

# Efeitos tóxicos à saúde humana e ao ambiente causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão

## Toxic effects to human health and the environment caused by the spillage of ore tailings from the Fundão dam

Lara Luiza Freitas de Oliveira<sup>1</sup> , Hélio Batista dos Santos<sup>2</sup> , Ralph Gruppi Thomé<sup>2</sup> , Farah Maria Drumond Chequer<sup>3</sup> 

1. Discente do curso de Bioquímica da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Centro-Oeste Dona Lindu (UFSJ-CCO), Divinópolis-MG, Brasil. 2. Docente responsável pelo Laboratório de Processamento de Tecidos, LAPROTEC, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Centro-Oeste Dona Lindu (UFSJ-CCO), Divinópolis-MG, Brasil. 3. Docente responsável pelo Laboratório de Análises Toxicológicas, LATOX, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Centro-Oeste Dona Lindu (UFSJ-CCO), Divinópolis-MG, Brasil.

### Resumo

**Objetivo:** analisar as evidências científicas existentes até o presente momento que descrevem os efeitos tóxicos causados à saúde humana e ao ambiente, devido à liberação dos rejeitos de minério, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão em Mariana - MG. **Métodos:** a revisão narrativa da literatura baseou-se na busca de artigos em quatro bases de dados: PubMed, SciELO, Science Direct e LILACS, utilizando os descritores “Dam”, “Fundão” e “Mariana” junto com o operador booleano “AND”. **Resultados:** trinta e quatro das oitenta e cinco publicações encontradas atenderam aos critérios de inclusão e foram utilizadas para compor a presente revisão. Foram observados os seguintes efeitos tóxicos: contaminação da água e do solo, principalmente, por metais pesados, potencial genotóxico, citotóxico e mutagênico da água, diminuição da diversidade microbiana, contaminação de peixes, perda da vegetação e prejuízos ao metabolismo de crescimento de plantas. Entre esses metais, foi relatado aumento na concentração de ferro, manganês, cobre, cádmio, chumbo, arsênio, cromo, magnésio, alumínio, mercúrio, cobalto, bário, níquel e selênio. Além disso, o desastre promoveu o aumento no número de casos de doenças humanas, como dengue, doenças respiratórias, dermatológicas, intestinais, psicológicas e comportamentais. **Conclusão:** todas as evidências científicas expostas na presente revisão sugerem que houve a contaminação ambiental, bem como da população local, por agentes tóxicos presentes nos rejeitos de minério, em especial metais pesados, liberados após o rompimento da barragem de Fundão. Assim, torna-se essencial a realização de mais estudos que visem esclarecer os efeitos tóxicos crônicos decorrentes dos rejeitos de minério liberados ao ambiente.

**Palavras-chave:** Barragem; Rejeitos; Metais Pesados; Toxicidade.

### Abstract

**Objective:** to analyze the scientific evidence existing to date that describes the toxic effects caused to human and the environmental health, due to the release of ore tailings, resulting from the rupture of the Fundão dam in Mariana-MG. **Methods:** the narrative literature review was based on a search for articles in four databases: PubMed, SciELO, Science Direct and LILACS, using the descriptors “Dam”, “Fundão” and “Mariana” together with the Boolean operator “AND”. **Results:** thirty-four, of the eighty-five publications found, met the inclusion criteria and were used to compose the present review. The following toxic effects were observed: contamination of water and soil mainly by heavy metals, genotoxic, cytotoxic and mutagenic potential of water, decrease in microbial diversity, contamination of fish, loss of vegetation, and impairment of plant growth metabolism. Among these metals, increased concentrations of iron, manganese, copper, cadmium, lead, arsenic, chromium, magnesium, aluminum, mercury, cobalt, barium, nickel and selenium were reported. In addition, the disaster promoted an increase in the number of cases of human diseases, such as dengue, respiratory, dermatological, intestinal, psychological and behavioral diseases. **Conclusion:** all the scientific evidence exposed in the present review that there was environmental contamination, as well as of the local population, by toxic agents present in the ore tailings, especially heavy metals, released after the collapse of the Fundão dam. Thus, further studies aimed at clarifying the chronic toxic effects resulting from the ore tailings released into the environment are essential.

**Keywords:** Dam; Tailings; Heavy Metals; Toxicity.

### INTRODUÇÃO

O rio Doce é um dos cursos d'água mais importantes da Região Sudeste do Brasil, drenando parte do Quadrilátero Ferrífero, uma área importante de mineração na região que vem sendo explorada desde o século XVII<sup>1</sup>. A sua bacia inclui, aproximadamente, 225 municípios, abastece cerca de 3,6 milhões de habitantes e abrange, também, os rios Gualaxo do Norte, Carmo, Piracicaba e Piranga, sendo essencial para a

economia dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, pois fornece água para diversos fins, além de possuir uma grande biodiversidade<sup>2</sup>.

A mineração é um dos setores básicos da economia do Brasil, sendo o estado de Minas Gerais pioneiro na produção de minério de ferro do país e do mundo<sup>3</sup>. Os resíduos gerados nas

**Correspondente:** Farah Maria Drumond Chequer. Laboratório de Análises Toxicológicas. Universidade Federal de São João del-Rei - Campus Centro-Oeste Dona Lindu (UFSJ-CCO). R. Sebastião Gonçalves Coelho 400, Chanadour. 35.501-296 Divinópolis, MG Brasil. E-mail: farahchequer@ufsj.edu.br

**Conflito de interesse:** Não há conflito de interesse por parte de qualquer um dos autores.

Recebido em: 26 Set 2020; Revisado em: 20 Ago 2021; Aceito em: 26 Ago 2021

## 2 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

atividades de mineração são particularmente preocupantes devido à enorme quantidade produzida e podem ser divididos em materiais estéreis e rejeitos. Esses rejeitos são resultantes de processos de beneficiamento da substância de interesse e, geralmente, são associados à presença de elementos químicos tóxicos<sup>4</sup>. A escolha da forma como lidar com os resíduos é fundamental para entender o quanto de risco ambiental eles oferecem<sup>5</sup>. No Brasil, na maioria das vezes, os resíduos de minério de ferro são armazenados em barragens de contenção de rejeitos de mineração, que podem romper, em uma análise primária, em decorrência de abalos sísmicos, ou como consequência da falha de planejamento na construção, manutenção e no uso. Quando essas barragens rompem, liberam uma lama tóxica para cursos d'água, os quais podem chegar a cerca de centenas de quilômetros da área de mineração<sup>5,6</sup>.

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, localizada no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana-MG, e controlada pela mineradora Samarco. O rompimento causou a liberação de cerca de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração à bacia do rio Doce<sup>7,8</sup>, e a lama de rejeitos percorreu, aproximadamente, 677 km até desaguar no Oceano Atlântico<sup>9</sup>. Além das perdas humanas e materiais, houve uma grande diminuição de parte da biodiversidade da região, incluindo peixes, microrganismos e vegetação. Além do mais, ocorreram alterações na qualidade da água<sup>10</sup> e na composição do solo atingidos pela lama de rejeitos, impossibilitando a pesca, a recreação, o uso da água e do solo na agricultura e o consumo da água pela população<sup>11,12</sup>. Houve ainda, a deposição dos rejeitos na forma de sedimentos, o que levou à alteração da carga sedimentar da bacia do rio Doce<sup>13</sup>.

A ocorrência de metais pesados na bacia do rio Doce pode ser considerada natural, decorrente das condições geomorfológicas (quadrilátero ferrífero) ou da contaminação antropogênica devido às atividades mineradoras. O problema ambiental é que a entrada de metais pesados no ambiente aquático por meio de atividades antropogênicas é maior e mais rápida do que os processos naturais. Levando-se, então, em consideração o rompimento das barragens de rejeitos, tem-se um aumento imediato e uma lama liberada com grande velocidade, capaz de promover alterações na paisagem, prejudicar a qualidade da água e matar a biota<sup>8,13,14</sup>. Segundo os relatórios emitidos após o rompimento da barragem de Fundão, houve aumento na concentração de diversos metais ao longo da bacia do rio Doce<sup>15,16</sup>. Entre esses metais, foram relatados aumento na concentração de ferro, manganês, cobre, cádmio, chumbo<sup>17</sup>, arsênio, cromo<sup>8</sup>, magnésio, alumínio<sup>18</sup>, mercúrio e níquel<sup>15</sup>. Os metais pesados apresentam alta toxicidade mesmo em baixas concentrações, e o aumento da concentração desses elementos no solo e na água pode levar a bioacumulação em organismos aquáticos ou plantas, apresentando riscos significativos à saúde humana por meio da ingestão via cadeia alimentar<sup>19,20</sup>.

Em face do exposto, o presente estudo tem como objetivo analisar as evidências científicas existentes até o presente momento que descrevem os efeitos tóxicos causados à saúde

humana e ambiental, devido à liberação dos rejeitos de minério, ricos predominantemente em metais pesados, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana- MG.

## METODOLOGIA

### Desenho do estudo

Este estudo trata de uma revisão narrativa, visando responder à pergunta norteadora: “Quais os possíveis efeitos tóxicos causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão à saúde humana e ambiental?”

### Fontes de informação

As buscas dos estudos foram realizadas em quatro base de dados: PubMed, SciELO, ScienceDirect e LILACS, no período de 13 de fevereiro de 2020 a 22 de junho de 2020. Os descritores utilizados foram “Dam”, “Fundão” e “Mariana”, empregados juntamente com o operador booleano “AND”.

### Seleção dos estudos

Após a busca dos artigos nos bancos de dados citados anteriormente, realizou-se um cruzamento destes para a exclusão de publicações em duplicatas. Posteriormente, realizou-se a leitura dos títulos e resumos das publicações. Em adição, foi feita também a literatura cinzenta, realizando a busca de referências encontradas nos estudos que também respondiam à pergunta norteadora, maximizando as fontes bibliográficas.

### Crítérios de elegibilidade

Foram considerados elegíveis artigos disponíveis na íntegra, nos idiomas inglês, português ou espanhol, publicados no período de novembro de 2015 a junho de 2020, e que respondessem à pergunta norteadora. Artigos de revisão, relatórios, catálogos, editoriais, notícias, relatos de casos, comentários, resultados de dissertação ou teses e resumos publicados em anais de congresso ou em revistas científicas não foram considerados nesta revisão.

