

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

~~OLHE BEM AS MONTANHAS...~~

# IMPACTO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO DA MINA DO FEIJÃO, EM BRUMADINHO, QUANTO AO USO E À COBERTURA DO SOLO E À QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO PARAÓPEBA

ANA LUIZA CUNHA SOARES\*

SAMUEL FRANÇA DUARTE\*

LENORA NUNES LUDOLF GOMES\*

SILVIA CORRÊA OLIVEIRA\*

**RESUMO** A atividade minerária se destaca como uma das mais importantes para a economia em Minas Gerais, e as barragens de rejeitos são as principais formas de destinação dos seus subprodutos. Em 25 de janeiro de 2019, o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da mineradora Vale S.A., na Mina do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, trouxe como consequência imediata perdas humanas, além de outros graves impactos socioambientais, como a contaminação do rio Paraopeba. O objetivo deste trabalho foi analisar os dados espaciais da região diretamente atingida pelo rompimento da barragem e as informações de monitoramento da qualidade da água superficial do rio Paraopeba, antes e após o desastre, de forma célere e satisfatória.

**PALAVRAS-CHAVE** barragem de rejeito de mineração; uso e cobertura do solo; qualidade das águas superficiais.

## IMPACT OF THE FAILURE OF THE CÓRREGO DO FEIJÃO IRON ORE WASTE DAM, AT BRUMADINHO, ON LAND USE, LAND COVER AND SURFACE WATER QUALITY OF THE PARAÓPEBA RIVER

**ABSTRACT** The mining activity stands out as one of the most important for the economy in Minas Gerais and the tailings dams are the main forms of destination of its by-products. On January 25, 2019, the rupture of the iron tailings dam of the mining company Vale SA, in the Córrego do Feijão mine in the municipality of Brumadinho, brought immediate human losses, in addition to other serious socio-environmental impacts, such as contamination from the Paraopeba River. The objective of this work was to analyze the spatial data of the region directly affected by the rupture of the dam and the monitoring data of the surface water quality of the Paraopeba River, before and after the disaster.

**KEYWORDS** mining tailings dam; land use and cover; surface water quality.

\* Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

## 1. Introdução

Para atender às necessidades da sociedade por água, comida e combustível, o uso e a cobertura do solo vêm sendo significativamente alterados (WARBURTON; SCHULZE; JEWITT, 2012). A qualidade da água varia com base em localização, tempo, clima e presença de fontes de poluição. As mudanças no uso e na ocupação do solo são um dos fatores que mais interferem na qualidade das águas de uma bacia hidrográfica (GIRI; QIU, 2016; NAMUGIZE; JEWITT; GRAHAM, 2018), principalmente as cargas de águas residuárias industriais e domésticas, fontes pontuais que podem ser identificadas com relativa facilidade (WANG *et al.*, 2016), e as fontes difusas, como a agricultura, o escoamento das ruas e a deposição de poluentes atmosféricos (ONGLEY; XIAOLAN; TAO, 2010).

A maioria dessas pressões, associadas ao crescimento populacional, gera maior demanda por água para atividades de agricultura, energia e mineração (GIRI; QIU, 2016). Em relação a essa última atividade, um risco contínuo é a gestão da água em barragens de rejeitos. O volume e as características tóxicas dos resíduos liberados por falhas de barragens podem criar uma ameaça física direta a jusante para vidas humanas e animais, bem como para os ecossistemas (ADIANSYAH *et al.*, 2015; KOSSOFF *et al.*, 2014).

No Brasil existiam, em fevereiro de 2019, 769 barragens de mineração, sendo que 425 estavam inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (ANM, 2019a). De acordo com a classificação por categoria de risco, que é feita em função das características técnicas do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem, duas barragens eram de alto risco, 61 de médio risco e 362 de baixo risco. No entanto, em relação à classificação por categoria de dano potencial associado, que é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem, 219 apresentavam alto dano, 157 médio dano e 49 baixo dano (ANM, 2019b; BRASIL, 2017).

O rompimento de barragens de rejeito de mineração ocasiona graves impactos socioambientais, como distúrbios hidrológicos, perda de qualidade da água, alterações drásticas na cobertura do solo, contaminação do meio físico e biótico, perdas de vidas humanas e bens materiais e comprometimento da saúde das populações atingidas (DIAS *et al.*, 2018).

A análise de dados históricos revela a existência de desastres com barragens no Brasil, conforme registro do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), alguns deles envolvendo barragens ou pilhas de rejeitos de mineração. O Quadro 1 apresenta informações de alguns desastres dessa natureza ocorridos em Minas Gerais desde 1986.

**Quadro 1-** Desastres em barragens de mineração em Minas Gerais

Ano	Empresa	Município	Breve descrição
1986	Grupo Itaminas	Itabirito	Rompimento de barragem de rejeitos da Mina Fernandinho que causou a morte de sete pessoas e despejou um volume de rejeitos de 350.000 m <sup>3</sup> .
2001	Mineração Rio Verde	Nova Lima	O rompimento da barragem causou a morte de cinco vítimas. O vazamento de 600.000 m <sup>3</sup> de rejeitos causou o assoreamento de 6,4 km e contaminação das águas do córrego Taquara, destruiu cerca de 80 hectares de Mata Atlântica e levou ao rompimento de uma adutora de água da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).
2007	Mineradora Rio Pomba Cataguases	Miraf	Vazamento de 2 milhões de m <sup>3</sup> de rejeito, impactando o ribeirão Fubá, o córrego Bom Jardim e o rio Muriaé, também afluente do Paraíba do Sul, e inundando os municípios de Miraf e Muriaé (4 mil pessoas desalojadas e 1.200 casas atingidas), causando mortandade de peixes e interrupções no fornecimento de água

Quadro 1- Desastres em barragens de mineração em Minas Gerais

Continuação

Ano	Empresa	Município	Breve descrição
2014	Herculano Mineração	Itabirito	Três operários que realizavam a manutenção no talude de uma barragem de rejeitos desativada morreram soterrados e uma pessoa ficou ferida. O evento também resultou na contaminação das águas e no assoreamento de córregos e rios.
2015	Samarco Mineração	Mariana	A barragem de mineração entrou em colapso gerando uma onda maciça de lama que se espalhou pelo rio Doce, matando 19 pessoas e afetando a biodiversidade em centenas de quilômetros de rios, matas ciliares e Costa Atlântica.
2019	Vale S.A.	Brumadinho	Os rejeitos da denominada Barragem I escoaram pela área administrativa da mina, seguindo a calha do ribeirão Ferro-Carvão até serem drenados pelo rio Paraopeba. A maior consequência imediata foi a de perdas humanas.

