

Biomonitoramento da genotoxicidade em organismos aquáticos da Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem em Mariana (Minas Gerais, Brasil): revisão integrativa da literatura

Genotoxicity biomonitoring in aquatic organisms of the Rio Doce Basin after the Mariana dam failure (Minas Gerais, Brazil): an integrative literature review

Cynthia Lara de Carvalho Ferreira¹; João Lucas Lopes Moreira¹; Carla da Silva Machado^{2*}; Leonardo Meneghin Mendonça¹

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora, campus Governador Valadares, Instituto de Ciências da Vida, Departamento de Farmácia, Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil.

² Universidade Vale do Rio Doce - UNIVALE, Faculdade de Ciências da Saúde, Departamento de Medicina, Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil.

***Autor correspondente:** Carla da Silva Machado, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9287-5071>, email: carla.machado@univale.br

Data de Submissão: 23/02/2026; Data do Aceite: 23/09/2026.

Citar: FERREIRA, C.L.C.; MOREIRA, J.L.L.; MACHADO, C.S.; MENDONÇA, L.M. Biomonitoramento da genotoxicidade em organismos aquáticos da Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem em Mariana (Minas Gerais, Brasil): revisão integrativa da literatura. **Brazilian Journal of Health and Pharmacy**, v. 8, e283, 2026.

RESUMO

O rompimento da barragem do Fundão, em Mariana (Minas Gerais, Brasil), no ano de 2015, liberou milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração na Bacia do Rio Doce, provocando impactos ambientais de grande magnitude. Entre esses impactos, a genotoxicidade destaca-se como um importante indicador de risco ecológico e potencial ameaça à saúde humana. Esta revisão integrativa teve como objetivo reunir e analisar os estudos que investigaram a genotoxicidade na Bacia do Rio Doce após o desastre, sintetizando os principais efeitos observados e identificando lacunas de conhecimento. A busca bibliográfica foi realizada nas bases Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect e Google Acadêmico, utilizando descritores relacionados à genotoxicidade - mutagênese, mutagenicidade e Rio Doce, em português e inglês. Sete artigos atenderam aos critérios de inclusão. Os estudos evidenciaram danos genotóxicos em diferentes compartimentos da bacia, especialmente em áreas próximas ao rompimento, como Bento Rodrigues, Rio Gualaxo do Norte e Governador Valadares. Entre os principais biomarcadores alterados destacaram-se quebras de ácido desoxirribonucleico (DNA), formação de micronúcleos e alterações nucleares em organismos aquáticos. Em regiões mais distantes da fonte de contaminação, como Regência e Colatina, os efeitos foram menos pronunciados ou apresentaram padrões distintos. Os resultados também indicam a persistência desses efeitos anos após o desastre, sugerindo exposição prolongada a agentes potencialmente genotóxicos. Entretanto, o reduzido número de estudos ainda limita conclusões abrangentes. Assim, são necessárias novas investigações com diferentes modelos biológicos, ensaios complementares, como o teste de Ames, e monitoramento contínuo em áreas estratégicas da bacia, especialmente em municípios como Governador Valadares, que utilizam as águas do Rio Doce para abastecimento público.

Palavras-chave: Rompimento da barragem; Testes de toxicidade; Contaminação Ambiental; Danos ao DNA.

ABSTRACT

The collapse of the Fundão tailings dam in Mariana, Minas Gerais, Brazil, in 2015 released millions of cubic meters of mining waste into the Doce River Basin, causing extensive environmental impacts. Among these impacts, genotoxicity has emerged