### Variáveis

Os artigos que atendiam aos critérios de inclusão foram analisados na íntegra e, por meio desta leitura, foram coletadas as variáveis descritas nas tabelas apresentadas posteriormente. As variáveis consideradas nesta revisão foram autor, ano de publicação, localidade do estudo, amostra analisada, tamanho da amostra, condições de exposição ou período de coleta, grupo controle, descrição dos efeitos tóxicos e limitações do estudo.

## RESULTADOS

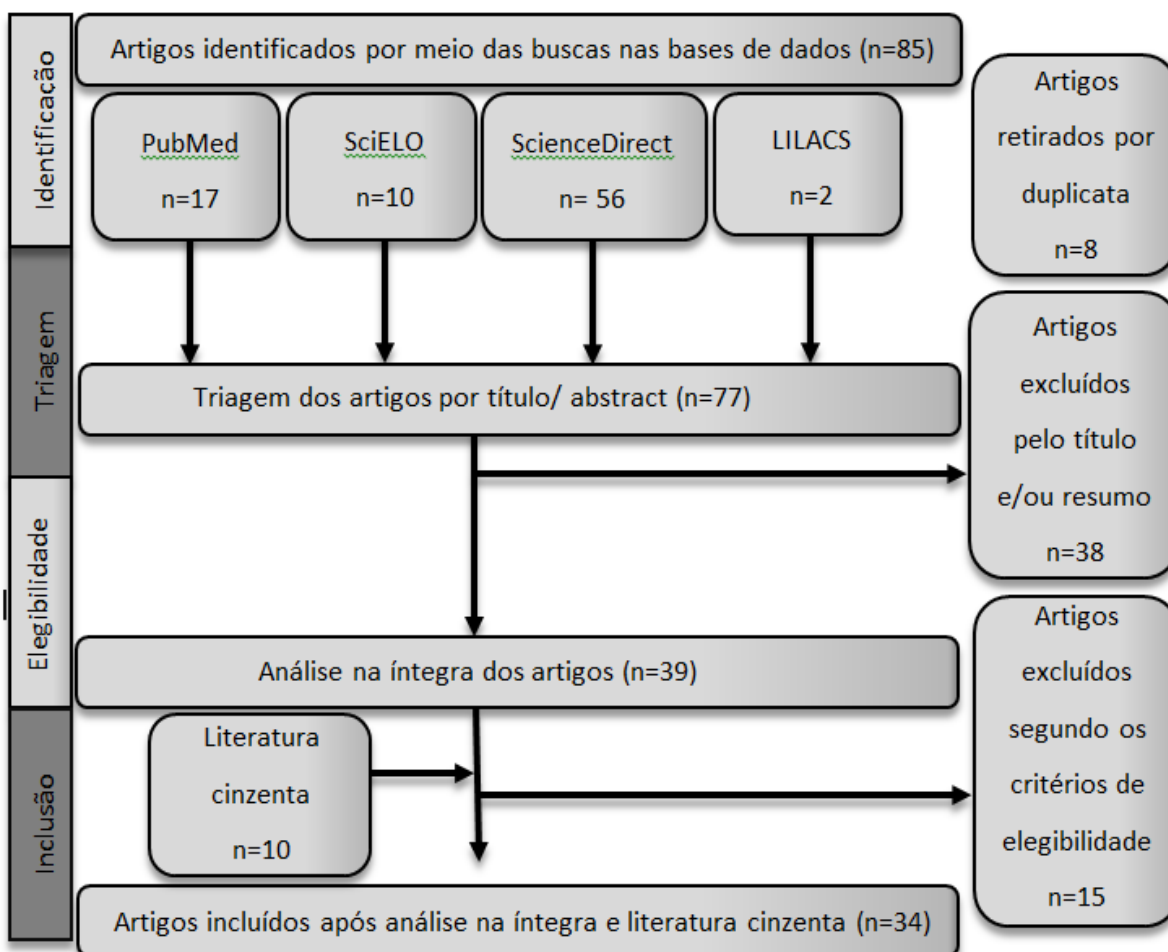
Após a pesquisa, utilizando os descritores em cada base de dados, foram encontrados 85 artigos nas quatro bases de dados

### 3 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

supracitadas. Sequencialmente, foram retiradas as publicações em duplicata (n=8); excluídos artigos, por meio da leitura do título e/ou resumo (n=38), e excluídos artigos que não atendiam aos critérios de elegibilidade ou não continham as variáveis de interesse supracitadas, a partir de sua leitura na íntegra (n=15).

Por fim, 10 artigos foram selecionados pela literatura cinzenta. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 34 artigos foram incluídos nesta revisão, conforme mostra a figura 1.

**Figura 1.** Fluxograma que resume a metodologia empregada na revisão narrativa acerca dos efeitos tóxicos que os rejeitos de minérios liberados após o rompimento da barragem de Fundão podem trazer a saúde humana e ambiental.



As características individuais dos estudos incluídos nesta revisão estão descritas, separadamente, nas tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, de acordo com os efeitos tóxicos ocasionados aos diferentes constituintes do meio ambiente e também relacionado a doenças humanas. Esses estudos foram agrupados de acordo com a similaridade do segmento de análise, independentemente do tipo de amostra analisada. Os estudos desta revisão analisaram 1) amostras de água<sup>8,9,10,13,17,18,21,22,23,24,25,26,27,28,29</sup>; 2) solo<sup>9,14,25,30,31,32,33,34</sup>; 3) sedimentos<sup>9,13,18,21,28,33,35</sup>; 4) rejeitos<sup>9,32,34,36</sup>; 5) partículas em suspensão<sup>13</sup>; 6) vegetação e plantas<sup>22,30,36,37,38,39</sup>; 7) organismos aquáticos<sup>8,17,21,35,40,41,42,43,44,45</sup>; 8) comunidade microbiana<sup>9,18,26,31,32</sup> e 9) prevalência de doenças humanas após o rompimento da barragem<sup>23,24,46,47</sup>. Nesse sentido, ressalta que a maior parte dos estudos abordaram mais de uma das variáveis citadas anteriormente. Todas as amostras analisadas nesta revisão foram coletadas no Brasil (n=34), porém, em alguns estudos, a análise dessas amostras foi realizada em parceria com outros países, como Estados Unidos (n=2), Espanha (n=2)

e Paquistão (n=1).

#### 1) Análise da água da bacia do rio Doce, após o rompimento da barragem de Fundão

Dos 15 estudos que analisaram amostras de água oriundas da bacia do Rio Doce, após o derramamento da barragem do Fundão, sete foram descritos na tabela 1, por se referirem, predominantemente, à análise de água<sup>9,10,13,25,27,28,29</sup>. Todos estes estudos demonstraram aumento nos níveis de metais pesados, principalmente de ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), alumínio (Al), cromo (Cr), cobalto (Co), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e arsênio (As) nas amostras de água. Foesch e colaboradores (2020)<sup>10</sup> demonstraram, ainda, alterações em parâmetros físico-químicos da água, como alta turbidez e coloração marrom avermelhada, devido, principalmente, ao alto teor de Fe.

#### 4 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

**Tabela 1.** Características dos artigos que analisaram amostras de água oriundas da bacia do rio Doce, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS	
Autor/ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição / Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo
Foesch et al. <sup>10</sup> , 2020, Brasil	Água	36 amostras	Coleta de abril a setembro de 2016, nos rios Gualaxo do Norte e Carmo	Amostras de água coletadas em locais não afetados dos rios	Alta turbidez. Coloração atípica. Alto teor de Fe, Mn, Cu, Cr, Ni, Cd	Alto teor de metais pesados no rio antes da falha da barragem
Quadra et al. <sup>27</sup> , 2018, Brasil, Estados Unidos	Água e Sementes de <i>Allium cepa</i>	6 meristemas (12000 células)	Sementes expostas por 24 horas em soluções de 20, 40, 60, 80 e 100% de água do rio Doce coletada próximo a Ipatinga- MG	Água coletada em um local não impactado do rio Doce, próximo a Linhares - ES	Maior concentração de metais dissolvidos (Fe, Al e Mn). Efeitos citogenotóxicos	Não especificado
Silva et al. <sup>28</sup> , 2018, Brasil	Água e sedimento	13 amostras	Coleta 6 meses após o desastre, no rio Carmo	Amostra de água e sedimentos coletados no rio Carmo antes do acidente	Aumento nos níveis de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn; Valores de As acima do permitido, podendo causar envenenamento	Alto nível de arsênio pode estar relacionado ao desenvolvimento da mineração de ouro na região
Carvalho et al. <sup>29</sup> , 2018, Brasil	Água de poço artesiano	48 amostras coletadas em 3 cidades	Coleta em julho de 2016, em poço artesiano em Belo Oriente e Governador Valadares- MG e Colatina-ES	Água indicada para irrigação e para consumo humano e animal, segundo a legislação	Água imprópria para consumo e irrigação. Concentrações de Fe, Mn e As acima do permitido pela legislação	Inexistência de estudos pré- desastre na região. Existência de fatores que podem contaminar o rio
Hatje et al. <sup>13</sup> , 2017, Brasil	Água, sedimento e partículas em suspensão	28 locais	Coleta em 2016, 75 dias após o acidente, nos rios Carmo, Piranga, Gualaxo do Norte e Doce	Amostras coletadas no rio Carmo, Piranga e Gualaxo do Norte em locais não afetados	Níveis de As e Mn acima do permitido. Maior quantidade de partículas em suspensão (Cd, Cr, Mn e Ni) detectadas nas amostras; Hg, Fe e outros elementos encontrados na fração biodisponível dos sedimentos	Altos níveis de metais na região de forma natural. Presença de outras atividades que podem contribuir para o aumento destes elementos no rio
Segura et al. <sup>9</sup> , 2016, Brasil	Água, solo, rejeitos, comunidade microbiana, Células HepG2 e Sementes de <i>Allium cepa</i>	200 células epiteliais e 5000 sementes / 44 amostras de água, solo ou lama	Células e sementes expostas por 24 horas em 15g de solo / lama ou 5 mL de água, coletados em Bento Rodrigues	Água deionizada (-) e metil-metanossulfonato (+)	Maior concentração de SiO <sub>2</sub> , Fe, Mn, Cu, Ca e Cr. Efeitos citotóxicos, genotóxicos e mutagênicos. Declínio da diversidade microbiana local	Dificuldade em identificar todos os poluentes responsáveis pelos efeitos tóxicos presentes nas amostras