Fonte: Adaptado de ANA, 2016; IGAM, 2019

O rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da Mina do Córrego do Feijão, do Complexo Paraopeba, resultou no carreamento de 12 milhões de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) de rejeitos por toda a calha do ribeirão Ferro-Carvão e do rio do Paraopeba. Este desastre ambiental de grandes proporções, e também o maior acidente de trabalho da história brasileira (perda de 270 vidas humanas), acarretou danos ao meio ambiente, ao patrimônio público e privado, além de graves prejuízos socioeconômicos diretos e indiretos sobre a biodiversidade e os recursos hídricos, tornando-se preocupação não só na bacia do rio Paraopeba, como também em toda a bacia do rio São Francisco (IGAM, 2020a).

O monitoramento da qualidade das águas superficiais é de extrema importância, pois seus resultados possibilitam melhor conhecimento da situação da qualidade das águas e das principais alterações ocorridas ao longo do tempo. Para facilitar a

interpretação de dados, a aplicação de diferentes técnicas estatísticas é recomendada, permitindo uma melhor compreensão das variações temporais e espaciais da qualidade da água e a identificação de possíveis fatores que influenciam os corpos d'água, de modo a contribuir para a gestão dos recursos hídricos.

Nesse contexto, a integração de geotecnologias, ou seja, um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações geográficas, como o Sensoriamento Remoto (SERE) e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), oferece técnicas que vêm se destacando nos procedimentos de levantamentos e mapeamento de áreas (ROCHA, 2002).

Seu uso é amplo e se dá principalmente pela disponibilidade de equipamentos computacionais para o processamento de informações e a obtenção e o acesso de dados dos sensores remotos disponíveis, agilizando processos e abrandando custos operacionais de metodologias tradicionais de análises (ALMEIDA; CÂMARA; MONTEIRO, 2007).

Diante disso, esse trabalho teve como objetivo estimar e caracterizar a área atingida pelos rejeitos oriundos do rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão, bem como discutir os impactos gerados e sua magnitude, a partir da ótica das mudanças de cobertura e uso do solo e de qualidade da água do rio Paraopeba.

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de estudo

O rio Paraopeba percorre 550 km da sua nascente no extremo sul da Serra do Espinhaço, município de Cristiano Ottoni, até sua foz na Represa de Três Marias, entre os municípios de Pompéu e Felixlândia, em Minas Gerais. A bacia do rio Paraopeba abrange 48 municípios e 35 sedes municipais – com uma população aproximada de 2.349.024 habitantes (IGAM, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba integra a região do Alto Rio São Francisco, sendo responsável pela movimentação de parte expressiva da economia do estado de Minas Gerais. Destacam-se as atividades relacionadas com mineração e side-

rurgia uma vez que parte da bacia está inserida no Quadrilátero Ferrífero. Há também uma rica diversidade industrial, como grandes indústrias dos ramos automobilístico, petroquímico e alimentício, além de, em menor quantidade, atividades relacionadas com a extração de ardósia e a produção de eucalipto (COBRAPE, 2018).

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do rio Paraopeba (COBRAPE, 2018), considerando-se a atividade de mineração pelos quantitativos das categorias de i) concessão de lavra, ii) requerimento de lavra, iii) requerimento de licenciamento e iv) licenciamento, na totalidade da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, tem-se 1.009 lavras.

A Barragem I da Mina do Feijão da Mineradora Vale S.A., localizada no município de Brumadinho, que se rompeu no dia 25 de janeiro de 2019, era uma barragem de porte médio, que não apresentava pendências documentais. Foi construída em 1976, pela Ferteco Mineração (adquirida pela Vale em 27 de abril de 2001), pelo método de alteamento a montante. A altura da barragem era de 86 metros, e o comprimento da crista de 720 metros.

O rejeito verteu pelos cursos hídricos mais próximos, atingindo o rio Paraopeba. Ao chegar nesse corpo de água, o material afetou a qualidade da água não só por seus contaminantes associados, mas também por materiais e produtos que foram carreados pela força da onda de rejeitos (IGAM, 2019).

Para avaliar a magnitude dos impactos gerados quanto à cobertura e ao uso do solo foi efetuada uma caracterização geoespacial, na qual foram comparadas imagens de satélite obtidas antes do rompimento com imagens de sensoriamento remoto provenientes de um aerolevanteamento realizado em 29 de janeiro de 2019. A avaliação do impacto sobre a qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba foi efetuada pelo estudo de dados de monitoramento obtidos junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), antes e depois do rompimento da barragem.

## *2.2. Caracterização geoespacial dos impactos sobre a cobertura do solo*

Os dados geográficos e de levantamentos espaciais, obtidos pelo Grupo de Perícias em Meio Ambiente (GPEMA) do Setor Técnico e Científico (SETEC MG) da Superintendência Regional da Polícia Federal de Minas Gerais e utilizados na confecção dos laudos periciais solicitados pela justiça, foram disponibilizados para este trabalho.



Para demarcação da área afetada diretamente pelos rejeitos provenientes da barragem, foram utilizadas as imagens de sensoriamento remoto, obtidas pela tecnologia LiDAR, provenientes de um aerolevante realizado em 29 de janeiro de 2019 e possuem resolução espacial de 25 centímetros. A delimitação da Área Diretamente Afetada (ADA) foi realizada via vetorização manual, interpretando-se visualmente os limites da pluma de lama. O polígono foi traçado a partir da área da Barragem I, que se rompeu, seguindo a jusante até o encontro com o rio Paraopeba. Foi criado um arquivo vetorial, *shapefile* com geometria poligonal utilizando o *software* ArcMap 10.5, do sistema de informação geográfica (SIG) ArcGIS versão 10.5. No mesmo programa, pôde-se calcular automaticamente a área que foi coberta pelo material da barragem.

A cobertura da terra na área atingida foi mapeada integrando imagens do satélite WorldView III (WV3), datadas de 22 de julho de 2018, com auxílio de séries temporais de dados de alta resolução do *software* Google Earth Pro (GEP).

Foi utilizado o método de classificação manual para mapear as classes de cobertura de solo sem consultas a campo. A interpretação foi executada observando formas, tamanhos, cores, texturas e associação entre usos/coberturas e meio físico, conforme os padrões das áreas. Em feições cuja identificação pelas imagens WV3 se mostrou duvidável, foram realizadas consultas à série histórica do GEP, especificamente às imagens de 1 de junho 2018 e 6 de julho de 2018.

As classes mapeadas foram: (1) Área de Produção Mineral; (2) Barragem de Rejeito; (3) Corpo Hídrico; (4) Cultura; (5) Pastagem; (6) Bosque; (7) Várzea; (8) Vegetação Natural ou em Estágio Avançado; (9) Área Antrópica.

A partir da folha topográfica que abrange a região da ADA e de todo o complexo da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, foi traçada a rede hidrográfica principal do local. As ferramentas de geoprocessamento foram utilizadas considerando as drenagens naturais e os reservatórios artificiais de água representados na carta ou nas imagens de sensores remotos por meio do ArcMap 10.5. O *software* foi utilizado também para criar as áreas de preservação permanente no entorno de cada recurso hídrico, através da ferramenta de análise padrão *buffer*. Os *buffers* foram criados a partir das definições constantes na Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, o Código Florestal, que prevê regime de proteção às faixas marginais dos cursos d'água naturais, declarando-as Áreas de Preservação Permanente (APP) (BRASIL, 2012). Foi confeccionado o mapa que apresenta as APP dentro da ADA e, em seguida, calculado o valor total dessas áreas.



