúcleos e cometa. Os resultados indicaram aumento significativo na frequência de micronúcleos e danos ao DNA nos grupos expostos às águas do rio, em ambas as condições, em comparação ao controle negativo (água potável filtrada). No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos expostos à água coletada antes e após o rompimento, indicando que o Rio Doce já apresentava potencial genotóxico antes da chegada visível dos rejeitos de mineração. Esses achados apontam não apenas para o impacto cumulativo desse evento, mas também para um processo pré-existente de degradação ambiental na bacia, ressaltando a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água e dos efeitos sobre a biota aquática.

Já o estudo de Vergílio et al. (2021) examinou sementes de *Allium cepa* germinadas em amostras de água e sedimento coletadas desde a proximidade do rompimento até a foz do Rio Doce, nos períodos imediatamente após o rompimento da barragem (15 dias) em: Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga, Aimorés, Mascarenhas, Colatina, Linhares e Regência; e seis meses depois em: Bento Rodrigues, São José do Goiabal, Bom Jesus do Galho, Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor, Aimorés, Mascarenhas, Colatina e Regência. Enquanto a água apresentou efeitos genotóxicos e mutagênicos em ambos os

momentos, os sedimentos revelaram resultado negativo quinze dias após o rompimento, mas positivo após seis meses.

Por fim, Yamamoto et al. (2023) avaliaram os efeitos genotóxicos em peixes de duas espécies (i) *Astyanax lacustres* (lambari); (ii) *Rhamdia quelen*, *Pimelodus maculatus*, *Trachelyopterus striatulus*, *Loricariichthys castaneus* e *Hypostomus affinis* (bagres) capturados em diferentes regiões do Rio Doce: Superior (Rio Gualaxo do Norte e Reservatório de Candonga), Médio (cidade de Naque, local de referência no Rio Corrente Grande – não afetado pela lama e Governador Valadares) e Inferior (Aimorés, Colatina e Linhares) durante dois períodos distintos: estação chuvosa (janeiro e fevereiro) e estação seca (julho e agosto). Os lambaris da porção inferior da Bacia do Rio Doce, no período chuvoso, apresentaram maior frequência de micronúcleos em comparação aos lambaris de outras regiões ou períodos. Em contraste, os bagres da região do Rio Gualaxo do Norte na estação seca, assim como os da região de Governador Valadares em ambas as estações, apresentaram ainda mais micronúcleos.

Ao analisar os estudos revisados, é possível notar a aplicação de diferentes testes para avaliar a genotoxicidade e a mutagenicidade em amostras de água, solo e sedimento coletadas após o rompimento da barragem no Rio Doce. Dentre esses, o teste de micronúcleo foi amplamente utilizado em diferentes matrizes, como células humanas (linhagem HepG2), células vegetais (*Allium cepa*) e em diversas espécies de peixes (SIU et al., 2004).

Apesar da ampla aplicação, os estudos analisados apresentaram resultados variados quanto à indução da formação de micronúcleos em organismos expostos às amostras do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. Efeitos mutagênicos positivos foram evidenciados por Coppo et al. (2018), que observaram formação significativa de micronúcleos em *Oreochromis niloticus* expostos à concentração de manganês (2,9 mg/L) equivalente à detectada no rio após o rompimento. Yamamoto et al. (2023) também relataram maior frequência de micronúcleos

em lambaris coletados na porção inferior da bacia durante o período chuvoso, além de bagres provenientes das regiões do Rio Gualaxo do Norte (período seco) e Governador Valadares (ambas as estações). De forma semelhante, Segura et al. (2016) identificaram efeito mutagênico induzido por duas das amostras de solo localizada ao sul de Bento Rodrigues e subdistrito de Bento Rodrigues. Em contrapartida, Vargas et al. (2017) não detectaram formação de micronúcleos em peixes expostos a sedimentos das regiões de Regência (ES) e Ipatinga (MG), e Segura et al. (2016) não observaram esse tipo de alteração nas amostras de água analisadas.