## 5 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

As alterações descritas anteriormente (turbidez, coloração, concentração de metais pesados) foram mais significativas nos primeiros meses após o acidente, conforme demonstrado pelos estudos realizados por Segura e colaboradores (2016)<sup>9</sup> e Foesch e colaboradores (2020)<sup>10</sup> (tabela 1). Em relação ao Fe e ao Mn, principais metais encontrados nas amostras analisadas, o teor de Fe encontrado na água do rio Gualaxo do Norte no mês do rompimento da barragem foi de  $170 \pm 1000 \text{ mgL}^{-1}$  e de Mn foi igual a  $3600 \pm 13300$

$\text{mgL}^{-1}$ . Nos meses de abril, junho, agosto e setembro de 2016, a concentração de Fe foi de  $7,01 \text{ mgL}^{-1}$ ;  $1,71 \text{ mgL}^{-1}$ ;  $1,62 \text{ mgL}^{-1}$  e  $3,29 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente, e de Mn neste mesmo período foi igual a  $0,43 \text{ mgL}^{-1}$ ;  $0,14 \text{ mgL}^{-1}$ ;  $0,22 \text{ mgL}^{-1}$  e  $0,43 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente<sup>10</sup>. Essa redução na concentração de metais pesados presentes na água atingida pelos rejeitos de mineração ao longo do tempo também foi demonstrada por Reis e colaboradores (2020)<sup>18</sup> (tabela 2).

**Tabela 2.** Características dos artigos que analisaram alterações na comunidade microbiana, utilizando amostras de água, solo ou sedimentos oriundos da bacia do rio Doce, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS	
Autor/ ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição/ Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo
Reis et al. <sup>18</sup> , 2020, Brasil	Água, sedimento e comunidade microbiana	20 amostras	Amostras coletadas no rio do Carmo e Rio Casca, 7,30 e 150 dias após o desastre	Amostras do rio Água Fria	Concentração de Al, Fe, Mn, Mg acima do permitido. Diferenças estruturais nas comunidades microbianas de locais impactados. Presença de possíveis bioindicadores de metais pesados	Região analisada possui ocorrência natural de metais pesados
Buch et al. <sup>31</sup> , 2020, Brasil	Solo e ácaros de solo <i>Scheloribates praeincisus</i>	19 locais/ 30 ácaros	Solo coletado em 2015 e 2018; Ácaros exposto ao solo por 5 semanas	Solo artificial tropical (TAS)	Aumento da mortalidade de ácaros de acordo com com o aumento da concentração de rejeitos. Inibição da reprodução. Influência cumulativa de metais	Interferência de outros fatores
Batista et al. <sup>32</sup> , 2020, Brasil	Solo, rejeitos e comunidade microbiana	45 amostras	Amostras coletadas em dezembro de 2017, próximo ao rio Gualaxo do Norte	Solos não contaminados	Alto valor de pH. Alto conteúdo de Cu extraível. Diminuição da biomassa microbiana. Alteração na atividade enzimática de microrganismos	Não especificado
Cordeiro et al. <sup>26</sup> , 2019, Brasil	Água e Comunidade bacteriana	16 locais	Amostras coletadas no mês, 6 e 10 meses após o desastre, na bacia do rio Doce em MG e ES	Comunidade bacteriana do rio Paraguaçu	Aumento da turbidez da água. Diferenciação taxonômica da comunidade bacteriana. Aumento ou diminuição na expressão de determinados genes. Aumento na expressão de genes relacionados ao metabolismo de Fe. Presença de possíveis bioindicadores de metais pesados	Não especificado

## 6 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

Na tabela 1, ainda são descritos dois estudos que analisaram células como bioindicadores de contaminação, sugerindo o potencial tóxico dos metais pesados presentes nestes rejeitos e, conseqüentemente, nas amostras analisadas. Quadra e colaboradores (2018)<sup>27</sup> descreveram o potencial citogenotóxico a sementes de *Allium cepa*, demonstrado por meio de alterações nos índices mitóticos e de fase (aumento do índice de prófase e índices reduzidos de metáfase, anáfase e telófase) e maior frequência de aberrações cromossômicas (pontes, quebras cromossômicas, c-metáfases, segregação posterior, perda cromossômica e micronúcleos). Segura e colaboradores (2016)<sup>9</sup> identificaram os efeitos citotóxicos, genotóxicos e mutagênicos causados por amostras de água, solo e sedimentos, as sementes de *Allium cepa* e células de carcinoma hepatocelular humano (HepG2), sendo esses efeitos demonstrados pelo aumento significativo no índice de danos ao DNA e pela formação de micronúcleos.

Hatje e colaboradores (2017)<sup>13</sup> identificaram o aumento no número de partículas em suspensão (Cd, Cr, Mn, Ni) provenientes dos sedimentos do rio Carmo, atingido pelos rejeitos de minério, podendo elas se dispersarem por centenas de quilômetros, até chegar ao Oceano, conforme mostra a tabela 1.

### 2) Análise de solo, sedimentos e rejeitos de mineração encontrados na bacia do rio Doce, após o rompimento da barragem de Fundão

Os estudos<sup>14,25,33,34</sup>, conforme mostra a tabela 3, que utilizaram solo, sedimentos ou rejeitos de mineração como amostra, demonstraram aumento em seus níveis de metais pesados, principalmente de Fe, Mn e As, mas também de outros metais (Ba, Ni, Cr, Pb) e compostos (éter amina e amônio).

Queiroz e colaboradores (2018)<sup>14</sup> analisaram amostras de solo coletadas no mês de ocorrência do rompimento da barragem e identificaram um teor médio de Fe bem maior do que a concentração deste mesmo elemento em amostras coletadas no ano 2017, no estudo realizado por Davila e colaboradores (2019)<sup>33</sup>. Essas informações sugerem a redução na concentração de metais pesados nesses segmentos do meio ambiente, com o decorrer do tempo. Além disso, amostras coletadas em locais mais próximos à barragem apresentaram, conseqüentemente, níveis de metais pesados maiores, uma vez que eles se depositaram, imediatamente, no solo e também na forma de sedimentos<sup>33</sup> (tabela 3).

### 3) Análise da comunidade microbiana, após o rompimento da barragem de Fundão

Como demonstrado na tabela 2, quatro estudos<sup>18,26,31,32</sup> que analisaram a composição microbiana em amostras de água, solo ou sedimentos, demonstraram diminuição da diversidade microbiana após o rompimento da barragem de Fundão.

Em relação à análise da comunidade microbiana em amostras de

água, Reis et al. (2020)<sup>18</sup> e Cordeiro et al. (2019)<sup>26</sup> identificaram mudanças taxonômicas significativas na mesma, além de identificar bioindicadores da presença de metais pesados (membros da família *Comamonadaceae*, *Novosphingobium*, *Sediminibacterium* e *Bacteriovorax*, *Chitinophagaceae* e *Streptomycetaceae*, respectivamente), principalmente Fe e Al, e conseqüentemente da contaminação ambiental. Cordeiro e colaboradores (2019)<sup>26</sup> realizaram ainda um estudo de metagenômica da comunidade microbiana, demonstrando, principalmente, o aumento na expressão de genes relacionados ao metabolismo de Fe e genes de resistência a metais pesados.

Em relação à análise da comunidade microbiana em amostras de solo, Buch e colaboradores (2020)<sup>31</sup> identificaram efeitos deletérios dos metais na reprodução e no tempo de sobrevivência de ácaros de solo, além disso, metais como o Mn, Al e Fe foram acumulados nesses organismos. Batista e colaboradores (2020)<sup>32</sup> identificaram diminuição da biomassa microbiana no solo, além da inibição da atividade das enzimas arilsulfatase,  $\beta$ -1,4-glicosidase, fosfatase ácida e fosfatase alcalina em microrganismos.

Ainda se tratando de comunidade microbiana, Segura e colaboradores (2016)<sup>9</sup>, descrito na tabela 1, também relataram a diminuição na sua diversidade em amostras de água, solo e sedimentos, afetadas pelos rejeitos de mineração.

### 4) Análise de organismos aquáticos, após o rompimento da barragem de Fundão

A tabela 4 apresenta estudos que utilizaram organismos aquáticos como bioindicadores de contaminação ambiental, após o rompimento da barragem de Fundão. A maior parte desses estudos analisou peixes; porém, a análise de outros organismos aquáticos, tais como organismos bentônicos, também foi abordada. Entre esses estudos, destacam-se análise dos efeitos tóxicos causados a organismos coletados diretamente do rio contaminado<sup>40,41,42,43,45</sup> e organismos expostos a amostras de água contaminada<sup>8,17,21,44</sup>, além dos efeitos de metais pesados a organismos bentônicos, por meio de análise do DNA ambiental (eDNA)<sup>35</sup>.

Os cinco estudos<sup>40,41,42,43,45</sup> que analisaram o impacto causado pelos rejeitos de minério, provenientes do rompimento da barragem de Fundão, aos organismos aquáticos retirados diretamente do rio contaminado, relataram o potencial tóxico que o contato desses organismos com os metais pesados presentes nos rejeitos de mineração pode ocasionar. Entre esses efeitos, destacam-se danos morfológicos e histológicos ao fígado<sup>40</sup>, trato digestivo<sup>43</sup>, gônadas e cérebro<sup>45</sup>. Além disso, houve evidências de acúmulo de metais pesados nesses organismos em tecido muscular<sup>41</sup> e da transferência materna desses elementos para embriões<sup>45</sup>. Weber e colaboradores (2020)<sup>40</sup> identificaram, ainda, a presença de biomarcadores de estresse oxidativos, demonstrado pelo aumento na expressão das enzimas superóxido desmutase, catalase e glutathione reduzida (tabela 4).