O ArcMap 10.5 foi utilizado também para calcular o volume de rejeito despejado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão após o rompimento. Os dados do LiDAR obtidos nos voos de 16 de dezembro de 2016 e de 29 de janeiro de 2019 permitiram a criação de MDTs (modelos digitais de terreno), que, por sua vez, originaram os arquivos vetoriais com as curvas de nível com cotas espaçadas em dez metros através da ferramenta *Contour*.

Com as curvas de nível foi possível criar no ArcMap redes triangulares irregulares (*Triangular Irregular Network – TIN*), por triangulação de Delaunay, que usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Nesta estrutura cada ponto das curvas passou a compor os nós desta malha do tipo vetorial, com topologia do tipo nó-arco, que representa a superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. As TIN das duas datas foram recortadas com a ferramenta *clip* para se limitarem apenas à ADA. A estimativa do volume se deu pela diferença entre as duas TIN. O processo de cálculo foi feito usando as ferramentas de análise 3D do ArcToolbox, especificamente a ferramenta *Surface Difference*, localizada na aba *Triangulated Surface*.

### 2.3. Avaliação da qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba

Os dados de qualidade de água utilizados no trabalho foram os disponibilizados pelo Igam e consistiram em valores de parâmetros físicos e químicos de amostras de água superficial do rio Paraopeba, coletadas no monitoramento emergencial, que coincidem com os pontos e os parâmetros do monitoramento do Programa Águas de Minas. As análises foram realizadas para as estações identificadas no Quadro 2 e Figura 1. O intuito dessa seleção foi facilitar a análise do impacto resultante do rompimento ao comparar o período anterior e posterior ao desastre.

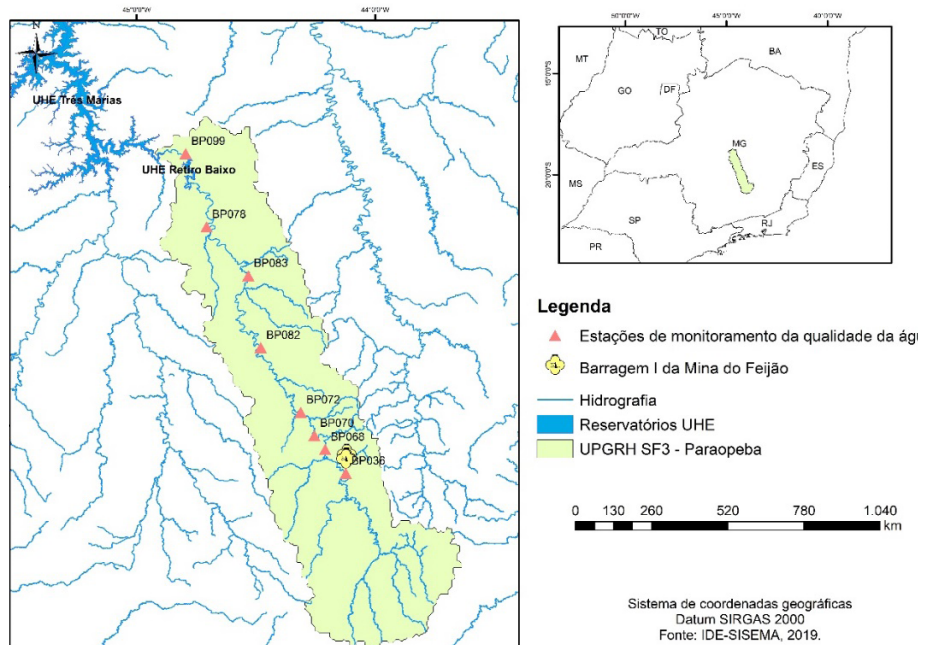
Os parâmetros do monitoramento emergencial utilizados para a avaliação das possíveis alterações da qualidade das águas do trecho em estudo foram: turbidez (TURB.), oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica *in loco* (CE), alumínio dissolvido (Al), ferro dissolvido (Fe), manganês total (Mn) e os tóxicos: arsênio total (As), cádmio total (Cd), chumbo total (Pb), cobre dissolvido (Cu), cromo total (Cr), mercúrio total (Hg), níquel total (Ni) e zinco total (Zn) (IGAM, 2019).

**Quadro 2-** Estações de monitoramento da bacia do rio Paraopeba que apresentam ou apresentaram monitoramento diário, semanal ou mensal após o rompimento

Estação	Município	Distância até a Barragem I (km)	Descrição	Data do início da coleta
BPo36	Brumadinho	10	Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco	28/01/2019
BPo68	São Joaquim de Bicas	24,8	Rio Paraopeba 5 km a jusante da captação da COPASA em Brumadinho	26/01/2019
BPo70	Betim, São Joaquim de Bicas	42	Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas	26/01/2019
BPo72	Betim	59	Rio Paraopeba a jusante da foz do rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba	26/01/2019
BPo82	Esmeraldas, São José da Varginha	123,1	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas	27/01/2019
BPo83	Papagaios, Paraopeba	192,4	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba	27/01/2019
BPo78	Curvelo, Pompéu	250,9	Rio Paraopeba a jusante da foz do rio Pardo em Pompéu	27/01/2019
BPo99	Felixlândia	318,3	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias	27/01/2019

Fonte: IGAM, 2019

**Figura 1** -Localização geográfica das estações de monitoramento da qualidade da água na calha do rio Paraopeba



Fonte: SISEMA, 2019

Os dados de cada parâmetro da qualidade da água, em cada estação de monitoramento antes (2007 a 2018) e após o rompimento (de janeiro de 2019 a março de 2020) foram analisados, preliminarmente, por meio de estatística descritiva. Os valores mínimo e máximo, mediana, média e desvio padrão foram calculados, assim como o percentual de violação aos limites legais da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH-MG n.º 1 de 2008 (MINAS GERAIS, 2008).