Essas divergências podem estar relacionadas à composição química específica de cada local de coleta, à diluição dos contaminantes em áreas mais distantes da barragem, à biodisponibilidade dos poluentes ao longo do tempo e à influência de fatores sazonais sobre a dispersão dos rejeitos (FARINHA, 2016; MOURA et al., 2020). Além disso, a diversidade de espécies testadas e a sensibilidade dos métodos utilizados podem ter contribuído para a variabilidade dos resultados (MORCILLO et al., 2016; QUYET; DUNG, 2023).

O ensaio do cometa também foi amplamente utilizado nos estudos, aplicado em células humanas da linhagem HepG2, em peixes e em modelos vegetais como *Allium cepa*. Nos estudos revisados, esse teste demonstrou resultados positivos em todas as amostras analisadas. Segura et al. (2016), observaram aumento significativo na fragmentação do DNA nas células da linhagem HepG2 expostas as amostras de água e solo. Coppo et al. (2018) também detectaram elevada frequência de danos ao DNA em peixes expostos ao manganês em concentração equivalente à detectada no Rio Doce após o rompimento. Entretanto, Gomes et al. (2019) relataram a indução de danos ao DNA nos peixes tanto antes quanto após a chegada visível dos rejeitos em Colatina (ES). Esses danos estão possivelmente associados à presença de metais tóxicos ou outros contaminantes ambientais (FIOCRUZ, 2020). Nenhum dos

estudos analisados relatou resultados negativos no ensaio do cometa, o que reforça sua sensibilidade na detecção de alterações genéticas (SPEIT; HARTMANN, 2006).

Além dos testes mencionados, os estudos também utilizaram metodologias para identificar aberrações cromossômicas e alterações nucleares como forma de avaliar os efeitos genotóxicos causados pela contaminação na bacia do Rio Doce. Dentre eles, destacam-se o teste de *Allium cepa*, eficaz na identificação de aberrações como pontes, quebras cromossômicas e cromossomos retardatários, e a análise morfológica de eritrócitos em peixes, capaz de detectar alterações como núcleos lobulados, entalhados e com bolhas (AYLLON; GARCIA-VAZQUEZ, 2000; LEME; MARIN-MORALES, 2009; CARRASCO; TILBURY; MYERS, 1990).

A análise dos resultados obtidos com esses testes revelou evidências de genotoxicidade em algumas localidades e em determinados períodos, mas também resultados negativos em outras condições. O teste de *Allium cepa* indicou presença de aberrações cromossômicas em amostras de água e solo coletados em áreas impactadas do Rio Doce (QUADRA et al., 2019, VERGÍLIO et al., 2021) especialmente pontes e quebras cromossômicas. Em coletas realizadas logo após o rompimento, como em amostras de sedimentos, os resultados foram negativos, tornando-se positivos em análises posteriores, o que pode indicar acumulação de contaminantes ao longo do tempo (VERGÍLIO et al., 2021). Nas análises morfológicas de eritrócitos, foi observada uma alta frequência de alterações nucleares em peixes coletados em regiões como Governador Valadares e Rio Gualaxo do Norte (YAMAMOTO et al., 2023), enquanto em locais como Regência, mais distantes da origem da contaminação, os resultados foram menos intensos ou até negativos. Tais variações podem estar relacionadas à intensidade da contaminação local, ao padrão de dispersão dos poluentes ao longo do rio, e até mesmo fatores sazonais, que podem afetar a concentração e disponibilidade de contaminantes (PAZ, 2024; UICN, 2022).

Embora esses testes sejam úteis no monitoramento ambiental, eles apresentam limitações que devem ser consideradas. Métodos como o teste de micronúcleo, o ensaio do cometa, *Allium cepa* e a análise morfológica de eritrócitos são eficazes na detecção de danos genéticos, mas não identificam os compostos responsáveis nem os mecanismos moleculares envolvidos. Além disso, a sensibilidade desses testes varia de acordo com o organismo-teste e as condições experimentais, influenciando os resultados. O teste de *Allium cepa*, por exemplo, é prático e de baixo custo, mas não permite extrapolação direta para humanos ou fauna aquática, enquanto alterações em eritrócitos de peixes podem ser causadas por estressores ambientais ou fisiológicos não relacionados à contaminação (LEME; MARIN-MORALES, 2009; SULA et al., 2020; MORCILLO et al., 2016).