7 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

**Tabela 3.** Características dos artigos que analisaram amostras de solo, sedimento ou rejeitos oriundos da bacia do rio Doce, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS	
Autor/ ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição / Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo
Davila et al. <sup>33</sup> , 2019, Brasil	Sedimento e solo	41 amostras	Coleta em agosto de 2017, entre Bento Rodrigues e a hidrelétrica de Candonga e também dentro da barragem	Solos e sedimentos de rios da mesma região, não afetados	Presença de metais pesados. Presença de As que pode ser carcinogênico a humanos	Solos e sedimentos de rios não contaminados também apresentavam alta concentração de metais pesados
Santos et al. <sup>25</sup> , 2019, Brasil	Solo, sedimento e água	42 amostras	Coleta em 2016, nos rios Gualaxo do Norte e Carmo	Amostras de solo, sedimentos e água coletadas em locais não afetados	Aumento de éter amina e de NH <sub>4</sub> , no solo. Erosão do solo. Água com aspecto espumoso. Aumento do pH	Não especificado
Queiroz et al. <sup>14</sup> , 2018, Solo Brasil, Espanha		6 amostras, coletadas em 4 locais diferentes	Coleta 7 dias, após o acidente, no rio Doce	Amostras de solos não contaminados	Solo com alto nível de Fe, que devido a sua alta biodisponibilidade pode levar ao risco de contaminação por metais pesados da biota. Frações de Ni e Cr acima do permitido	Não especificado
Guerra et al. <sup>34</sup> , 2017, Estados Unidos, Brasil	Solo e rejeitos	60 amostras, coletadas em 23 pontos diferentes	Coleta em novembro de 2015	Amostras de solos não contaminados	Altos níveis de As, Mn, Ba, Ni, Cr e Pb	Região já apresenta altas concentrações de metais no solo naturalmente

## 8 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

**Tabela 4.** Características dos artigos que analisaram modificações em organismos aquáticos, coletados na bacia do rio Doce ou expostos à água coletada nesta bacia, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS		
Autor/ ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição/ Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo	
Weber et al. <sup>40</sup> , 2020, Brasil	Peixes <i>Hoplias intermedius</i> e <i>Hypostomus affinis</i>	26 amostras	Coleta em março e junho de 2018, no rio Doce	Amostras coletadas no rio Piranga	Alterações hepáticas (vacúolos, necrose tecidual, hiperemia, infiltrado inflamatório). Indução na expressão de proteínas e enzimas relacionadas à contaminação por metais	Estas duas espécies de peixes são muito resistentes à contaminação, outras menos resistentes que habitam o rio Doce podem não ter sobrevivido	
Ferreira et al. <sup>41</sup> , 2020, Brasil	Peixes de 34 espécies diferentes	12 locais/ 225 peixes	Coleta em novembro de 2018 a março de 2019, nos rios Doce, Gualaxo do Norte e do Carmo	Amostras coletadas nos rios Piranga, Piracicaba e Santo Antônio	Maior concentração de As e Hg no tecido muscular dos peixes	Não foram coletados indivíduos de todas as espécies nos locais afetados	
Andrades et al. <sup>42</sup> , 2020, Brasil	Peixes ( <i>Ctenogobius boleosoma</i> , <i>Eleotris pisonis</i> , <i>Eucinostomus argenteus</i> , <i>Evorthodus lyricus</i> , <i>Genidens genidens</i> e <i>Microphis lineatus</i> )	38 amostras	Coleta em julho de 2016, em Regência-ES	Amostras coletadas em novembro de 2015 em Regência-ES	Aumento sutil no comprimento da cadeia alimentar. Diminuição da diversidade trófica	Impactos induzidos pelo homem podem afetar a cadeia trófica	
Macêdo et al. <sup>8</sup> , 2020, Brasil	Água e Peixes <i>Astyanax lacustris</i>	4 locais/ 100 peixes	Coleta em julho de 2018/ Peixes expostos por 7 dias em 2,5L de água	Peixes expostos a 2,5L de água de torneira clorada	Aumento nas concentrações de Mn, Cd, As, Cu, Cr na água. Alterações histológicas no fígado e brânquias dos peixes. Modulação de interrupção do equilíbrio iônico, respostas celulares ao estresse e vias de desintoxicação celular	Presença de outros contaminantes no rio	
Passos et al. <sup>21</sup> , 2020, Brasil	Água, sedimento e Peixes <i>Astyanax lacustris</i>	400L/ 100g / 30 peixes	Coleta em novembro de 2018, no rio Doce / Peixes expostos por 21 dias a 4L de água + sedimentos	Peixes expostos a água de fornecimento urbano	Inibição da enzima acetilcolinesterase. Bioacumulação de Mn no fígado e nas brânquias e de Fe no fígado.	Não especificado	
Gomes et al. <sup>17</sup> , 2019, Brasil	Água e Peixes <i>Geophagus brasiliensis</i> jovens	24 peixes / 80 L de água	Peixes expostos por 96 horas em 5 litros de água do rio Doce coletada em Colatina - ES	Água do sistema urbano de abastecimento. Água do rio Doce antes do afluxo de rejeitos	Maior concentração de metais dissolvidos (Fe, Mn), Cd, Cu e Pb na água do rio Doce. Efeitos genotóxicos para os peixes	A água do rio Doce já era genotóxica antes do acidente	



9 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS		
Autor/ ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição/ Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo	
Bonecker et al. <sup>43</sup> , 2019, Brasil	Larvas de peixes ( <i>Carangidae</i> , <i>Sciaenidae</i> , <i>Gobiidae</i> , <i>Monacanthidae</i> , <i>Clupeidae</i> , <i>Engraulidae</i> , <i>Chloroscombrus chrysurus</i> , <i>Gerreidae</i> , <i>Eucinostomus spp.</i> , <i>Labridae</i> )	4182 larvas de peixes / 48 estações	Coleta em janeiro, fevereiro e abril de 2016, próximo à foz do rio Doce	Larvas de peixes da mesma espécie, coletadas nos mesmos locais, mas sem nenhum dano	Presença de sedimentos avermelhados aderidos ao corpo de algumas larvas. Tratos digestivos danificados. Maior concentração de metais pesados em larvas contaminadas	Dificuldade para determinar como os organismos foram contaminados e em qual parte do corpo a concentração de metais era maior, devido ao pequeno tamanho dos organismos	
Coppo et al. <sup>44</sup> , 2018, Brasil	<i>Oreochromis niloticus</i>	32 <i>Oreochromis niloticus</i> jovens	Peixes expostos por 96 horas a diferentes concentrações de Mn dissolvido	Peixe com ciclofosfamida (CPM) injetada (+). Concentração de Mn igual a 0 mg/L (-)	Efeitos genotóxicos e mutagênicos (formação de micronúcleos eritrocitários e aumento no índice de danos ao DNA)	Pode haver sinergia entre outros metais	
Bernardino et al. <sup>35</sup> , 2018, Brasil	Sedimento e comunidades bentônicas do estuário do rio Doce	33 amostras coletadas em 22 locais	Coleta em agosto de 2017, no rio Doce	Comunidade bentônica comum do rio Doce	Assembleia dominante típica de outros ecossistemas estuarinos. Alto teor de Fe nos sedimentos. Filtragem ambiental. Mudanças nas unidades taxonômicas dominantes. Assembleias bentônicas altamente sensíveis à contaminação crônica por metais	Não especificado	
Lopes et al. <sup>45</sup> , 2016, Brasil	Peixes <i>Narcine brasiliensis</i>	4 fêmeas grávidas que deram origem a 18 filhotes	Peixes coletados em 2017, a cerca de 300 km da foz do rio Doce, em Marataízes- ES	Não especificado	Concentrações elevadas de Al, Cd, Hg e Ni, Ag, Hg e Pb nas amostras. Identificação de Al e Pb nas gônadas (afeta a reprodução). Metais no cérebro (altera a sinalização elétrica). Transferência materna de vários elementos para embriões de <i>N. brasiliensis</i>	Não foram analisados <i>Narcine brasiliensis</i> machos. Todas as amostras foram coletadas em um único local	

Os quatro estudos<sup>8,17,21,44</sup> que analisaram a exposição de peixes a amostras coletadas em diferentes locais ao longo da bacia do rio Doce, apresentados na tabela 4, relataram o potencial tóxico dessas amostras a esses organismos. Entre esses efeitos, destacam-se, também, danos histológicos ao fígado e brânquias, caracterizados por alterações vasculares (hiperemia), hipertrofia celular e nuclear de hepatócitos, formação de vacúolos, degeneração citoplasmática e ausência de núcleo nas células no fígado e desorganização das lamelas secundárias, levantamento epitelial nas brânquias<sup>8</sup>, além da bioacumulação de metais pesados em diversos órgãos<sup>21</sup>.

Além disso, três estudos identificaram alteração na expressão de moléculas. Macêdo e colaboradores (2020)<sup>8</sup> identificaram aumento na expressão da proteína HSP70 (mediador de estresse celular) e diminuição da expressão da proteína gp-P (importante na imunidade inata, como via de desintoxicação celular). Passos e colaboradores (2020)<sup>21</sup> identificaram inibição da enzima acetilcolinesterase, responsável por hidrolisar o neurotransmissor acetilcolina, impedindo impulsos nervosos contínuos. Coppo e colaboradores (2018)<sup>44</sup> demonstraram aumento na atividade das enzimas glutatona-S-transferase no fígado e catalase nas brânquias (tabela 4).

Efeitos genotóxicos também foram observados em peixes expostos à água contaminada por rejeitos de mineração. Gomes e colaboradores (2019)<sup>17</sup> e Coppo e colaboradores (2018)<sup>44</sup> demonstraram essa genotoxicidade por meio do aumento no número de micronúcleos eritrocitários e aumento no índice de danos ao DNA em peixes *Geophagus brasiliensis* e *Oreochromis niloticus*, respectivamente (tabela 4).

Bernardino e colaboradores (2018)<sup>35</sup>, a partir da análise de eDNA de organismos bentônicos (organismos que vivem associados

ao substrato marinho) presentes em sedimentos coletados na bacia do rio Doce, identificaram mudanças taxonômicas na comunidade bentônica de locais atingidos pelos rejeitos de minério, além de relatar uma espécie de filtragem ambiental devido à presença dos metais pesados, principalmente Fe, uma vez que eDNA de espécies mais sensíveis a essa contaminação não foi identificado. Andrades e colaboradores (2020)<sup>42</sup> também relataram perda da biodiversidade de peixes após o acidente (tabela 4).