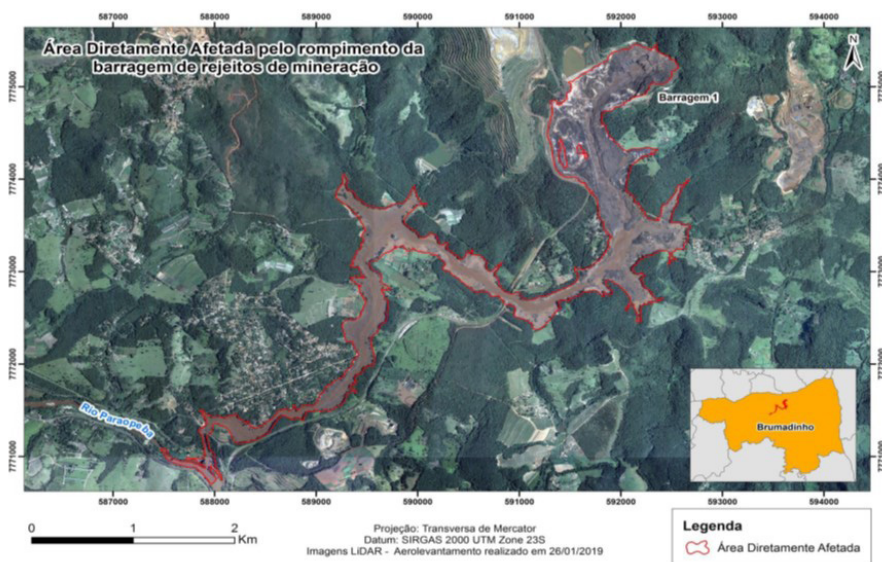
Os valores dos parâmetros de qualidade da água medidos nas estações de monitoramento antes e depois do rompimento foram comparados para verificar se existiam diferenças significativas. O teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney (MW) foi aplicado, ao nível de significância de 5%. Além disso, gráficos box-plots foram gerados para melhor visualização dos resultados.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Caracterização geoespacial dos impactos sobre a cobertura do solo

Os limites da ADA estabelecidos a partir do contorno visível da lama são apresentados na Figura 2. A área diretamente afetada tem aproximadamente 306 ha e o rejeito percorreu uma extensão de cerca de 9 km da barragem até a confluência entre o ribeirão Ferro-Carvão e o rio Paraopeba. É possível observar que a lama cobriu majoritariamente terras baixas e relativamente planas, circundantes ao leito do curso d'água.

Figura 2 - Mapa de delimitação da área diretamente afetada pelos rejeitos de mineração

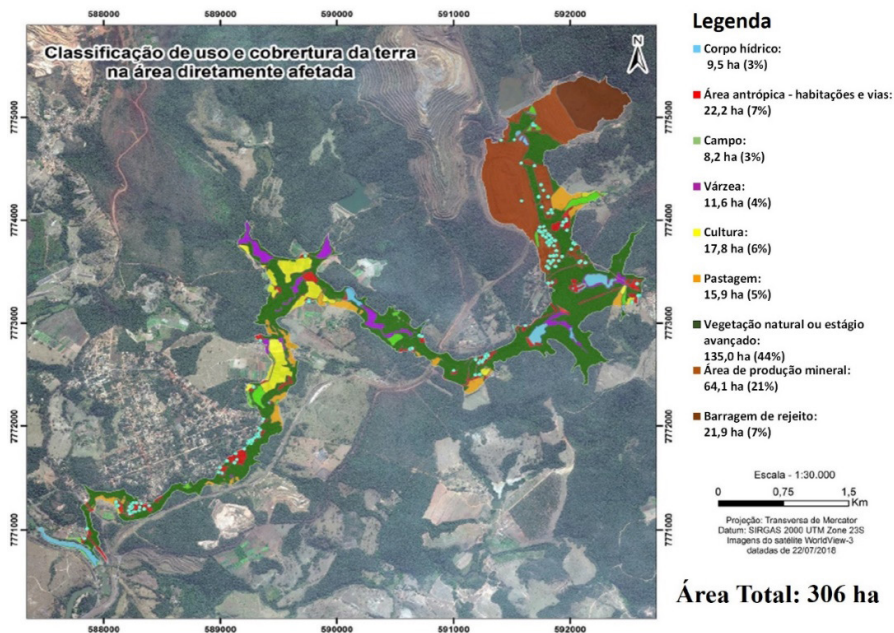


Fonte: elaborada pelos autores

O mapeamento mostrou uma grande variabilidade nas coberturas, sendo identificadas as nove classes de uso e cobertura do solo. Os resultados referentes à classificação feita manualmente por fotointerpretação evidenciaram a vasta extensão de vegetação e muitas edificações e estruturas antrópicas destruídas pela lama, além de áreas de atividade agropastoril e corpos d'água.

O mapa de caracterização do uso e da cobertura da terra na área diretamente afetada em momento anterior ao rompimento da barragem é apresentado na Figura 3.

**Figura 3** - Mapa das áreas de cada classe de uso e cobertura do solo nos limites da ADA antes do rompimento da barragem de rejeito de mineração



Fonte: elaborada pelos autores

Antes do rompimento, a área ocupada por vegetação natural ou em estágio de desenvolvimento mais avançado (espécies de grande porte), características do bioma mata atlântica, principalmente, era de 135 ha, sendo a classe mais representativa. Possivelmente a maior parte dessa vegetação é secundária, devido à densidade considerável de ocupações humanas e intervenções em torno das áreas vegetadas. Somando-se a essa flora, também foram identificadas regiões predominantemente cobertas por vegetação rasteira e de porte pequeno-médio, características do cerrado, de áreas de alagamento sazonal ou, ainda, pertencentes a jardins, bosques, pomares ligados a residências, instalações da mineradora e pontos degradados, em que ocorre a sucessão ecológica em estágios iniciais. Essas áreas são 8,2 ha para os bosques e 11,6 ha para as várzeas. As três zonas verdes citadas, mesmo as não naturais, forneciam serviços ecossistêmicos importantes para a região, seja na proteção e na manutenção da qualidade do solo e das águas, seja no abastecimento dos mananciais, no abrigo para fauna e nos corredores de biodiversidade. Praticamente toda ela foi suprimida ou coberta pelo rejeito.

As atividades agropecuárias ocupavam um total de 33,7 ha, dividindo-se entre regiões ocupadas por pasto e aquelas com produção agrícola. Excetuando-se o ribeirão Ferro-Carvão e os seus afluentes, a área de corpos hídricos superficiais diretamente atingidos é de 9,5 ha. Entre eles está contabilizado o trecho do rio Paraopeba na confluência com aquele ribeirão, que recebeu o aporte direto do material, sendo parcialmente assoreado. Os outros mananciais completamente soterrados são açudes e reservatórios artificiais ao longo da bacia do Ferro-Carvão.