as an important indicator of ecological risk and a potential threat to human health. This integrative review aimed to identify and critically analyze studies investigating genotoxicity in the Doce River Basin following the disaster, synthesizing the main findings and identifying knowledge gaps. A literature search was conducted in the Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect, and Google Scholar databases using descriptors related to genotoxicity - mutagenesis, mutagenicity, and the Doce River in both Portuguese and English. Seven studies met the inclusion criteria. The selected studies reported genetic damage in different environmental compartments of the basin, particularly in areas closest to the dam failure, including Bento Rodrigues, the Gualaxo do Norte River, and Governador Valadares. The main altered biomarkers included deoxyribonucleic acid (DNA) strand breaks, micronucleus formation, and nuclear abnormalities in aquatic organisms. In more distant locations, such as Regência and Colatina, genotoxic effects were less pronounced or exhibited distinct patterns. The findings also indicate that these effects have persisted for years after the disaster, suggesting prolonged exposure to potentially genotoxic agents. However, the limited number of available studies still precludes broader conclusions. Therefore, further investigations using different biological models, complementary assays such as the Ames test, and continuous biomonitoring in strategic areas of the basin, particularly municipalities such as Governador Valadares, which rely on the Doce River as a source of public water supply, are needed.

Keywords: Dam break; Toxicity testing; Environmental contamination; DNA damage.

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 (Minas Gerais, Brasil). Aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos da mineração 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, 2019). Esses rejeitos apresentam composição ampla, contendo predominantemente óxidos de ferro e sílica, além de outros elementos químicos como manganês, alumínio e bário, cuja mobilização no ambiente pode contribuir para diferentes mecanismos de toxicidade. 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

(Coppo et al., 2018; Gomes et al., 2019; Yamamoto et al., 2023).

Entre os múltiplos impactos decorrentes do desastre, os efeitos genotóxicos 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; 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, consequentemente, a saúde humana (CETESB, 2017). Para esse propósito, diferentes ensaios biológicos têm sido empregados na detecção de danos genotóxicos em organismos expostos a ambientes contaminados, permitindo identificar desde lesões iniciais no ácido desoxirribonucleico (DNA) até alterações cromossômicas mais complexas (Valente et al., 2017).

Dentre os métodos mais utilizados destaca-se o ensaio do micronúcleo, que permite identificar mutações cromossômicas por meio da detecção de fragmentos cromossômicos ou cromossomos inteiros não incorporados ao núcleo após a divisão celular. Sua aplicação em diferentes organismos, incluindo peixes, moluscos e células humanas, o torna uma ferramenta diferencial para o biomonitoramento ambiental (OECD, 2014; Rocha; Rocha, 2016; Teodoro et al., 2015).

Complementarmente, o ensaio do cometa possibilita a detecção de danos primários ao DNA, especialmente quebras de fita simples ou dupla. Considerado um método sensível, rápido e versátil, esse ensaio tem sido amplamente utilizado para avaliar os efeitos genotóxicos decorrentes da exposição a contaminantes ambientais, incluindo aqueles presentes em ecossistemas impactados por atividades antrópicas (Singh et al., 1988; Brianezi et al., 2009; Valverde; Rojas, 2009; IPHASE, 2025).

Bioensaios vegetais também são aplicados ao monitoramento ambiental. O teste de *Allium*

cepa destaca-se por sua simplicidade, baixo custo e capacidade de detectar efeitos genotóxicos, citotóxicos e mutagênicos por meio da observação de alterações cromossômicas em células meristemáticas das raízes de cebola. O método apresenta elevada sensibilidade para identificar efeitos clastogênicos e aneugênicos decorrentes da exposição a contaminantes (Fiskesjö, 1985; Cabrera; Rodriguez, 1999; Parvan et al., 2020).

Outras abordagens contribuem para ampliar a compreensão dos mecanismos envolvidos nos danos genotóxicos. O teste de Ames, por exemplo, permite identificar substâncias com potencial mutagênico por meio da reversão de mutações em cepas de *Salmonella typhimurium* (Ames et al., 1975; Mortelmans; Zeiger, 2000). De forma complementar, a análise de aberrações cromossômicas possibilita a identificação de alterações estruturais e numéricas nos cromossomos, constituindo um importante indicador de instabilidade genética em organismos expostos à agentes tóxicos (Preston et al., 1987; Sales; Ventura, 2023).

A aplicação conjunta desses ensaios tem contribuído para a avaliação da genotoxicidade associada à diferentes formas de contaminação ambiental. No caso da Bacia do Rio Doce, afetada pelo rompimento da barragem em Mariana, essas ferramentas têm permitido investigar os efeitos dos rejeitos de mineração sobre organismos aquáticos, vegetais e populações humanas expostas, fornecendo evidências importantes acerca da extensão e da persistência dos danos ao longo do tempo.