### **5) Análise de plantas e da vegetação local, após o rompimento da barragem de Fundão**

A tabela 5 aborda seis estudos que analisaram o crescimento de plantas de pequeno porte em solos ou sedimentos afetados pelos rejeitos de mineração, bem como análise da perda de vegetação local, após o rompimento da barragem de Fundão.

Inicialmente, tratando-se de estudos com plantas de pequeno porte, Gimenes e colaboradores (2020)<sup>22</sup>, Coelho e colaboradores (2020)<sup>30</sup> e Esteves e colaboradores (2020)<sup>36</sup> cultivaram diversas plantas em solo contaminado, rejeitos e solo com adição de diferentes concentrações de Mn e Al, respectivamente. Os estudos identificaram o acúmulo de metais pesados em diferentes tecidos vegetais, comprometendo o crescimento dessas plantas e ocasionando fitotoxicidade.

Três estudos envolvendo a vegetação local<sup>37,38,39</sup> identificaram a perda da vegetação ribeirinha, após a passagem dos rejeitos de minério. Essa perda foi resultado, principalmente, da força com que a lama de rejeitos atingiu a vegetação. Além disso, esses estudos demonstraram efeitos, como a cobertura do solo local pelos rejeitos de mineração, menor reflexão de luminosidade, perda de área de sombra e destruição de áreas de pastagens.

**Tabela 5.** Características dos artigos selecionados que analisaram alterações no crescimento de plantas e na vegetação, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS		
Autor/ localidade	ano/ Amostra analisada	Tamanho da amostra	Condições de exposição/ Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo	
Coelho et al. <sup>30</sup> , 2020, Brasil	Solo e plantas ( <i>Brachiaria decumbens</i> , <i>Stylosanthes guianensis</i> e <i>Saccharum officinarum</i> );	4 locais	Coleta em agosto de 2018, em Paracatu de Baixo - MG	Amostras coletadas em áreas não afetadas	Aumentos nos teores de Fe, Mn, Cu e Cr no solo e em vários tecidos vegetais. Comprometimento do crescimento da planta e de suas raízes. Alta densidade do solo	Amostras coletadas na mesma região, dificultando a extensão do estudo para outros locais afetados	
Gimenes et al. <sup>22</sup> , 2020, Brasil	Água e plantas <i>Ricciocarpus natans</i>	12 amostras de água / 10 plantas	Coleta em abril de 2016, no rio Gualaxo do Norte / Plantas expostas por 30 dias a diferentes concentrações de Al ou Mn	Amostras de água do reservatório Fazzari / crescimento normal de <i>R. natans</i> .	Presença de Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni e Cr na água. Efeitos deletérios nos metabolismos de crescimento de <i>R. natans</i> . Fitotoxicidade	Avaliação de somente dois dos metais presentes nos rejeitos (Al e Mn)	
Esteves et al. <sup>36</sup> , 2020, Brasil	Rejeitos, milho, milheto e sorgo	8 amostras de rejeitos / 54 vasos de plantas	Coleta em Mariana-MG / Plantas cultivadas por 50 dias nas amostras de rejeitos	Solo coletado em local sem evidência de contaminação por metais	Alta densidade dos rejeitos. Alcalinidade. Baixa concentração de Mg, Al e de matéria orgânica. Teor de Mn, Fe e Cr acima dos níveis permitidos. Presença de Cr nas raízes das plantas. Diminuição do comprimento, conteúdo de clorofila e comprimento radicular de plantas cultivadas em rejeitos	Não especificado	
Omachi et al. <sup>37</sup> , 2018, Brasil	Vegetação	1839,5 hectares	Coleta de dados em agosto de 2016, entre a barragem e a hidrelétrica de Candonga	Vegetação ribeirinha, entre a barragem e a hidrelétrica de Candonga antes do rompimento da barragem	Perda de aproximadamente 457,6 hectares de vegetação florestal	Metodologia digital limitada	
Junior Silva et al. <sup>38</sup> , 2018, Brasil, Paquistão	Vegetação	9893 hectares	Coleta de dados em julho de 2016, entre os municípios de Mariana a Pedras- MG	Imagens da vegetação local anterior (gramíneas, ciperáceas, árvores de médio e alto porte), coletadas em 2014	Perda de aproximadamente 1289 hectares de vegetação local. Perda de aproximadamente 1347 hectares de área de sombra	Metodologia digital limitada	
Aires et al. <sup>39</sup> , 2018, Brasil	Vegetação	Área de 1578 km <sup>2</sup> de vegetação	Coleta de dados em novembro de 2015, entre os municípios de Mariana e Barra Longa- MG	Imagens coletadas em outubro de 2015	Perda de: 11,99 km <sup>2</sup> de vegetação (1,37%); 4,81 km <sup>2</sup> de pastagem (0,92%); 2,66 km <sup>2</sup> de recursos hídricos (8,7%); 1,55 km <sup>2</sup> de área urbana (4,52%). Ganho de 21,02 km <sup>2</sup> de rejeitos (33,33%)	Metodologia digital limitada. Dificuldade em identificar a perda de recursos hídricos, devido aos pixels do equipamento utilizado	

### 6) Análise do aumento nos casos de doenças que acometem a população residente em locais afetados pelos rejeitos de mineração oriundos do rompimento da barragem de Fundão

Aqui foi abordada a prevalência de doenças que acometem seres humanos, destacando-se a população residente próximo aos locais atingidos pelos rejeitos de mineração, após o rompimento da barragem de Fundão (tabela 6).

Os estudos realizados por Dos Reis et al. (2019)<sup>23</sup> e Fongaro et al. (2019)<sup>24</sup> identificaram a prevalência, significativamente, alta de vírus entéricos (Adenovírus Humano (HAdV) e vírus da Hepatite vírus entéricos (Adenovírus Humano (HAdV) e vírus da Hepatite A (VHA) nas amostras de água de locais afetados pelos rejeitos de mineração. Esses vírus podem causar graves problemas respiratórios e infecções gastrointestinais,

respectivamente, à pessoa infectada, sendo esses microrganismos eliminados nas fezes.

Outros dois estudos<sup>46,47</sup> tomaram como amostra membros da população, residentes em locais afetados pelos rejeitos de mineração (tabela 6). Nishijima e Rocha (2019)<sup>46</sup> descreveram o aumento no número de casos, no número de internações e na probabilidade de surto de dengue nos municípios afetados pelo acidente, tomando como base esses mesmos parâmetros de anos anteriores ao rompimento da barragem. Vormittag e colaboradores (2019)<sup>47</sup> relataram aumento no número de casos de diversas doenças, entre as quais se destacam doenças respiratórias, de pele, oculares, gastrointestinais, transtornos mentais e comportamentais. Notificações de lesões na pele e alergias, aumento nos casos de depressão e problemas intestinais foram destaques neste estudo. Esses sintomas caracterizam, claramente, intoxicação por metais pesados.

**Tabela 6.** Características dos artigos selecionados que analisaram o aumento nos casos de doenças humanas, após o derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão, em Mariana-MG.

ESTUDO		MÉTODO			RESULTADOS	
Autor/ ano/ localidade	Amostra analisada	Tamanho amostra	da Condições de exposição/ Período de coleta	Grupo controle	Descrição dos efeitos tóxicos	Limitações do estudo
Nishijima e Rocha <sup>46</sup> , 2020, Brasil	Casos de dengue em 453 municípios localizado a um raio de 100 km ou 500 km de Mariana- MG	453 municípios da região Sudeste	Análise realizada em 2016	Casos de dengue registrados no ano de 2014, em 1215 municípios da região Sudeste	Maior incidência, maior número de internações e maior probabilidade de surto de dengue após o desastre	Aumento das chuvas no período após o rompimento da barragem pode ter contribuído para o aumento dos casos de dengue
Dos Reis et al. <sup>23</sup> , 2019, Brasil	Água	27 locais	Análise das estações mensalmente de julho de 2016 a junho de 2017, no rio Gualaxo do Norte	Água coletada em locais não afetados	Nível de Fe e Mg superiores aos limites recomendados. Presença de Adenovírus Humano (HAdV) detectada nas amostras analisadas.	Falta de saneamento no local
Fongaro et al. <sup>24</sup> , 2019, Brasil, Espanha	Água	45 amostras coletadas em 5 locais diferentes	Amostras coletadas 6 meses após o acidente, a jusante da barragem	Amostras de água coletadas a montante da barragem, em locais não afetados	Aumento na concentração de Fe e maior turbidez na água. Prevalência significativamente alta de adenovírus humano (HAdV) e vírus da hepatite A (HAV) em amostras de água	Vírus entéricos são eliminados nas fezes, e a região não possui sistema de saneamento adequado, o que aumenta a taxa de ocorrência destes vírus
Vormittag et al. <sup>47</sup> , 2018, Brasil	Surgimento de doenças e mudanças comportamentais em 507 moradores de Barra Longa	507 questionários	Questionários aplicados em outubro de 2016	Surgimento de doenças no período anterior ao desastre	Relato no aumento de doenças respiratórias, de pele, transtornos mentais e comportamentais, oculares, gástricas e intestinais. Sintomas mencionados caracterizam intoxicação por As	População analisada constituída de pessoas de baixo nível socioeconômico, estando constantemente expostas a diversos tipos de poluentes locais

## DISCUSSÃO

Todos os 34 estudos abordados ao longo desta revisão sugeriram o potencial tóxico causado pela contaminação de segmentos do meio ambiente, como água, solo, sedimentos, organismos aquáticos, plantas, além da consequente contaminação dos seres humanos residentes próximos ao local do rompimento da barragem de Fundão. Essa contaminação se deu, principalmente, por ação dos metais pesados presentes nos rejeitos de mineração, elementos esses que foram encontrados em altas concentrações em amostras analisadas após o rompimento da barragem.

A água presente na bacia do rio Doce foi diretamente afetada pelos rejeitos de mineração, aumentando, conseqüentemente, os níveis de metais pesados nesta porção do meio ambiente. Esse evento impossibilita a utilização da água para consumo humano, bem como para atividades agrícolas<sup>29</sup>. Além disso, pode afetar outros organismos que estão diretamente em contato com esta água, como é o caso dos peixes e outros organismos aquáticos, afetando diretamente a biodiversidade local, bem como a saúde humana, via cadeia alimentar<sup>19,20</sup>.