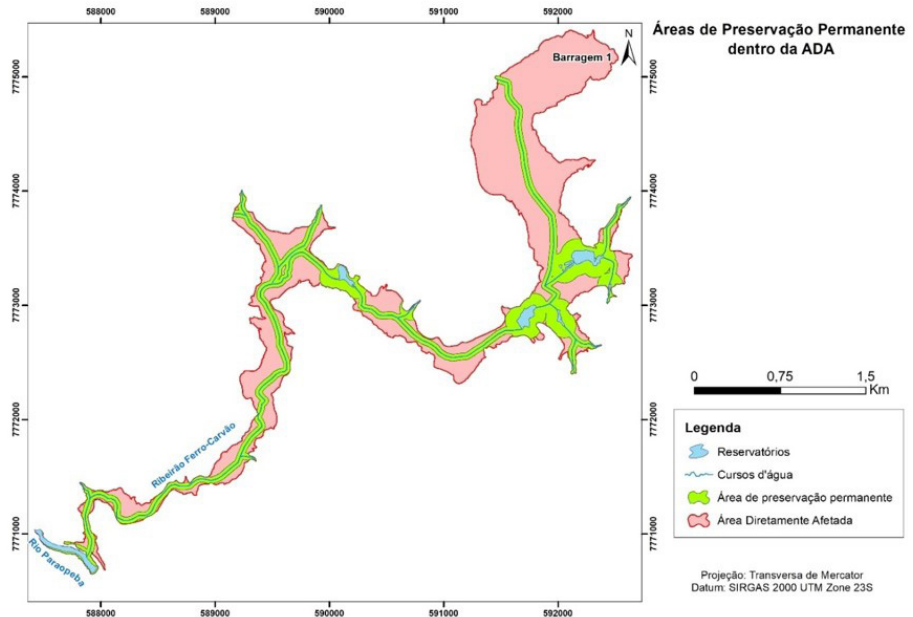
Os locais que possuíam intervenções humanas diretas, abrangendo ruas, estradas, solo exposto, lotes vagos e habitações somaram 22,2 ha. Foram devastadas casas, pequenas fazendas e até quarteirões inteiros. As imagens de satélite permitiram identificar pelo menos 69 edificações dentro da ADA que não fazem parte do complexo da Vale S.A. Isso evidencia o impacto causado no meio antrópico. As propriedades degradadas da mineradora somam 85,9 ha, sendo 21,9 ha referentes à superfície da Barragem I que colapsou e 64,1 ha das unidades produtivas/administrativas. Foram identificadas 64 edificações nas instalações corporativas, que também foram completamente submergidas e assoladas pela lama, uma vez que se encontravam imediatamente a jusante do dique da barragem.

As áreas de preservação permanente diretamente atingidos pelo rejeito contabilizam um total de 110,2 há; 73% dessa área é ocupada por APP de cursos d'água lóticos, sendo os outros 27% relativos a APP de reservatórios artificiais e lagoas em área considerada rural. As APP podem ser vistas na Figura 4. É importante ressaltar que grande parte dessas APP já havia tido sua cobertura vegetal natural substituída por outros usos, como culturas e pastagens, sendo a sua porção mais próxima à nascente do ribeirão quase em sua totalidade impactada diretamente pela atividade de extração mineral, uma vez que cruza parte das instalações industriais da mineradora.

Os cursos d'água atingidos foram: ribeirão Ferro-Carvão e seus afluentes, córrego Samambaia, córrego da Olaria, córrego Laranjeira, e outros de menor dimensão e sem denominação na carta topográfica consultada, além do rio Paraopeba. Exceto o rio Paraopeba, que possui pouco mais de 50 metros de largura na referida confluência, os demais cursos d'água atingidos possuem dez metros ou menos de largura de uma margem a outra, incidindo, portanto, uma faixa marginal de 30 metros de largura caracterizada como de preservação permanente.



Figura 4 -Áreas de preservação permanente atingidas



Fonte: elaborada pelos autores

A dispersão dos rejeitos seguiu o vale do ribeirão Ferro-Carvão e, pelo volume bastante superior à capacidade de sua calha, a onda movimentou-se drenagem acima nos seus tributários, degradando a paisagem marginal em extensões variáveis conforme a topografia local. Em relação ao rio Paraopeba, a mata ciliar só foi diretamente atingida nas imediações do ponto de confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, onde foram lançados diretamente os rejeitos.

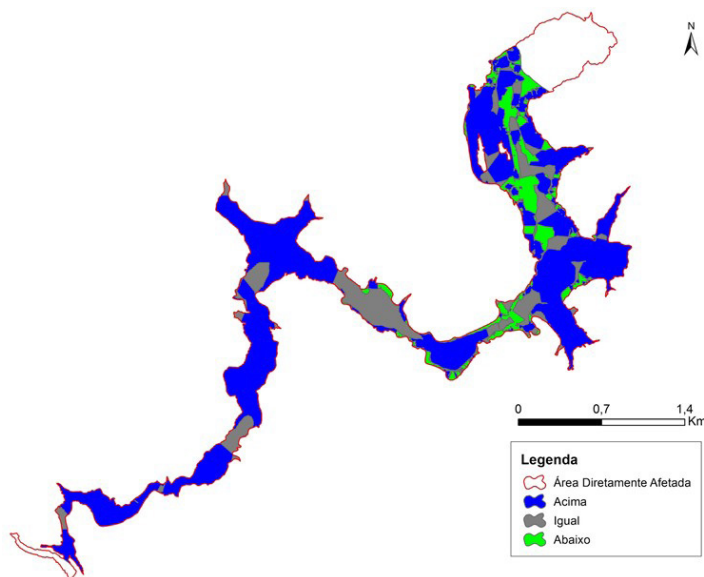
O ribeirão Ferro-Carvão teve seu leito completamente soterrado pelo material, a jusante da Barragem I. A montante da barragem, o terreno apresenta-se intacto, mantendo a flora original em quase toda a bacia de contribuição, excetuando-se a área com aproveitamento mineral consolidado do complexo industrial. O rio Paraopeba teve seu talvegue em parte assoreado pela carga que nele aportou, chegando a represar o curso d'água a montante da afluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

Ao se realizar o cálculo da diferença entre a TIN correspondente ao terreno de 26 de janeiro de 2019 e a TIN do terreno de 16 de dezembro de 2016 usando a ferramenta *Surface Difference* do ArcMap, foi criado um *shapefile* discretizando as regiões da ADA



onde houve elevação da cota da superfície, diminuição ou nenhuma alteração. Cada uma dessas regiões foi transformada em polígonos e tiveram o volume calculado automaticamente pelo programa. Na Figura 5 é apresentado o arquivo vetorial contendo tais regiões.

**Figura 5** -Resultado da diferença entre as cotas das superfícies do terreno antes e após o rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão



Fonte: elaborada pelos autores

O programa gerou uma tabela de atributos contendo todos os polígonos e seus respectivos valores de volume. Foram filtrados e somados os valores dos volumes referentes às regiões onde a cota se encontra acima da superfície (polígonos em azul na Figura 5). Assim, o volume total de rejeito de mineração lançado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão após o rompimento da barragem foi de aproximadamente 10.960.483,7 m<sup>3</sup>. Segundo a empresa proprietária da mina, a barragem possuía 12,7 milhões de m<sup>3</sup> de material antes do rompimento (FONTOURA *et al.*, 2019).

Essa quantidade de rejeito aportada na bacia do ribeirão Ferro-Carvão implicou numa série de graves consequências ao ambiente natural, aos recursos hídricos e ao meio antrópico. Toda a calha do ribeirão foi assoreada, assim como alguns dos seus tributários, causando a mortandade de toda a biota antes ali presente, além de tornar indisponível o uso desse curso d'água por período indefinido. Uma avaliação mais detalhada da qualidade da água do rio Paraopeba será apresentada.