Embora estudos tenham sido conduzidos desde o desastre de 2015, os resultados encontram-se dispersos na literatura, utilizando diferentes organismos-modelo, metodologias e períodos de avaliação. Essa heterogeneidade dificulta a compreensão integrada do conhecimento produzido e a identificação de tendências consistentes sobre

os efeitos genotóxicos associados ao evento. Dessa forma, torna-se relevante reunir e analisar criticamente as evidências disponíveis e os resultados obtidos, apontando lacunas que possam orientar futuras investigações. Nesse contexto, a presente revisão integrativa tem como objetivo compilar e discutir os estudos realizados sobre genotoxicidade na Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem em Mariana contribuindo para uma visão abrangente dos impactos genotóxicos observados e das perspectivas para o monitoramento ambiental contínuo.

MÉTODOS

Este estudo consiste em uma revisão integrativa da literatura. A revisão foi conduzida nas seguintes etapas: definição da questão norteadora, estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão, busca e seleção dos estudos, extração dos dados, análise e síntese dos resultados.

A questão norteadora que orientou o estudo foi: "Quais evidências científicas têm sido produzidas sobre os efeitos genotóxicos observados na Bacia Hidrográfica do Rio Doce após o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais?"

A busca bibliográfica foi realizada entre fevereiro de 2025 e junho de 2026 nas bases de dados Lilacs, PubMed, SciELO, ScienceDirect e Google Acadêmico. Foram utilizados os seguintes descritores em português e inglês, combinados por operadores booleanos: ("Genotoxicidade" AND "Rio Doce"); ("Genotoxicity" AND "Doce River"); ("Mutagênese" AND "Rio Doce"); ("Mutagenesis" AND "Doce River"); ("Mutagenicidade" AND "Rio Doce"); e ("Mutagenicity" AND "Doce River").

Foram incluídos artigos originais publicados em português ou inglês, disponíveis na íntegra, que investigaram a ocorrência de danos ou potencial genotóxico em amostras ambientais, organismos bioindicadores ou sistemas experimentais

relacionados à Bacia Hidrográfica do Rio Doce após o rompimento da barragem do Fundão. Foram excluídos estudos realizados em outras bacias hidrográficas, artigos de revisão, resumos publicados em anais de eventos, monografias, dissertações, teses e trabalhos que não apresentavam avaliação direta de biomarcadores ou ensaios de genotoxicidade.

O processo de seleção dos estudos ocorreu em duas etapas. Inicialmente, foram analisados os títulos e resumos das publicações recuperadas para verificar sua aderência ao tema proposto. Em seguida, os artigos potencialmente elegíveis foram submetidos à leitura integral e avaliados conforme os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Os registros duplicados foram identificados e removidos.

A extração dos dados foi realizada por dois revisores independentes, sendo registradas informações referentes aos autores, ano de publicação, local de estudo, tipo de amostra analisada, organismo ou sistema experimental utilizado, biomarcadores e ensaios empregados na avaliação da genotoxicidade, bem como os principais resultados observados. Eventuais divergências foram resolvidas por consenso entre os revisores.

Os dados obtidos foram organizados e analisados de forma descritiva, buscando identificar padrões espaciais e temporais dos efeitos genotóxicos relatados, os biomarcadores mais frequentemente utilizados e as principais lacunas do conhecimento sobre a genotoxicidade na Bacia do Rio Doce após o desastre ambiental.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos considerados nesta revisão integrativa da literatura. A busca bibliográfica resultou na identificação de 596 publicações nas bases de dados consultadas, conforme detalhado no Quadro 1. Após a remoção

dos registros duplicados, a leitura dos títulos, resumos e textos completos, e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, sete artigos foram selecionados para compor a síntese das evidências (Quadro 2). Os estudos incluídos investigaram a genotoxicidade em diferentes compartimentos da Bacia do Rio Doce, abrangendo amostras de água, sedimentos, solo e organismos bioindicadores, por meio de distintos biomarcadores e ensaios in vitro e in vivo. Os principais aspectos metodológicos e os resultados reportados foram organizados e sintetizados no Quadro 3.