A deposição de rejeitos de minério no solo e, conseqüentemente, o aumento dos níveis de metais pesados podem levar a processos de erosão, à diminuição da fertilidade, senescência<sup>25</sup>, além da transferência desses metais para plantas cultivadas nesses solos, levando a bioacumulação e causando danos à saúde dos seres humanos, via ingestão alimentar, como relatado por Guo et al. (2020)<sup>48</sup>.

A presença de metais pesados na água ou no solo pode suprimir ou, até mesmo, matar partes sensíveis da comunidade microbiana, reduzindo sua diversidade e alterando sua estrutura, função, resistência a metais pesados, causando a perda de grande parte de membros da comunidade microbiana não adaptados ao estresse causado devido à presença de metais pesados no ambiente<sup>49</sup>. Evidencia-se, portanto, que alterações na comunidade microbiana, bem como a perda de sua diversidade, como observado nos estudos incluídos nesta revisão sugerem que ocorreu a contaminação da água e do solo por metais pesados, após a liberação de rejeitos de mineração.

A utilização de peixes como bioindicadores de contaminação aquática é comum, uma vez que eles estão em contato direto com contaminantes presentes na água<sup>50</sup>. As altas concentrações de metais pesados encontrados nas amostras de peixes analisadas, provavelmente, originaram-se dos rejeitos presentes na água e são os principais responsáveis pelos efeitos tóxicos causados a esses organismos, uma vez que metais podem levar a efeitos letais, subletais e efeitos citogenotóxicos em peixes<sup>50,51</sup>. Alterações na expressão de algumas enzimas decorrentes da ação de metais pesados já são conhecidas, como é o caso das enzimas superóxido desmutase, catalase e glutathione reduzida, que são marcadores de estresse oxidativo decorrentes de contaminação ambiental<sup>52,53</sup>. Alterações na expressão dessas

enzimas nos estudos dessa revisão podem ser explicados pela capacidade de formação de espécies reativas de oxigênio, desencadeada por ação dos metais pesados<sup>54</sup>. Alterações na expressão de proteínas, como aumento na expressão de HSP70 e diminuição na expressão de gp-P também foram observadas nos estudos desta revisão, indicando alterações celulares e presença de contaminantes tóxicos aos organismos aquáticos na água (proteína regulada negativamente por metais pesados), respectivamente<sup>55,56</sup>. Ademais, a diminuição na expressão da enzima acetilcolinesterase, que também foi observada ao longo desta revisão, pode ser resultado da presença de Mn na água, uma vez que, em altas concentrações, pode levar a alterações sinápticas e no sistema nervoso central<sup>57</sup>, além do mais, Oliveira e colaboradores (2014)<sup>58</sup> demonstraram esse mesmo efeito de inibição a organismos aquáticos expostos a outros metais pesados (Cu, Zn, Pb e Cd e Óxido de ferro).

Existem, ainda, diversas alterações histológicas em peixes que sugerem a contaminação ambiental, como alterações nas brânquias, que funcionam como mecanismo de defesa contra a entrada de agentes tóxicos ao organismo<sup>59</sup>; alterações hepáticas, que se devem, principalmente, ao fígado ser um órgão de desintoxicação em que a maioria das substâncias químicas passam antes de serem metabolizadas<sup>60</sup>; e alterações reprodutivas, visto que metais podem afetar a motilidade espermática e causar diminuição de níveis estrogênicos e secreção androgênica em peixes<sup>61,62</sup>.

Os metais pesados possuem, ainda, a capacidade de inibir o crescimento de plantas, podendo esses elementos, em altas concentrações, levar a efeitos tóxicos, como clorose, necrose e a fitotoxicidade<sup>63</sup>. A perda da vegetação de grande porte diminui, também, a área de sombra, podendo ocasionar a compactação do solo, aumentando sua densidade e dificultando a captação de água pelas raízes das plantas, impactando, também, seu crescimento<sup>64</sup>.

Ademais, os estudos que analisaram aumento nos casos de doenças humanas chamaram a atenção para outra externalidade negativa do rompimento da barragem de Fundão: a propagação de doenças humanas<sup>46</sup>. Em relação a doenças entéricas, sabe-se que esses vírus podem ser fixados a partículas sólidas eletropositivas (Fe), aumentando sua estabilidade e protegendo-os de fatores de inativação<sup>65</sup>. Portanto, a alta concentração de metais pesados, presentes na lama de rejeitos, aumentou a persistência desses vírus nos locais contaminados, aumentando, conseqüentemente, a chance de contaminação da população local.

Estudos demonstram que a intoxicação por metais pesados pode levar a diversas patologias, como dermatite, problemas respiratórios, doenças gastrointestinais, distúrbios neurológicos, hepatomegalia, doenças renais, problemas cardíacos, desordens genéticas, câncer e envenenamento<sup>66,67,68,69</sup>. E

entre os principais riscos ocasionados por metais pesados à saúde humana destaca-se o potencial carcinogênico desses elementos<sup>69</sup>.

Após quase cinco anos do rompimento da barragem de Fundão, muito dos efeitos causados pelos rejeitos de minério lançados ao meio ambiente ainda são desconhecidos. A situação ainda se agrava, uma vez que, no ano de 2019, a barragem da Mina Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho-MG, também se rompeu, causando, novamente, a liberação de rejeitos ao meio ambiente e trazendo novas incertezas sobre a toxicidade a longo prazo desta contaminação<sup>70</sup>.

É notória a contaminação da fauna e flora da região afetada pelos rejeitos de minério provenientes do rompimento da barragem de Fundão, uma vez que houve aumento nos níveis de metais pesados na água e no solo, principalmente. Porém, quanto à saúde da população afetada, os estudos ainda são escassos, ressaltando que o consumo da água ou de plantas cultivadas em solo contaminado pode levar à contaminação humana. Destacando-se, assim, a importância de se buscar evidências científicas já existentes, assim como a coleta de novos dados científicos que corroborem a real dimensão da contaminação após o rompimento da barragem de Fundão.

No entanto, é importante salientar as limitações que perpassam os estudos abordados ao longo desta revisão. Quanto aos estudos que analisaram amostras de água, solo e sedimentos, uma grande limitação foi a composição química da região afetada pelos rejeitos de mineração, uma vez que a região em que ocorreu o acidente vem sendo explorada com a atividade mineradora desde o século XVII, fazendo que o solo dessa região ficasse rico naturalmente em metais pesados<sup>1,71</sup>. Além disso, outras atividades, como o lançamento de efluentes industriais no rio, lançamento de esgoto sem tratamento e a agropecuária extensiva, podem aumentar os níveis de metais pesados na água<sup>71</sup>. Adicionalmente, a presença de outros contaminantes no rio pode ter sido responsável por parte dos efeitos tóxicos observados em peixes e outros bioindicadores. Quanto às análises *in silico* da vegetação, uma limitação foi a capacidade

de detecção dos equipamentos utilizados. Quanto às limitações dos estudos que analisaram o aumento nos casos de doenças humanas, destacaram-se aspectos, como a falta de saneamento básico na região afetada e o baixo nível socioeconômico da população de análise, que estava, constantemente, exposta a diversos contaminantes, aumentando os riscos de contaminação.

## CONCLUSÃO

Todas as evidências científicas expostas na presente revisão sugerem a contaminação ambiental, bem como da população local por agentes tóxicos presentes nos rejeitos de minério liberados após o rompimento da barragem de Fundão, em especial, os metais pesados. Entre esses efeitos nocivos, destacam-se a contaminação da água, do solo, da comunidade microbiana, de organismos aquáticos, da vegetação, assim como de moradores residentes próximos ao local afetado.

Este estudo serve de alerta para os possíveis efeitos tóxicos que o rompimento de barragens, como a de Fundão, pode ocasionar ao meio ambiente, como à saúde da população, podendo, também, servir de base para entender os riscos da contaminação em outros locais afetados por rejeitos de mineração. No entanto, é essencial a busca por novos dados científicos que visem esclarecer os efeitos tóxicos crônicos decorrentes dos rejeitos de minério causados ao meio ambiente e à saúde humana, visto que muitos deles são, até o presente momento, desconhecidos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Centro-Oeste Dona Lindu, pelo apoio e suporte. Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – número de concessão 88887.124083/2016-00 e código de financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - número de concessão CNPq 405822/2016-2.

## REFERÊNCIAS

1. Xu F, Hu B, Li J, Cui R, Liu Z, Jiang Z, et al. Reassessment of heavy metal pollution in riverine sediments of Hainan Island, China: sources and risks. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018 Jan; 25(2): 1766–1772. doi: 10.1007/s11356-017-0562-5. PubMed. PMID: 29101701.
2. Agência Nacional de Águas. Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce – Rompimento da barragem de Mariana. [Internet]. Brasília: ANA, Superintendência de Planejamento dos Recursos Hídricos – SPR; 22 Mar 2016 [acesso 2020 Jun 9]. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce\\_22\\_03\\_2016v2.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf).
3. Passos FL, Coelho P, Dias A. (Des) territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. *Cad. Metrop.* [Internet]. 2017 Jan-Abr [acesso 2020 Jul 15]; 19(38): 269-297. doi: <https://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2017-3811>. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cm/v19n38/2236-9996-cm-19-38-0269.pdf>.
4. Silva APMD, Viana JP, Cavalcante ALB. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: Relatório de Pesquisa IPEA [Internet]. Brasília: IPEA; 2012 Ago [acesso 2020 Ago 11]. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814\\_relatorio\\_atividade\\_mineracao.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814_relatorio_atividade_mineracao.pdf).
5. Cardozo FAC, Pimenta MM, Zingano AC. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração—uma revisão. *Holos*. 2016 Dez; 8: 77-85. doi: 10.15628/holos.2016.5367.
6. Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão e manejo de rejeitos de mineração [Internet]. Brasília: IBRAM; 2016 [acesso 2020 Jul 2]. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>.
7. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre

## 15 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais [Internet]. Brasília: IBAMA; 2015 Nov [acesso 2020 Jun 22]. Disponível em: <https://jornalismosocioambiental.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminar-do-ibama-sobre-mariana.pdf>.