### 3.2. Avaliação da qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba

Todos os parâmetros de todas as amostras foram comparadas com limites legais da legislação Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH-MG n.º 1 de 2008 (MINAS GERAIS, 2008), exceto condutividade elétrica, por não possuir limite legal, para a Classe 2 de enquadramento. Para a avaliação da qualidade das águas superficiais de cada estação para o período antes e após o rompimento foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, por meio do qual foram identificadas diferenças significativas para as concentrações dos parâmetros apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3-** Parâmetros com concentrações e valores significativamente diferentes antes e após o rompimento da barragem por estação de monitoramento

Estação	Distância até a Barragem	Parâmetros
BPo36	10 (a montante)	Alumínio dissolvido, arsênio total, ferro dissolvido e turbidez
BPo68	24,8	Alumínio dissolvido, arsênio total, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total, turbidez e zinco total
BPo70	42	Arsênio total, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total, níquel total e turbidez
BPo72	59	Alumínio dissolvido, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total, níquel total, oxigênio dissolvido e turbidez
BPo82	123,1	Alumínio dissolvido, arsênio total, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total e turbidez
BPo83	192,4	Alumínio dissolvido, arsênio total, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, oxigênio dissolvido e turbidez
BPo78	250,9	Alumínio dissolvido, arsênio total, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total e turbidez
BPo99	318,3	Alumínio dissolvido, arsênio total, ferro dissolvido, oxigênio dissolvido e turbidez

Fonte: IGAM, 2019

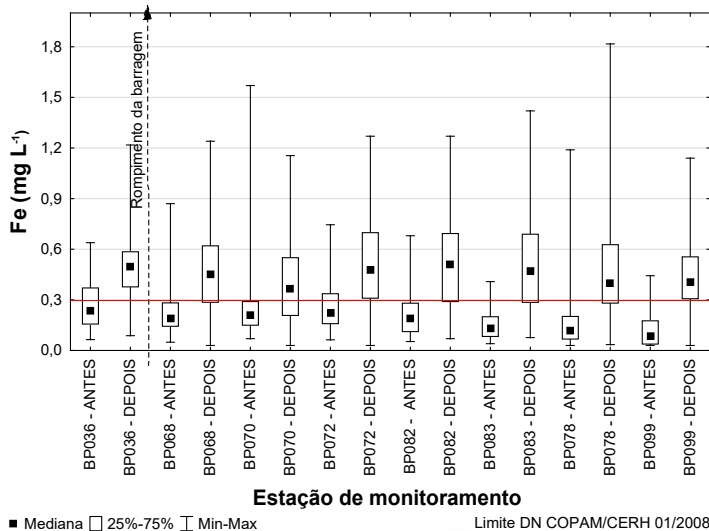
Os parâmetros “ferro dissolvido” e “turbidez” apresentaram diferenças significativas em todas as estações e serão apresentados em gráficos *box-plot*. A Figura 6 apresenta o *box-plot* antes e após o rompimento da barragem ao longo do curso de água para o parâmetro “ferro dissolvido”, considerando as estações de montante para jusante.

É possível observar que antes do rompimento as medianas de todas as estações estavam abaixo do limite estabelecido na legislação. Após o rompimento, todas as estações, incluindo a BP036, localizada a montante da barragem, já apresentaram medianas bem mais elevadas e acima do limite da legislação, evidenciando os impactos sofridos pelo curso d'água pelo lançamento dos rejeitos.

Para o parâmetro “mangânês total”, a diferença entre o período antes e após o rompimento pode ser vista na Figura 7. Mesmo antes do rompimento, as medianas das concentrações de mangânês total já estavam acima do limite da legislação nas estações BP036, BP068, BP070 e BP072, as mais próximas às áreas de mineração. Após o rompimento os valores das concentrações medianas chegaram a apresentar valores sete vezes maiores na estação BP068, localizada a 24,8 km do rompimento.

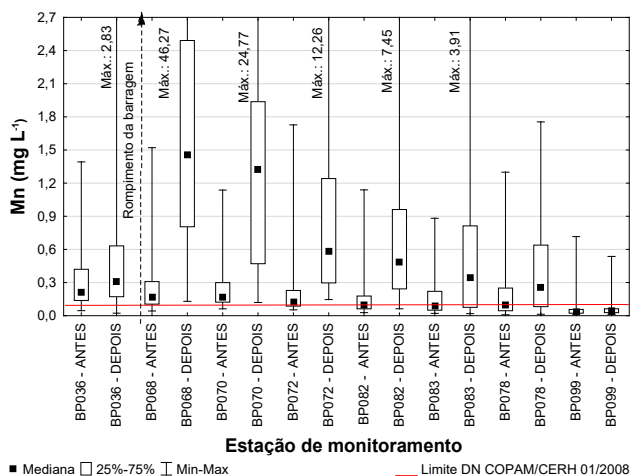
Para a “turbidez”, antes do rompimento todas as estações analisadas apresentavam medianas abaixo do limite estabelecido pela legislação (100 UNT). Somente a estação BP099, que está localizada a 318,3 km do local do rompimento, a jusante da UHE Retiro Baixo, não apresentou mediana acima do limite, indicando o amortecimento dos impactos nos

**Figura 6** - Box plot das concentrações do parâmetro “ferro dissolvido”, considerando as estações de monitoramento ao longo do rio Paraopeba para os dados antes e após o rompimento da barragem



Fonte: elaborada pelos autores

**Figura 7** - Box plot das concentrações do parâmetro “mangânês total”, considerando as estações de monitoramento ao longo do rio Paraopeba para os dados antes e após o rompimento da barragem

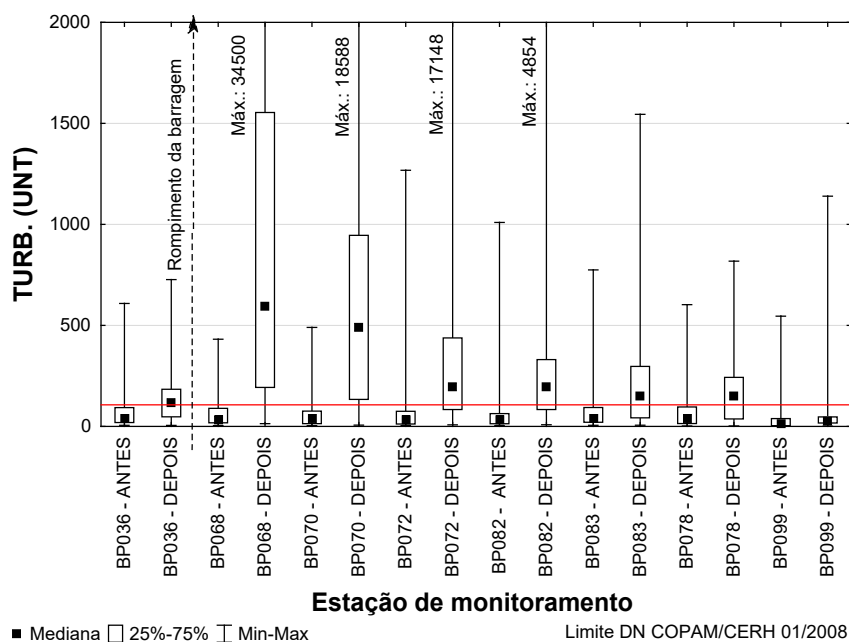


Fonte: elaborada pelos autores

trechos localizados a jusante do barramento até a data final das amostras analisadas (em março de 2020). A Figura 8 apresenta o box-plot antes e após o rompimento da barragem ao longo do curso de água para o parâmetro “turbidez”.