Uma constatação relevante é a escassez de estudos toxicológicos, especialmente de genotoxicidade, na bacia do Rio Doce após o desastre ambiental decorrente do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana. Apesar da magnitude do impacto e do tempo transcorrido desde então, os sete artigos publicados e os ensaios realizados até o momento são claramente insuficientes para uma avaliação abrangente dos potenciais efeitos sobre o meio ambiente e a saúde humana, em curto, médio e longo prazos. Destaca-se ainda a ausência da aplicação do teste de Ames nos trabalhos revisados, um método amplamente reconhecido pela sua eficácia na detecção da mutagenicidade de amostras ambientais (OHE et al., 2004), além de ser uma ferramenta fundamental na compreensão de mecanismos de mutagenicidade, e previsão do potencial carcinogênico de substâncias químicas (COSTA, 2025).

Diante disso, embora os estudos revisados revelam importantes evidências de genotoxicidade na bacia do Rio Doce, é essencial a realização de novas pesquisas que utilizem abordagens mais amplas e complementares, permitindo uma avaliação mais precisa dos impactos ambientais. A identificação desses danos é essencial para orientar ações de mitigação, proteção à saúde pública e recuperação dos ecossistemas afetados.

CONCLUSÃO

Esta revisão teve como objetivo reunir e analisar criticamente os estudos disponíveis sobre a genotoxicidade na Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, em 2015. Os estudos analisados revelaram evidências consistentes de efeitos genotóxicos em diferentes pontos da bacia, observados por meio de bioensaios como o teste de micronúcleo, o ensaio do cometa e o teste de *Allium cepa*. Esses métodos demonstraram a ocorrência de danos ao DNA em organismos expostos, indicando a presença de contaminantes com potencial genotóxico. Contudo, identificou-se uma limitação relevante relacionada à ausência do teste de Ames e à escassez de estudos que integrem bioensaios com análises químicas detalhadas dos poluentes. Há também pouca padronização entre os métodos utilizados, o que dificulta comparações entre áreas e ao longo do tempo. Assim, recomenda-se a ampliação das abordagens metodológicas, com a inclusão de diferentes bioindicadores e testes complementares, além da integração entre análises biológicas e físico-químicas. O monitoramento contínuo, especialmente em áreas estratégicas como Governador Valadares, é importante para avaliar a evolução dos riscos toxicológicos e orientar políticas públicas voltadas à recuperação ambiental e à proteção da saúde humana e dos ecossistemas afetados.

AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO INSTITUCIONAL

Este estudo não recebeu financiamento de instituições.

CONFLITO DE INTERESSE

Nada a declarar.

REFERÊNCIAS

AMES, B.N.; MCCANN, J.; YAMASAKI, E. Methods for detecting carcinogens and mutagens with the salmonella/mammalian-microsome mutagenicity test. **Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects**, v. 31, n. 6, p. 347-363, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(75\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0165-1161(75)90046-1).

AYLLON, F.; GARCIA-VAZQUEZ, E. Induction of micronuclei and other nuclear abnormalities in European minnow *Phoxinus phoxinus* and mollie *Poecilia latipinna*: an assessment of the fish micronucleus test. *Mutation Research/Genetic Toxicology And Environmental Mutagenesis*, v. 467, n. 2, p. 177-186, 2000. DOI: 10.1016/s1383-5718(00)00033-4.

BONASSI, S.; ZNAOR, A.; CEPPI, M.; LANDO, C.; CHANG, W.P.; HOLLAND, N. et al. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*, v. 28, n. 3, p. 625-631, 2006. DOI: 10.1093/carcin/bgl177.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. **Estudo de Avaliação de Risco à Saúde Humana em Localidades Atingidas pelo Rompimento da Barragem do Fundão – MG**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/arsh/estudos/localidades-atingidas-pelo-rompimento-da-barragem-do-fundao-2013-mg-relatorio-final-mariana-e-barra-longa/@@download/file/ARSH%20-%20MARIANA%20E%20BARRA%20LONGA.pdf>.