8. Macêdo AKS, Santos KPE, Brighenti L, Windmüller CC, Barbosa FAR, Ribeiro RIMA, et al. Histological and molecular changes in gill and liver of fish (*Astyanax lacustris* Lütken, 1875) exposed to water from the Doce basin after the rupture of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. *Sci Total Environ*. 2020 May; 735: 139505. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139505>.

9. Segura FR, Nunes EA, Paniz FP, Paulelli ACC, Rodrigues GB, Braga GUL, et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environ Pollut*. 2016 Nov; 218: 813-825. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>. PubMed PMID: 27524249.

10. Foesch MDS, Francelino MR, Rocha PA, Gomes ARL. River Water Contamination Resulting from the Mariana Disaster, Brazil. *Floresta Ambient [Internet]*. 2020 Jun [acesso 2020 Ago 12]; 27(4): e20180132. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.013218>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2179-80872020000400102&lng=pt&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2179-80872020000400102&lng=pt&nrm=iso).

11. Escobar H. Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil. *Science*. 2015 Dec; 350(6265): 1138-1139. doi: [10.1126/science.350.6265.1138](https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1138). PubMed PMID: 26785449.

12. Fernandes GW, Goulart FF, Ranieri BD, Coelho MS, Dales K, Boesche N, et al. Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Science*. 2016 Jul-Dec; 352(6265): 35-45. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1251138>.

13. Hatje V, Pedreira RM, Rezende CE, Schettini CAF, Souza GC, Marin DC, et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Sci. Rep*. 2017 Sep; 7(1). doi: [10.1038/s41598-017-11143-x](https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x).

14. Queiroz HM, Nóbrega GN, Ferreira TO, Almeida LS, Romero TB, Santaella ST, et al. The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination? *Sci Total Environ*. 2018 Oct; 637-638: 498-506. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.370](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370). PubMed PMID: 29754084.

15. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Monitoramento da qualidade das águas superficiais do Rio Doce no Estado de Minas Gerais [Internet]. Minas Gerais: IGAM; 2015 Dez [acesso 2020 Abr 24]. Disponível em: [http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2015\\_ARQUIVOS/QUALIDADE\\_RIO\\_DOCE/2Relatorio\\_Qualidade\\_15\\_Dez.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2015_ARQUIVOS/QUALIDADE_RIO_DOCE/2Relatorio_Qualidade_15_Dez.pdf).

16. Bianchini A. Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação. 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPISUL/ICMBio [Internet]. Brasília: FURG; 2016 Abr 28. [acesso 2020 Fev 13]. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/DCOM\\_relatorio\\_revisado\\_atualizado\\_29\\_04\\_2016\\_AB.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/DCOM_relatorio_revisado_atualizado_29_04_2016_AB.pdf).

17. Gomes LC, Gomes ARC, Miranda TO, Pereira TM, Merçon J, Davel VC, et al. Genotoxicity effects on *Geophagus brasiliensis* fish exposed to Doce River water after the environmental disaster in the city of Mariana, MG, Brazil. *Braz. J. Biol. [Internet]*. 2019 Nov [acesso 2020 Jul 13]; 79(4): 659-664. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-69842019000400659](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842019000400659). doi: [10.1590/1519-6984.188086](https://doi.org/10.1590/1519-6984.188086).

18. Reis MP, Suhadolnik MLS, Dias MF, Ávila MP, Motta AM, Barbosa FAR, et al. Characterizing a riverine microbiome impacted by extreme disturbance caused by a mining sludge tsunami. *Chemosphere*. 2020 Aug; 253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126584>.

19. Gwimbi P, Kotelo T, Selimo MJ. Heavy metal concentrations in sediments and *Cyprinus carpio* from Maqalika Reservoir –Maseru, Lesotho: An analysis of potential health risks to fish consumers. *Toxicol. Rep*. 2020 Mar; 7: 475-479. doi: [10.1016/j.toxrep.2020.03.005](https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.03.005).

20. Arisekar U, Shakila RJ, Shalini R, Jeyasekaran G. Human health risk

assessment of heavy metals in aquatic sediments and freshwater fish caught from Thamirabarani River, the Western Ghats of South Tamil Nadu. *Marine Poll Bull*. 2020 Oct; 159: 111496. doi: [10.1016/j.marpolbul.2020.111496](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111496).

21. Passos LS, Gnocchi KG, Pereira TM, et al. Is the Doce River elutriate or its water toxic to *Astyanax lacustris* (Teleostei: Characidae) three years after the Samarco mining dam collapse? *Sci Total Environ*. 2020 Sep; 736: 139644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139644>.

22. Gimenes LLS, Freschi GPG, Júnior IB, Santino MBC. Growth of the aquatic macrophyte *Ricciocarpos natans* (L.) Corda in diferente temperatures and in distinct concentrations of aluminum and manganese. *Aquat Toxicol*. 2020 Jul; 224: 105484. doi: [10.1016/j.aquatox.2020.105484](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105484). PubMed PMID: 32380302.

23. Dos Reis DA, Fongaro G, Lanna MCS, Dias LCP, Santiago AF. The Relationship Between Human Adenovirus and Metals and Semimetals in the Waters of the Rio Doce, Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2019 Jul; 77(1): 144-153. doi: [10.1007/s00244-019-00625-w](https://doi.org/10.1007/s00244-019-00625-w). PMID: 30976887.

24. Fongaro G, Viancelli A, Reis D, Santiago AF, Hernández M, Michellon W, et al. Mineral waste containing high levels of iron from an environmental disaster (Bento Rodrigues, Mariana, Brazil) is associated with higher titers of enteric viruses. *Food Environ Virol*. 2019 Jun; 11 (2): 178-183. doi: [10.1007/s12560-019-09373-5](https://doi.org/10.1007/s12560-019-09373-5). PubMed PMID: 30747345.

25. Santos OSH, Avellar FC, Alves M, Trindade RC, Menezes MB, Ferreira MC, et al. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. *J Environ Qual*. 2019 Mar; 48(2): 439-449. doi: [10.2134/jeq2018.04.0168](https://doi.org/10.2134/jeq2018.04.0168). PubMed PMID: 30951136.

26. Cordeiro MC, Garcia GD, Rocha AM, Tschoeke DA, Campeão ME, Appolinario LR, et al. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster. *Sci Total Environ*. 2019 Mar; 664: 1209-1217. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.112). PubMed PMID: 30841395.

27. Quadra GR, Roland F, Barros N, Malm O, Lino AS, Azevedo GM, et al. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. *Chemosphere*. 2019 Jan; 215: 753-757. doi: [10.1016/j.chemosphere.2018.10.104](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.104). PubMed PMID: 30347368.

28. Silva DC, Bellato CR, Neto JOM, Fontes M PF. Trace elements in river waters and sediments before and after a mining dam breach (Bento Rodrigues, Brazil). *Quím Nova [Internet]*. 2018 Aug [acesso 2020 Ago 18]; 41(8): 857-866. doi: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170252>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422018000800857](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422018000800857).

29. Carvalho GO, Pinheiro AA, Sousa DM, Padilha JA, Souza JS, Galvão PM, et al. Metals and Arsenic in Water Supply for Riverine Communities Affected by the Largest Environmental Disaster in Brazil: The Dam Collapse on Doce River. *Orbital [Internet]*. 2018 Jun [acesso 2020 Jul 15]; 10(4). doi: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v10i4.1081>. Disponível em: <http://www.orbital.ufms.br/index.php/Chemistry/article/view/1081/pdf>.

30. Coelho DG, Marinato CS, Matos LP, Andrade HM, Silva VM, Neves PHS, Oliveira JA. Evaluation of heavy metals in soil and tissues of economic interest plants grown in sites affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Integrated Environ Assess Manag*. 2020 Feb; 1-12. doi: <https://doi.org/10.1002/ieam.4253>.

31. Buch AC, Sautter KD, Marques ED, Silva-Filho EV. Ecotoxicological assessment after the world's largest tailing dam collapse (Fundão dam, Mariana, Brazil): effects on oribatid mites. *Environ Geochem Health*. 2020 Nov; 42(11): 3735-3595. doi: [10.1007/s10653-020-00593-4](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00593-4). PubMed PMID: 32409973.

32. Batista ER, Carneiro JJ, Pinto FA, Santos JV, Carneiro MAC. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Sci Total Environ*. 2020 Oct. 738: 139453. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139453>.