Para o parâmetro “alumínio dissolvido”, os resultados das medianas no período anterior ao rompimento permaneceram dentro dos limites da legislação para todas as estações, o que não acontece no período pós-rompimento, em que as medianas de todas as estações apresentaram concentrações acima do limite legal ( $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ ). As estações BP036 (montante do rompimento), BP082, BP083 e BP078 apresentaram mais de 95% de violações no período pós rompimento.

**Figura 8** - Box plot das concentrações do parâmetro “turbidez”, considerando as estações de monitoramento ao longo do rio Paraopeba para os dados antes e após o rompimento da barragem



Fonte: elaborada pelos autores

Estudos relataram que após o rompimento da barragem, houve o enriquecimento nos níveis de metais ao longo do rio Paraopeba, principalmente com Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb e Cd, que foram superiores aos limites permitidos pela legislação ambiental brasileira, além de altos valores de turbidez (THOMPSON *et al.*, 2020; VERGILIO *et al.*, 2020).

Para os dados analisados nesse estudo, foram identificadas diferenças significa-

tivas nos períodos antes e após o rompimento para os parâmetros “arsênio total” e “níquel total”, no entanto, as medianas desses parâmetros estão abaixo dos limites estabelecidos pela legislação (0,01 mg/l As e 0,025 mg/L Ni). No que se refere aos resultados de “níquel total”, observou-se que nas estações BP068 e BP070 ocorreram violações de 5% e 4%, respectivamente. As violações para o parâmetro “arsênio total” (5%) após o rompimento da barragem ocorrerem na estação BP072.

De acordo com o Igam (2020a), registros não conformes nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2020 refletem o impacto do material extravasado proveniente da barragem e a remobilização dos sedimentos do rio Paraopeba provocada pelo aumento das chuvas.

O parâmetro “chumbo total” apresentou os maiores registros nas estações BP068 e BP070, com níveis acima do limite de classe 2 (0,01 mg/L), violando 40% e 35% das amostras de cada estação, respectivamente, após o rompimento da barragem.

Assim como ocorreu com o chumbo, os maiores percentuais de violações de mercúrio total (valores acima de 0,2 µg/L) ocorreram nas estações BP068 (18%) e BP070 (8%). As amostras acima dos limites da legislação ocorreram no período chuvoso. Em relação ao parâmetro “cádmio total”, as duas violações ocorridas no período avaliado também aconteceram nas estações BP068 e BP070, respectivamente, logo após o rompimento da barragem.

Para os parâmetros “cobre dissolvido” e “zinco total”, todas as estações tiveram comportamento semelhante tanto no período pré como pós-rompimento, com violações de até, no máximo, 5% nos pontos de monitoramento. De acordo com o Igam (2020a), não existem evidências que as variações nos valores de cobre dissolvido possam ser relacionadas ao rompimento da barragem. Não foram registradas violações para o parâmetro “cromo total” após o rompimento da barragem.

A “condutividade elétrica *in loco*” não possui limite na legislação, mas sua análise permite verificar indiretamente o comportamento dos eletrólitos na água, inclusive íons de metal. Os resultados das medianas variaram de 67,4 µS/cm, na BP068 (no rio Paraopeba, 5 km a jusante da captação da COPASA em Brumadinho), até 95,8 µS/cm, na BP078 (no rio Paraopeba a jusante da foz do rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba) no período pré-rompimento. Logo após o rompimento as medianas foram de 70,9 µS/cm na estação BP068 e 100,05 na estação BP078, portanto sem grandes variações.

Os dados de “oxigênio dissolvido” apresentam menor variabilidade, com medianas variando entre 6,6 mg/L no rio Paraopeba, a montante de sua foz na barragem de Três Marias (BP099), após o rompimento e 7,7 mg/L no rio Paraopeba, na localidade de Melo Franco (BP036), no período antes do rompimento. Após o rompimento apenas uma amostra violou o limite de classe (>5 mg/L), referente ao dia 29 de janeiro de 2020 na estação BP078.

Quanto ao parâmetro “turbidez”, nota-se que as medianas variaram de 14 UNT, no rio Paraopeba, a montante de sua foz na barragem de Três Marias (BP099), até 41 UNT, no rio Paraopeba na localidade de Melo Franco (BP036), na série histórica antes do rompimento. Mesmo apresentando medianas abaixo do limite legal estabelecido para esse corpo de água (100 UNT), todas as estações apresentaram violações no período antes do rompimento, sendo que a estação BP078, situada no rio Paraopeba a jusante da foz do rio Pardo, em Pompéu, apresentou o maior percentual de violação (25%). Vale ressaltar que a maioria das violações de turbidez nos pontos analisados ocorreram na estação chuvosa, sugerindo o aporte de sólidos de origem difusa da bacia. Após o rompimento as medianas de todas as estações, exceto a BP099, apresentaram valores acima do limite legal estabelecido, além de violações acima de 50%.

Já com relação ao “ferro dissolvido”, os valores medianos de antes do rompimento são, em geral, mais altos no trecho compreendido entre as estações BP036 (montante da área afetada) e BP082 (rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas) do que nos pontos mais a jusante. Após o rompimento, todas as estações apresentaram medianas superiores ao valor do limite legal, de 0,3 mg/L.

A exemplo do parâmetro anterior, as medianas de “manganês total” também se reduzem da estação BP036 até a estação BP099 no período antes do rompimento. Verifica-se que valores elevados de manganês já eram observados antes do rompimento, tendo percentuais de violação superiores a 70% ao longo da série histórica para as estações BP036, BP068, BP070 e BP072 (IGAM, 2019). Após o rompimento somente a estação BP099 não apresentou violações acima de 70%, sendo que as estações BP068, BP070 e BP072, situadas logo a jusante do rompimento, apresentaram violações de 100% das amostras coletadas. É importante ressaltar que na bacia do rio Paraopeba a exploração de minério de ferro e manganês ocorre na região do Quadrilátero Ferrífero e no alto e médio curso da bacia, região onde se localizam estas estações, portanto, o solo da região é naturalmente rico em ferro e manganês.