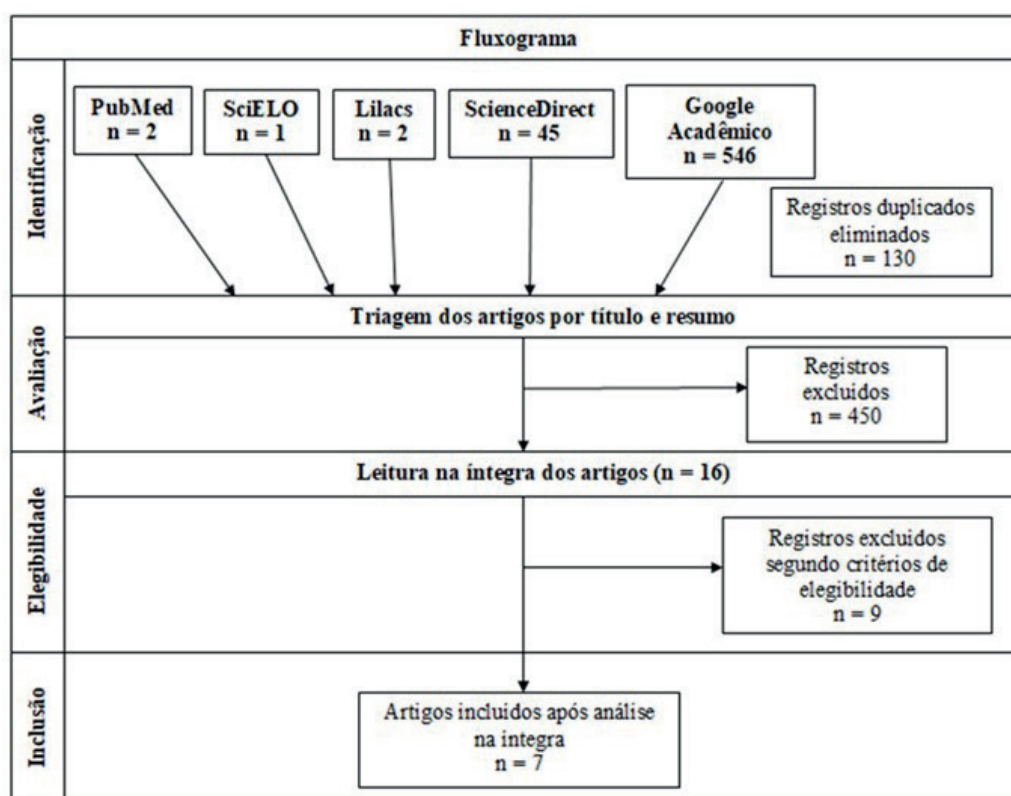


Figura 1: Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos.

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	

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 integrativa.

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. 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. 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 et al. (2019) investigaram o potencial genotóxico da água do Rio Doce utilizando peixes da espécie *Geophagus brasiliensis* (cará), a partir de amostras coletadas em Colatina (ES) antes e após o rompimento da barragem de Fundão. Os organismos foram avaliados por meio dos ensaios de micronúcleo e cometa. Os resultados demonstraram aumento significativo na frequência de micronúcleos e nos danos ao DNA em ambos os grupos expostos à água do rio, quando comparados ao controle negativo. Entretanto, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as amostras coletadas antes e após a chegada visível dos rejeitos. Esse achado representa uma das evidências mais relevantes identificadas nesta revisão, pois sugere que a bacia já apresentava um cenário prévio de degradação ambiental capaz de induzir efeitos genotóxicos na biota aquática. Dessa forma, os impactos decorrentes do rompimento da barragem não devem ser interpretados como um evento isolado, mas como um fator que se sobrepôs e potencialmente agravou problemas ambientais já existentes na região. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade ambiental da bacia e de investigações que considerem tanto os efeitos do desastre quanto as fontes históricas de contaminação.