BRASIL. **Conheça a linha do tempo da tragédia de Mariana (MG)**. Brasília: Portal GOV.br, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/novo-acordo-do-rio-doce/conheca-a-linha-do-tempo-da-tragedia-de-mariana-mg>.

BRIANEZI, G.; CAMARGO, J.L.V.; MIOT, H.A. Desenvolvimento e validação de técnica quantitativa de análise de imagem para avaliação do teste do cometa corado pela prata. **J Bras Patol Med Lab**, São Paulo, v. 45, n. 4, p. 325-334, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1676-24442009000400010>

CABRERA, G.L.; RODRÍGUEZ, D.M.G. Genotoxicity of soil from farmland irrigated with wastewater using three plant bioassays. **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, V. 426, n. 2, p. 211-214, 1999. DOI: 10.1016/s0027-5107(99)00070-6.

CBH-DOCE. **A Bacia**. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>.

CETESB. **Ensaio ecotoxicológicos com organismos aquáticos**: atendimento à legislação ambiental. Atendimento à Legislação Ambiental. 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2018/03/Ensaio-ecotox-organismos-aquaticos-atendimento-a-legislacao-ambiental.pdf>.

CONSTANTIN, M.J.; OWENS, E.T. Introduction and perspectives of plant genetic and cytogenetic assays a report of the U.S. environmental protection agency Gene-Tox program. **Mutation Research/Reviews In Genetic Toxicology**, v. 99, n. 1, p. 1-12, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1110\(82\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0165-1110(82)90027-6).

COPPO, G.C.; PASSOS, L.S.; LOPES, T.O.M.; PEREIRA, T.M.; MERÇON, J.; CABRAL, D.S. et al. Genotoxic, biochemical and bioconcentration effects of manganese on *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). **Ecotoxicology**, v. 27, n. 8, p. 1150-1160, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10646-018-1970-0>.

COSTA, C.R.; OLIVI P.; BOTTA C.M.R; ESPINDOLA E.L.G. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**, v. 31, n. 7, p. 1820-1830, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422008000700038>.

COSTA, D. **Mutagenicidade em Foco: O Teste de Ames ou Teste de Mutação Reversa Bacteriana**. 2025. Disponível em: <https://bcrj.org.br/mutagenicidade-em-foco-o-teste-de-ames-ou-teste-de-mutacao-reversa-bacteriana/>.

DEMIR, E.; KACEW, S. Environmental Toxicology and Human Health. **International Journal Of Molecular Sciences**, v. 25, n. 1, p. 555, 2023. DOI: 10.3390/ijms25010555.

FARINHA, B.S. **Variações sazonais nas composições química e isotópica das águas superficiais na Bacia do Rio Jacaré-Pepira/SP.** Trabalho de conclusão de curso (Ecologia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Biociências (Campus de Rio Claro), 2016.

FIOCRUZ. FUNDAÇÃO OSVALDO CRUZ. **Estudo aponta contaminação por metais em peixes do Rio Doce.** 2020. Disponível em: <https://agencia.fiocruz.br/estudo-aponta-contaminacao-por-metais-em-peixes-do-rio-doce#:~:text=Um%20artigo%20rec%C3%A9m%2Dpublicado%20confirma,Samarco%20em%20Mariana%2C%20Minas%20Gerais.>

FISKESJÖ, G. The Allium test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas*, v. 102, n. 1, p. 99-112, 2008. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x

GOMES, L.C.; CHIPARI-GOMES, A.R.; MIRANDA, T.O.; PEREIRA, T.M.; MERÇON J.; DAVEL, V.C. et al. Genotoxicity effects on *Geophagus brasiliensis* fish exposed to Doce River water after the environmental disaster in the city of Mariana, MG, Brazil. **Brazilian Journal Of Biology**, v. 79, n. 4, p. 659-664, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.188086>.

IPHASE. INNOVATIVE REAGENTS FOR INNOVATIVE RESEARCH. **Qual é o teste do cometa?** 2025. Disponível em: <https://www.iphasebiosci.com/pt/blog/what-is-the-comet-test->.