33. Davila RB, Fontes MPF, Pacheco AA, Ferreira MS. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil.

## 16 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

- Sci Total Environ. 2020 Mar; 709: 136151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136151>.
34. Guerra MBB, Teaney BT, Mount BJ, Asunskis DJ, Jordan BT, Barker RJ, et al. Post-catastrophe analysis of the Fundão tailings dam failure in the Doce River system, southeast Brazil: potentially toxic elements in affected soils. *Water Air Soil Pollut.* 2017 Jun; 228(252). doi: [10.1007/s11270-017-3430-5](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3430-5).
35. Bernardino AF, Pais FS, Oliveira LS, Gabriel FA, Ferreira TO, Queiroz HM, et al. Chronic trace metals effects of mine tailings on estuarine assemblages revealed by environmental DNA. *PeerJ.* 2019 Nov; 7: e8042. doi: [10.7717/peerj.8042](https://doi.org/10.7717/peerj.8042). PubMed PMID: 31720128.
36. Esteves GF, Souza KRD, Bressanin LA, Andrade PCC, Veroneze V Júnior, Reis PE, et al. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *J Environ Manage.* 2020 Jun; 264: 110468. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110468>.
37. Omachi CY, Siani SMO, Chagas FM, Mascani ML, Cordeiro M, Garcia GD. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). *Rem Sens Applic: Soc Environ.* 2018 Nov; 12: 30-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.08.003>.
38. Silva Junior CA, Coutinho AD, Oliveira-Junior JF, Teodoro PE, Lima M, Shakir M, et al. Analysis of the impact on vegetation caused by abrupt deforestation via orbital sensor in the environmental disaster of Mariana, Brazil. *Land Use Pol.* 2018 Jul; 76: 10-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.019>.
39. Aires URV, Santos BSM, Coelho CD, Silva DD, Calijuri ML. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. *Land Use Pol.* 2018 Jan; 70: 63-70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.026>.
40. Weber AA, Sales CF, Souza Faria F, Melo RMC, Bazzoli N, Rizzo E. Effects of metal contamination on liver in two fish species from a highly impacted neotropical river: A case study of the Fundão dam, Brazil. *Ecotox Environ Saf.* 2020 Mar; 190. doi: [10.1016/j.ecoenv.2020.110165](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110165).
41. Ferreira FF, Freitas MBD, Szinwelski N, Vicente N, Medeiros LCC, Schaefer CEGR, et al. Impacts of the Samarco tailing dam collapse on metals and arsenic concentration in freshwater fish muscle from Doce River, southeastern Brazil. *Int Env Assess Manag.* 2020 May. doi: [10.1002/ieam.4289](https://doi.org/10.1002/ieam.4289).
42. Andrades R, Guabiroba HC, Hora MSC, Martins RF, Rodrigues VLA, Vilar CC, et al. Early evidences of niche shifts in estuarine fishes following one of the world's largest mining dam disasters. *Marine Poll Bull.* 2020 May; 154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111073>.
43. Bonecker ACT, Castro MS, Costa PG, Bianchini A, Bonecker SLC. Larval fish assemblages of the coastal area affected by the tailings of the collapsed dam in southeast Brazil. *Reg. Stu. Mar. Sci.* 2019 Nov; 32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100848>.
44. Coppo GC, Passos LS, Lopes TOM, Pereira TM, Merçon J, Cabral DS, et al. Genotoxic, biochemical and bioconcentration effects of manganese on *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Ecotoxicology.* 2018 Oct; 27 (8): 1150-1160. doi: [10.1007/s10646-018-1970-0](https://doi.org/10.1007/s10646-018-1970-0). PubMed PMID: 30120660.
45. Lopes CA, Araujo NLF, Rocha L, Monteiro F, Rocha RCC, Saint'pierre TD, et al. Toxic and essential metals in *Narcine brasiliensis* (Elasmobranchii: Narcinidae): A baseline ecotoxicological study in the Southeast Atlantic and preliminary maternal transfer implications. *Marine Poll Bull.* 2019 Dec; 149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110606>.
46. Nishijima M, Rocha FF. An economic investigation of the dengue incidence as a result of a tailings dam accident in Brazil. *J. Environ. Manag.* 2020 Jan; 253: 109748. doi: [10.1016/j.jenvman.2019.109748](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109748). PubMed PMID: 31678687.
47. Vormittag EMPAA, Oliveira MA, Gleriano JS. Health evaluation of the Barra Longa population affected by the disaster in Mariana county. *Ambient Soc [Internet].* 2018 [acesso 2020 Jul 18]; 21. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0122r2vu1811ao>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2018000100405](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2018000100405).
48. Guo B, Hong C, Tong W, Xu M, Huang C, Yin H, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in a soil-rice system: a case study in the Jin-Qu Basin of China. *Sci. Rep.* 2020 Jul; 10(1). doi: [10.1038/s41598-020-68295-6](https://doi.org/10.1038/s41598-020-68295-6).
49. Salam LB, Obayori OOS, Ilori MO, Amund OO. Effects of cadmium perturbation on the microbial community structure and heavy metal resistome of a tropical agricultural soil. *Bioresour Bioprocess.* [Internet]. 2020 May [acesso 2020 Ago 15]; 7(25). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40643-020-00314-w>. doi: [10.1186/s40643-020-00314-w](https://doi.org/10.1186/s40643-020-00314-w).
50. Dolci GS, Rosa HZ, Vey LT, Pase CS, Barcelos RCS, Dias VT, et al. Could hypoxia acclimation cause morphological changes and protect against Mn-induced oxidative injuries in silver catfish (*Rhamdia quelen*) even after reoxygenation? *Environ Pollut.* 2017 May; 224: 466-475. doi: [10.1016/j.envpol.2017.02.027](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.027).
51. Hedayati A, Hoseini SM, Ghelichpour M. Acute toxicity of waterborne manganese to *Rutilus caspicus* (Yakovlev, 1870) egg histopathology, immune indices, oxidative condition, and saltwater resistance. *Toxicol Environ Chem.* 2015 Apr; 96: 1535-1545. doi: <https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1028408>.
52. Hermenean A, Albo P, Damache G, Ardelean A. Alterations and oxidative stress in liver and kidney of *Leuciscus cephalus* following exposure to heavy metals in the Tur River, North Western Romania. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2015 Sep; 119: 198-205. doi: [10.1016/j.ecoenv.2015.05.029](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.029). PubMed PMID: 26005919.
53. Rajeshkumar S, Li X. Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the meiliang bay, taihu lake, China. *Toxicol Rep.* 2018 Feb; 5: 288-295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.01.007>.
54. Rodrigues ACD, Santos AM, Santos FS, Pereira ACC, Sobrinho NMBA. Mecanismos de respostas das plantas à poluição por metais pesados: possibilidades de uso de macrófitas para remediação de ambientes aquáticos contaminados. *Rev. Virtual Quim.* [Internet]. 2016 Jan [acesso 2021 Ago 25]; 8(1):262-276. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/1488/726>.
55. Padmini E, Rani UM. Impact of seasonal variation on HSP70 expression quantitated in stressed fish hepatocytes. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol.* 2008 Nov; 151(3): 278-285. doi: [10.1016/j.cbpb.2008.07.011](https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.07.011). PubMed PMID: 18694842.
56. Della Torre C, Zaja R, Loncar J, Smital T, Focardi S, Corsi I. Interaction of ABC transport proteins with toxic metals at the level of gene and transport activity in the PLHC-1 fish cell line. *Chem. Biol. Interact.* 2012 Jun; 198(1-3): 9-17. doi: [10.1016/j.cbi.2012.04.008](https://doi.org/10.1016/j.cbi.2012.04.008). PubMed PMID: 22580103.
57. Nascimento TFVO; Gonzalez FG. Impactos do manganês na saúde pública. *Revinter.* 2018 Out ;11(3):32-53. doi: <http://dx.doi.org/10.22280/revintervol11ed3.367>.
58. Oliveira GMT, Kist LW, Pereira TCB, Bortolotto JW, Paquete LF, Oliveira EMN, et al. Transient modulation of acetylcholinesterase activity caused by exposure to dextrancoated iron oxide nanoparticles in brain of adult zebrafish. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol.* 2014 May; 162: 77-84. doi: [10.1016/j.cbpc.2014.03.010](https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2014.03.010). PubMed PMID: 24704546.
59. Pereira BF, Alves RMS, Pitol DL, Senhorini JA, Rocha RCGA, Caetano FH. Morphological gill analysis of fish species *Prochilodus lineatus* after exposure to pollutants. *J Environ Analytic Toxicol.* 2012 Jan; 2(130). doi: <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000130>.
60. Pacheco M, Santos MA. Biotransformation, genotoxic and histopathological effects of environmental contaminants in European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Ecotoxicol Environ Saf.* 2002 Nov; 53(3):331-347. doi: [10.1016/s0147-6513\(02\)00017-9](https://doi.org/10.1016/s0147-6513(02)00017-9). PubMed PMID: 12485576.



## 17 Efeitos tóxicos do rompimento da barragem de Fundão

61. Popek W, Dietrich G, Glogowski J, Zakés KD, Kozak ED, Sionkowski J, et al. Influence of heavy metals and 4-nonylphenol on reproductive function in fish. *Reprod Biol*. 2006 Feb; 6(Suppl 1): 175-188. PubMed PMID: 16967097.
62. Costa AG, Borges AM, Blanco BS. Metais tóxicos e seus efeitos sobre a reprodução dos animais: Revisão. *Rev. Bras. Hig. Sanid. Anim* [Internet]. 2020 Mar [acesso 2020 Ago 16]; 14(1): 108-124. Disponível em: <http://www.higieneanimal.ufc.br/seer/index.php/higieneanimal/article/view/536/2825>. doi: <http://dx.doi.org/10.5935/1981-2965.20200010>.
63. Benavides MP, Gallego SM, Tomaro ML. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol*. 2005 Mar; 17(1). doi: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>.
64. Silva PLF. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. *Meio Ambiente (Brasil)* [Internet]. 2021 Fev [acesso 2021 Ago 25]; 3(2): 24-33. Disponível em: <http://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/119/91>.
65. Gassilloud B, Gantzer C. Adhesion-aggregation and inactivation of poliovirus 1 in groundwater stored in a hydrophobic container. *Appl Environ Microbiol*. 2005 Feb; 71(2):912-920. doi: 10.1128/AEM.71.2.912-920.2005. PubMed PMID: 15691948.
66. Racette BA. Manganism in the 21st century: the Hanninen lecture. *Neurotoxicology*. 2014 Dec; 45: 201-207. doi: 10.1016/j.neuro.2013.09.007. PubMed PMID: 24148923.
67. Orr SE, Bridges CC. Chronic Kidney Disease and Exposure to Nephrotoxic Metals. *Int J Mol Sci*. 2017 May; 18(5): 1039. doi: 10.3390/ijms18051039. PubMed PMID: 28498320.
68. Andrade VM, Aschner M, Santos APM. Neurotoxicity of Metal Mixtures. *Adv Neurobiol*. 2017; 18: 227-265. doi: 10.1007/978-3-319-60189-2\_12.
69. Martin S, Griswold W. Human Health Effects of Heavy Metals. CHRS [Internet]. *Environ Sci Tec Briefs Citizens*. 2009; 15. [acesso 2020 Ago 4]. Disponível em: <https://engg.ksu.edu/chsr/files/chsr/outreach-resources/15HumanHealthEffectsofHeavyMetals.pdf>.
70. Silva Rotta LHS, Alcântara E, Park E, Negri RG, Lin YN, Bernardo N, et al. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *Int J Appl Earth Obs*. 2020 Aug; 90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>.
71. Costa AT, Nalini HA, De Lena JC, Friese K, Mages M. Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Geology* [Internet]. 2003 Sep [acesso 2020 Ago 18]; 45(2): 226-235. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-003-0870-6>. doi: 10.1007/s00254-003-0870-6.

### Como citar este artigo/How to cite this article:

Oliveira LLF, Santos HB, Thomé RG, Chequer FMD. Efeitos tóxicos à saúde humana e ao ambiente causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão. *J Health Biol Sci*. 2021; 9(1):1-17.