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 incluídos nesta revisão, observa-se que diferentes metodologias foram empregadas para investigar os efeitos genotóxicos associados à contaminação da Bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. Embora tenham sido utilizados distintos organismos-teste, matrizes ambientais e biomarcadores, os resultados convergem para a ocorrência de danos genotóxicos em diferentes compartimentos do ecossistema, evidenciando a persistência dos efeitos da contaminação ao longo da bacia.

Na pesquisa conduzida por Coppo et al. (2018), os efeitos do manganês (Mn) foram investigados em *Oreochromis niloticus*, comparando-se a concentração máxima permitida pela legislação brasileira com a concentração detectada no Rio Doce após o rompimento da barragem (2,9 mg/L). Os ensaios de cometa e micronúcleo demonstraram que essa

concentração foi capaz de induzir danos significativos ao DNA e aumentar a frequência de micronúcleos. Esses resultados são biologicamente coerentes, uma vez que o manganês, em concentrações elevadas, pode desencadear a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio, promovendo estresse oxidativo celular. Esse processo pode causar quebras nas fitas de DNA, oxidação de bases nitrogenadas e falhas nos mecanismos de reparo, culminando em alterações detectáveis tanto pelo ensaio do cometa quanto pelo teste de micronúcleo. Assim, os efeitos observados sugerem que a presença de manganês em níveis elevados pode ter contribuído significativamente para os danos genotóxicos registrados em organismos expostos às águas da bacia após o desastre.

O teste de micronúcleo foi amplamente empregado em células humanas, organismos vegetais e espécies de peixes, revelando resultados heterogêneos entre as diferentes localidades e condições experimentais. Enquanto alguns estudos identificaram aumento significativo na frequência de micronúcleos, outros não observaram diferenças estatisticamente significativas em determinadas amostras. Essas divergências podem ser explicadas pela variabilidade espacial da contaminação, pela composição química específica dos rejeitos e dos contaminantes presentes em cada local, pela biodisponibilidade dos poluentes e pelas diferenças de sensibilidade entre os organismos avaliados. Além disso, fatores ambientais, especialmente os relacionados à sazonalidade, parecem exercer influência importante sobre a exposição dos organismos aos agentes genotóxicos.

Nesse contexto, os resultados obtidos por Yamamoto et al. (2023) sugerem que a estação chuvosa pode favorecer a mobilização de contaminantes previamente depositados nos sedimentos. O aumento da precipitação intensifica processos de erosão, escoamento superficial e ressuspensão de partículas sedimentares, elevando a disponibilidade de metais e outros compostos potencialmente tóxicos na

coluna d'água. Como consequência, organismos aquáticos podem ser expostos a concentrações mais elevadas desses contaminantes, o que contribui para o aumento da frequência de micronúcleos e outras alterações nucleares observadas durante esse período. Esses achados reforçam a importância de considerar a dinâmica hidrológica da bacia na interpretação dos efeitos genotóxicos associados ao desastre.

O ensaio do cometa destacou-se como uma das ferramentas mais sensíveis para a detecção de danos genotóxicos, apresentando resultados positivos em todos os estudos que o utilizaram. A elevada frequência de danos ao DNA observada em diferentes organismos sugere a presença contínua de agentes capazes de induzir lesões ao DNA, mesmo em áreas mais distantes do local de rompimento. Entre os possíveis mecanismos envolvidos, destaca-se a ação de metais potencialmente tóxicos presentes nos rejeitos e nos sedimentos contaminados. O manganês, por exemplo, foi associado à indução de danos genotóxicos em *Oreochromis niloticus*, provavelmente por meio da geração excessiva de espécies reativas de oxigênio. O consequente estresse oxidativo pode provocar oxidação de bases nitrogenadas, quebras nas fitas de DNA e falhas nos mecanismos de reparo celular, alterações que são detectadas pelos ensaios de cometa e micronúcleo.