LEME, D.M.; MARIN-MORALES, M.A. Allium cepa test in environmental monitoring: a review on its application. **Mutation Research/Reviews In Mutation Research**, v. 682, n. 1, p. 71-81, 2009. DOI: 10.1016/j.mrrev.2009.06.002

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Rompimento da barragem de Fundão, em Mariana: resultados e desafios cinco anos após o desastre.** 2020. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/rompimento-da-barragem-de-fundao-em-mariana-resultados-e-desafios-cinco-anos-apos-o-desastre.shtml#:~:text=Mariana%2C%205%20de%20novembro%20de,rejeitos%20de%20min%C3%A9rio%20de%20ferro.>

MORCILLO, P.; ROMERO, D.; MESEGUER, J.; ESTEBAN, M.A.; CUESTA, A. Cytotoxicity and alterations at transcriptional level caused by metals on fish erythrocytes in vitro. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 12312-12322, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6445-3>.

MORTELMANS, K.; ZEIGER, E. The Ames *Salmonella*/microsome mutagenicity assay. **Mutation Research/Fundamental And Molecular Mechanisms Of Mutagenesis**, v. 455, n. 1-2, p. 29-60, 2000. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0027-5107\(00\)00064-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0027-5107(00)00064-6).

MOURA, L.S.; LOPES, R.B.; RIBEIRO, J.S.; FERNANDES, G.S.T.; ALMEIDA, R.M.; MELO, S.G. A Influência da Sazonalidade sobre a qualidade de água para microbacia do Urumari, Santarém/Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 6, p. 346-357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0028>.

NAIDU, R.; BISWAS, B.; WILLETT, I.R; CRIBB, J.; SINGH, B.K; NATHANAIL, C.P. *et al.* Chemical pollution: a growing peril and potential catastrophic risk to humanity. **Environment International**, v. 156, p. 106616, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106616>.

OHE, T.; WATANABE, T.; WAKABAYASHI, K. Mutagens in surface waters: a review. **Mutation Research/Reviews In Mutation Research**, v. 567, n. 2-3, p. 109-149, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2004.08.003>.

OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Test Guideline 487: In Vitro Mammalian Cell Micronucleus Test**. 2014. Disponível em: <https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/iccvam/suppdocs/feddocs/oecd/oecd-tg487-2014-508.pdf>.

OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Segurança química**. 2025. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/chemical-safety?utm_source=chatgpt.com#tab=tab_1.

PARVAN, L.G.; LEITE, T.G.; FREITAS, T.B.; PEDROSA, P.A.A.; CALIXTO, J.S.; AGOSTINHO, L.A. Bioensaio com *Allium cepa* revela genotoxicidade de herbicida com flumioxazina. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 11, p. 1-10, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5123/s2176-6223202000544>.

PAZ, A.D. **Análise de risco ecológico por metais e metaloides em águas superficiais: estudo de caso da Bacia do Rio Doce**. 2024. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais.

PRESTON, R.J.; DEAN, B.J; GALLOWAY, S.; HOLDEN, H.; MCFEE, A.F.; SHELBY, M. Mammalian in vivo cytogenetic assays Analysis of chromosome aberrations in bone marrow cells. **Mutation Research/Genetic Toxicology**, v. 189, n. 2, p. 157-165, 1987. DOI: 10.1016/0165-1218(87)90021-8.

QUADRA, G.R.; ROLAND, F.; BARROS, N.; MALM, O.; LINO, A.S.; AZEVEDO, G.M. et al. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. **Chemosphere**, v. 215, p. 753-757, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.104>.

QUYET, D.H.; DUNG, P.T. Morphological Alterations of Fish Erythrocytes as Their Response to Environmental Conditions. **HAYATI Journal of Biosciences**, v. 30, n. 4, p. 711-715, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4308/hjb.30.4.711-715>.

ROCHA, S.M; ROCHA, C.A.M. Micronucleus test in bivalve mollusks as an important tool for xenobiotic exposure risk assessment. **Acta of Fisheries and Aquatic Resources**, v. 4, n. 1, p. 70-79, 2016. DOI: 10.2312.