Sendo assim, é possível afirmar que o derramamento de rejeitos de minério nos afluentes e no rio Paraopeba, consequência do rompimento da barragem, causou sérios impactos na qualidade da água. A avaliação do parâmetro “turbidez” permite concluir que houve uma maior variação da concentração nos pontos de monitoramento mais próximos ao local do rompimento da barragem (até 42 km) com diminuição gradativa ao longo do percurso do rio. Já os metais característicos do rejeito, ferro dissolvido e manganês total, apresentaram aumento expressivo depois do desastre.

## 4. Conclusão

O rompimento da barragem de rejeitos da Mina do Córrego do Feijão acarretou mudanças de cobertura do solo e qualidade das águas superficiais bastante expressivas. As alterações observadas até então apontam para a ocorrência de graves impactos socioambientais decorrentes do volume do rejeito de mineração extravasado, caracterizando esse crime ambiental como um dos mais emblemáticos do estado de Minas Gerais.

A localização da barragem que se rompeu, logo a montante das instalações da mineradora e de propriedades particulares, acarretou uma grande quantidade de perdas humanas, e seus impactos no ambiente e nas comunidades próximas ainda vão ser sentidos por um período indeterminado.

Antes do rompimento a maior parte da área atingida era recoberta com vegetação natural ou em estado avançado de crescimento. As áreas relacionadas às propriedades da empresa mineradora representam a segunda maior ocupação predominante, seguida das regiões de habitações, estradas e vias de acesso. Grande parte da porção danificada abrange áreas descritas na legislação como de preservação permanente de cursos d'água, uma vez que toda a calha do ribeirão Ferro-Carvão foi sobreposta pelo material.

Foi possível também estimar o volume do rejeito que galgou pela estrutura e foi depositado na bacia do ribeirão. O volume é significativo e, como o rejeito possui características específicas, pode tornar o solo da região impróprio para determinados usos, como agropecuária e construção civil, por um tempo difícil de estimar.

De maneira geral, observa-se que os maiores valores dos parâmetros de qualidade de água ocorreram logo após o desastre, principalmente nos primeiros 42 km do rio



Paraopeba, nas estações BPO68 e BPO70, justificando a relevância e os dados significativamente diferentes das demais estações. Ademais, verificaram-se grandes oscilações para os parâmetros, sobretudo devido às ocorrências de chuvas, que contribuíram com o revolvimento do material depositado no leito do rio ou novos aportes de rejeitos no rio Paraopeba, de trechos a montante.

Para o período anterior ao rompimento, as medições da qualidade das águas nas estações de monitoramento no rio Paraopeba caracterizaram o trecho estudado como fortemente atingido nos momentos iniciais após o evento, principalmente em relação à turbidez e aos metais como ferro e manganês.

Uma vez que a presença de metais tóxicos foi identificada no curso d'água nas estações mais próximas ao rompimento da barragem e também após eventos chuvosos, são necessários estudos que contribuam para o esclarecimento do aporte desses metais no rio Paraopeba, com a avaliação da presença desses compostos não apenas na água superficial, como também nos sedimentos. É recomendado aprofundar o entendimento da geoquímica desses elementos no corpo hídrico, além de realizar uma avaliação de possíveis rotas e danos que esses elementos, uma vez liberados pelo rompimento da barragem, ainda podem causar.

Assim sendo, vê-se que os danos ocasionados pelo rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro podem ser estudados e caracterizados por uma série de ferramentas da estatística e da geotecnologia. Os métodos apresentados se aperfeiçoam a cada dia e se mostram úteis à identificação das sequelas deixadas ao ambiente natural e antrópico, possibilitando a responsabilização dos poluidores e proporcionando informações importantes para a tomada de decisões quanto à remediação e à prevenção de novos desastres.

## Referências

ADIANSYAH, J. S. *et al.* A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 1050-1062, 2015.

ALMEIDA, C. M. DE; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. *Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual*. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

ANA. *Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG*. s.d. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce\\_22\\_03\\_2016v2.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf). Acesso em: 21 maio 2020.

ANM. *Classificação de Barragens de Mineração – Data base Fev/2019*. 2019a. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-classificacao-de-barragens-de-mineracao/plano-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 6 jan. 2020.

ANM. *Resumo Campanha Entrega DCE setembro 2019*. 2019b. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/resumo-campanha-entrega-dce-setembro-2019/view>. Acesso em: 6 jan. 2020.

BRASIL. *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Brasília: DOU, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 15 abr. 2019.

BRASIL. *Portaria do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) nº 70.389, de 17 de maio de 2017*. Brasília: DOU, 2017. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-70-389-de-2017>. Acesso em: 15 abr. 2019.

COBRAPE. *Relatório do Diagnóstico da Bacia do Rio Paraopeba*. s.d. Disponível em: <https://www.pdrhparaopeba.com/>. Acesso em: 15 abr. 2020.

DIAS, C. A. *et al.* Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. *Revista Espinhaço | UFVJM*, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2018.

FONTOURA, Y. *et al.* “Da Lama ao Caos”: Reflexões sobre a Crise Ambiental e as Relações Estado-Empresa-Sociedade. *Farol - Revista de Estudos Organizacionais e Sociedade*, v. 6, n. 15, p. 17-41, 2019.

GIRI, S.; QIU, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 173, p. 41-48, maio 2016.

IGAM. *Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba*. Belo Horizonte: Igam, 2013.

IGAM. *Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais*. Belo Horizonte: Igam, 2019.

IGAM. *Avaliação da qualidade da águas e sedimentos do Rio Paraopeba: acompanhamento da qualidade das águas do Rio Paraopeba após 1 ano do rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA – Brumadinho/MG*. Belo Horizonte: Igam, 2020a.

IGAM. *Informativo da qualidade das águas do rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 da mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais*. . Belo Horizonte: Igam, 2020b.

KOSSOFF, D. *et al.* Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229–245, 2014.

MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008*. Belo Horizonte, 2008.

NAMUGIZE, J. N.; JEWITT, G.; GRAHAM, M. Effects of land use and land cover changes on water quality in the uMngeni river catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 105, n. April 2017, p. 247–264, 2018.

ONGLEY, E. D.; XIAOLAN, Z.; TAO, Y. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, v. 158, n. 5, p. 1159–1168, 2010.

ROCHA, C. H. B. *Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar*. 3. ed. Juiz de Fora: Autor, Ed. do, 2002.

SISEMA. *Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos*. s.d. Disponível em: [idesisema.meioambiente.mg.gov.br](http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br). Acesso em: 11 out. 2019.

THOMPSON, F. *et al.* Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*, v. 705, p. 135914, 2020.

VERGILIO, C. DOS S. *et al.* Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020.

WANG, W. *et al.* Analysis of point source pollution and water environmental quality variation trends in the Nansi Lake basin from 2002 to 2012. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 5, p. 4886–4897, 2016.

WARBURTON, M. L.; SCHULZE, R. E.; JEWITT, G. P. W. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*, v. 414-415, p. 118-135, jan. 2012.