Os resultados obtidos por meio do teste de *Allium cepa* e da análise de alterações nucleares em eritrócitos complementam essas evidências ao demonstrar a ocorrência de aberrações cromossômicas e alterações morfológicas celulares em diferentes regiões da bacia. A identificação de pontes cromossômicas, fragmentações, micronúcleos e alterações nucleares reforça a ocorrência de instabilidade genética em organismos expostos aos contaminantes ambientais. Além disso, o fato de alguns efeitos terem sido mais pronunciados meses após o rompimento sugere que processos de deposição, acúmulo e remobilização dos contaminantes podem prolongar seus impactos ao

longo do tempo, mesmo após a passagem inicial dos rejeitos.

Um dos achados mais relevantes identificados nesta revisão foi o estudo de Gomes et al. (2019), que demonstrou a ocorrência de danos genotóxicos em peixes expostos à água do Rio Doce tanto antes quanto após a chegada visível dos rejeitos de mineração em Colatina (ES). A ausência de diferenças significativas entre os períodos avaliados sugere que a bacia já apresentava potencial genotóxico antes do desastre, possivelmente em decorrência de pressões ambientais associadas à urbanização, atividades industriais, mineração e lançamento de efluentes ao longo de seu curso. Dessa forma, os impactos decorrentes do rompimento da barragem não devem ser interpretados de maneira isolada, mas como um evento que se somou a um contexto pré-existente de degradação ambiental. Esse resultado amplia a compreensão dos efeitos observados na bacia e evidencia a necessidade de abordagens integradas que considerem tanto os impactos do desastre quanto as fontes históricas de contaminação.

Em conjunto, os estudos revisados indicam que os efeitos genotóxicos observados na Bacia do Rio Doce resultam de uma interação complexa entre a composição dos rejeitos, a dinâmica ambiental dos contaminantes, fatores sazonais e condições pré-existentes de degradação da bacia. As evidências obtidas demonstram a ocorrência de danos genotóxicos em diferentes matrizes ambientais e organismos-testes, reforçando a importância do biomonitoramento contínuo para avaliar a persistência desses efeitos e seus potenciais impactos ecológicos e à saúde humana em longo prazo.

A presente revisão também revelou uma lacuna de conhecimento. Considerando a magnitude do desastre e o período transcorrido desde o rompimento da barragem de Fundão, o número de estudos disponíveis ainda é reduzido. Os sete artigos identificados são

insuficientes para uma avaliação abrangente dos efeitos genotóxicos na bacia, especialmente no que se refere às consequências de médio e longo prazos. Além disso, observou-se a ausência da aplicação do teste de Ames nos estudos revisados, embora esse método seja amplamente reconhecido por sua capacidade de detectar mutagenicidade em amostras ambientais (Ohe et al., 2004) e por sua relevância na investigação de mecanismos mutagênicos e na predição do potencial carcinogênico de substâncias químicas (Costa, 2025).

Nesse contexto, torna-se necessária a ampliação das pesquisas sobre genotoxicidade na Bacia do Rio Doce, incorporando abordagens complementares, diferentes organismos-modelo e períodos de monitoramento mais extensos. O uso integrado de múltiplos biomarcadores poderá fornecer uma compreensão mais abrangente dos impactos ambientais decorrentes do desastre. A identificação e o acompanhamento contínuo dos danos genotóxicos são fundamentais para subsidiar ações de mitigação, orientar políticas de proteção à saúde pública e apoiar estratégias de recuperação dos ecossistemas afetados.

CONCLUSÃO

Os trabalhos analisados identificaram a ocorrência 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*. Embora os resultados tenham variado de acordo com a localidade, o período de amostragem, a matriz ambiental e os organismos avaliados, a maioria dos estudos relatou danos ao DNA e alterações cromossômicas compatíveis com a exposição a contaminantes com potencial genotóxico.

Os achados também sugerem que os impactos observados após o rompimento da barragem ocorreram em um contexto de degradação ambiental pré-existente. Nesse sentido, destaca-se o estudo de Gomes et al. (2019), que identificou potencial

genotóxico em amostras coletadas antes e após a chegada dos rejeitos em Colatina (ES), indicando que a bacia já apresentava fontes de contaminação capazes de afetar a integridade genética dos organismos aquáticos. Esse resultado reforça a necessidade de interpretar os efeitos do desastre considerando a interação entre os rejeitos de mineração e pressões ambientais previamente existentes.