SALES, G.E.; VENTURA, R.M. ABERRAÇÕES CROMOSSÔMICAS E SUAS VARIAÇÕES. **Rcmos - Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 1-7, 2023. DOI: 10.51473/ed.al.v3i2.789.

SEGURA, F.R.; NUNES, E.A.; PANIZ, F.P.; PAULELLI, A.C.C.; RODRIGUES, G.B.; BRAGA, G.U.L. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento

Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.

SINGH, N.P.; MCCOY, M.T.; TICE, R.R.; SCHNEIDER, E.L. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. **Experimental Cell Research**, v. 175, n. 1, p. 184-191, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(88\)90265-0](https://doi.org/10.1016/0014-4827(88)90265-0).

SIU, W.H.L.; CAO, J.; JACK, R.W.; WU, R.S.S.; RICHARDSON, B.J.; XU, L. et al. Application of the comet and micronucleus assays to the detection of B[a]P genotoxicity in haemocytes of the green-lipped mussel (*Perna viridis*). **Aquatic Toxicology**, v. 66, n. 4, p. 381-392, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2003.10.006>.

SPEIT, G.; HARTMANN, A. The comet assay: a sensitive genotoxicity test for the detection of DNA damage and repair. **Methods Mol Biol**, n. 314, p. 275-286, 2006. DOI: 10.1385/1-59259-973-7:275.

SULA, E.; ALIKO, V.; PAGANO, M.; FAGGIO, C. Digital light microscopy as a tool in toxicological evaluation of fish erythrocyte morphological abnormalities. **Microsc Res Tech.**, v. 83, n. 4, p. 362-369, 2020. DOI: 10.1002/jemt.23422.

TEODORO, V.; SATOS, F.; MIKELLE, U.; GUTIERREZ, P. Frequência de Micronúcleos em Tambaquis de Cultivo Semi- intensivo em Pisciculturas de Presidente Médici – RO. X Jornada Científica do Centro de Estudos Interdisciplinar em Desenvolvimento Sustentável da Amozônia – CEDSA. Porto Velho-RO, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288993480_FREQUENCIA_DE_MICRONUCLEOS_EM_TAMBAQUIS_DE_CULTIVO_SEMI-INTENSIVO_EM_PISCICULTURAS_DE_PRESIDENTE_MEDICI_-_RO.

UICN. União Internacional para a Conservação da Natureza. **Impactos ambientais da dispersão de rejeitos de mineração em ambientes costeiros e marinhos**: Lições e recomendações para avaliação de impactos ex post. Gland, Switzerland, 2022.

VALENTE, D.; COSTA-AMARAL, I.C.; CARVALHO, L.V.B.; SANTOS, M.V.C.; CASTRO, V.S.; RODRIGUES, D.R.F.; et al. Utilização de biomarcadores de genotoxicidade

e expressão gênica na avaliação de trabalhadores de postos de combustíveis expostos a vapores de gasolina. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 2, n. 42, p. 1-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-6369000124415>

VALVERDE, M.; ROJAS, E. Environmental and occupational biomonitoring using the Comet assay. *Mutation Research/Reviews In Mutation Research*, v. 681, n. 1, p. 93-109, 2009. DOI: 10.1016/j.mrrev.2008.11.001.

VARGAS, I.B.; MAINARDI, V.F.; AGUIAR, L.L.; SOUZA, D.L.; PIEDADE, A.E.; RANGEL, T.P. et al. Potencial mutagênico e genotóxico de peixes expostos ao sedimento do rio doce após o rompimento da barragem. **Revista Univap**, São José dos Campos, v. 22, n. 40, p. 1-5, 2017. DOI:<https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.1252>.

VERGILIO, C.S.; LACERDA, D.; SOUZA, T.S.; OLIVEIRA, B.C.V.; FIORESI, V.S.; SOUZA, V.V. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697>.

YAMAMOTO, F.Y.; ONISHI, K.; RALHA, T.R.; SILVA, L.F.O.; DEDA, B.; PESSALI, T.Y.C. et al. Earlier biomarkers in fish evidencing stress responses to metal and organic pollution along the Doce River Basin. **Environmental Pollution**, v. 329, p. 121720, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121720>.