Contudo, identificaram-se limitações importantes na literatura disponível, incluindo a escassez de estudos, a ausência da aplicação do teste de Ames e a limitada integração entre bioensaios e análises físico-químicas detalhadas dos contaminantes. Além disso, a diversidade metodológica observada dificulta comparações entre diferentes regiões da bacia e ao longo do tempo.

Recomenda-se a ampliação das abordagens metodológicas, com a incorporação de diferentes bioindicadores, ensaios complementares e estratégias integradas de avaliação biológica e físico-química. O monitoramento contínuo é importante, especialmente em áreas estratégicas como Governador Valadares, onde a dependência direta das águas do Rio Doce para o abastecimento público torna a população potencialmente mais vulnerável à exposição prolongada aos contaminantes remanescentes.

O fortalecimento dessas ações poderá contribuir para uma compreensão mais abrangente dos impactos genotóxicos associados ao desastre e subsidiar políticas públicas voltadas à recuperação ambiental, à proteção dos ecossistemas e à promoção da saúde da população exposta.

AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO INSTITUCIONAL

Este estudo não recebeu financiamento de instituições.

CONFLITO DE INTERESSE

Nada a declarar.

DECLARAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI, versão GPT-4o, acesso em Junho/2026) com a finalidade de aprimorar a fluidez e a gramática do texto em língua inglesa, realizar a revisão gramatical em língua portuguesa e auxiliar na estruturação de ideias. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram, editaram e aceitaram ou rejeitaram criticamente as sugestões, assumindo total responsabilidade pelo conteúdo, argumentação e conclusões apresentadas.

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: [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(00\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(00)00033-4).

BONASSI, S. 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: <https://doi.org/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. **Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial**, 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: [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(99\)00070-6](https://doi.org/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**. 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. et al. Genotoxic, biochemical and bioconcentration effects of manganese on *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). **Ecotoxicology**, v. 27, n. 8, p. 1150-1160, 2018. DOI: <https://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: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700038>.

COSTA, D. **Mutagenicidade em foco: o teste de Ames ou teste de mutação reversa bacteriana**. Disponível em: <https://bcrlj.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: <https://doi.org/10.3390/ijms25010555>.

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

FENECH, M. The in vitro micronucleus technique. **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, Amsterdam, v. 455, n. 1-2, p. 81-95, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(00\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00065-8)

FIOCRUZ. Fundação Oswaldo 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>.

FISKESJÖ, G. The Allium test as a standard

in environmental monitoring. **Hereditas**, v. 102, n. 1, p. 99-112, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x>.

GOMES, L.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: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.188086>.

IPHASE. Innovative Reagents for Innovative Research. **Qual é o teste do cometa?** 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: <https://doi.org/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.** 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>.

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: [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00064-6).

MOURA, L.S. et al. 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. 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: <https://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.** Disponível em: https://www.who.int/health-topics/chemical-safety#tab=tab_1.

PARVAN, L.G. et al. Bioensaio com Allium cepa revela genotoxicidade de herbicida com flumioxazina. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 11, p. 1-10, 2020. DOI: <https://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.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais.

PRESTON, R.J. et al. 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: [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(87\)90021-8](https://doi.org/10.1016/0165-1218(87)90021-8).

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. DOI: <https://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: <https://doi.org/10.2312/Actafish.2016.4.1.70-79>.

SALES, G.E.; VENTURA, R.M. Aberrações cromossômicas e suas variações. **Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 1-7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51473/ed.al.v3i2.789>.

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. 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. 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: <https://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 in Molecular Biology**, n. 314, p. 275-286, 2006. DOI: <https://doi.org/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. **Microscopy Research and Technique**, v. 83, n. 4, p. 362-369, 2020. DOI: <https://doi.org/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 Amazônia – CEDSA. Porto Velho, 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. 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. 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: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2008.11.001>.

VARGAS, I.B. 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. 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: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121720>.