

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**EFEITO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO NA
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAOPEBA**

Fernanda Loebel Braido

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FERNANDA LOEBEL BRAIDO

EFEITO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA
CÓRREGO DO FEIJÃO NA QUALIDADE DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAOPEBA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Rio Claro - SP

2023

B814e

Braido, Fernanda Loebel

Efeito do rompimento da barragem da mina Córrego do Feijão na qualidade das águas superficiais na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba / Fernanda

Loebel Braido. -- Rio Claro, 2023

56 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Marcelo Loureiro Garcia

1. Monitoramento Ambiental. 2. Brumadinho. 3. Rio Paraopeba. 4. Qualidade da Água. 5. Barragem de Rejeito. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

FERNANDA LOEBEL BRAIDO

EFEITO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA
CÓRREGO DO FEIJÃO NA QUALIDADE DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAOPEBA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

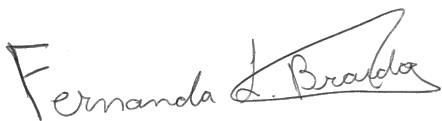
Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia (orientador)

Prof. Dr. Jandir Pereira Blasius

Profa. Dra. Marcia Regina Stradioto

Rio Claro, 27 de novembro de 2023.



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram durante minha jornada na universidade, a todas as pessoas que estiveram comigo nos momentos de descontração e nos momentos de luta, eu não teria atravessado todos esses anos sem a ajuda de vocês.

Especialmente aos meus pais, Selma e Denílson, por sempre me apoiarem independente da circunstância e me incentivaram a buscar o melhor para mim, sem questionamentos, e sempre com muita confiança. Vocês são luzes na minha vida, e sou extremamente grata por essa família que tenho, que tanto me apoia.

Ao meu companheiro, por todo suporte, paciência, companheirismo, amor e amizade, principalmente nesta etapa final de conclusão de curso, pois as coisas fluem melhor quando estamos juntos.

A todas as pessoas que já dividiram e dividem moradia comigo, República Marte por me acolher nas primeiras semanas da graduação, República Piores Pessoas por ser uma família, regada de afeto e companheirismo, República Pamônhas por todas as vivências e construções que me tornaram a mulher que sou hoje, e por fim, República Amazonas, por todas as batalhas que lutamos e vencemos juntas, falo com alegria que somos verdadeiras guerreiras. As experiências adquiridas dentro das repúblicas moldam nosso caráter e nos prepara para a vida lá fora, acredito que foi um dos principais pilares de aprendizado que tive durante minha vivência universitária.

Ao EGRIC- Espelo grupo Rio Claro, por me fazer não desistir de tudo e me trazer alegria ao fazer ciência, por todos os campos e momentos únicos que a espeleologia me proporcionou.

Agradeço a todo o sagrado, meu anjo da guarda, meu pai Xangô, mãe Yemanjá e a todos os orixás, por me darem força, serenidade e sabedoria para trilhar meu caminho. Agradeço aos seres de luz que me acompanham, que abrem meus caminhos, cuidam de mim, me protegem para que nenhum mal me atinja, que me orientam para que eu tenha plenitude e consciência ao trilhar minha vida.

Sou abençoada, e me sinto grata a todos.

Axé!

RESUMO

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem B1 da mina Córrego do Feijão colapsou, formou uma enxurrada com cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito, que contaminou o Rio Paraopeba, seus afluentes e causou a morte de 270 pessoas. Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar os impactos ambientais negativos decorrentes da contaminação do Rio Paraopeba - MG. Para tal, foram analisados dados de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) sobre o monitoramento da qualidade das águas superficiais das bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais, que estão disponíveis online e de forma gratuita no portal InfoHidro. Foram coletados os dados de 09 (nove) estações de monitoramento, distribuídas ao longo de toda a bacia, incluindo duas estações a montante do local do rompimento, para controle dos dados. O intervalo de tempo selecionado foi de 2017 até 2022, e foram utilizadas duas amostragens por ano (períodos chuvosos e de secas). Os resultados apontaram concentrações de alumínio, arsênio, chumbo, ferro, fósforo, manganês, selênio e zinco acima dos valores de referência (VR) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos Classe 2, ao longo de toda a Bacia Hidrográfica. As contaminações por arsênio, chumbo e selênio foram originadas pelo desastre de Brumadinho, pois não foram identificadas concentrações relevantes destes elementos pré-rompimento. Os altos teores de alumínio, ferro, fósforo e manganês já eram observados antes de 2019, ou seja, a bacia já estava contaminada por estes elementos devido ao uso e ocupação da região, porém o desastre acentuou esta situação, e a partir de 2020 foram observadas concentrações até 60 vezes acima dos VR's destes elementos. Todos os parâmetros abordados apresentaram tendência de queda na região do alto curso da bacia durante o intervalo de tempo analisado. Isto indica que as contaminações migraram para as regiões a jusante do curso do rio, o que espalhou e distribuiu estes elementos geograficamente. Esta migração pode atrapalhar nas medidas corretivas implementadas nas águas do Rio Paraopeba, pois será necessária uma área de atuação muito maior para atenuação destes contaminantes.

Palavras-chave: Barragem de Rejeitos. Brumadinho. Qualidade das Águas. Rio Paraopeba. Monitoramento Ambiental.

ABSTRACT

On 25 January 2019, the B1 dam at the Córrego do Feijão mine collapsed, resulting in a torrent of around 12 million cubic metres of tailings, which contaminated the Paraopeba River, and caused the deaths of 270 individuals. This study aims to investigate the impacts of the disaster on the UPGRH SF3 - Paraopeba River Basin and analyse the progression of inorganic element contamination within the Paraopeba River. The data were obtained from the monitoring of surface water quality in the hydrographic basins of Minas Gerais, developed by the Minas Gerais Institute of Water Management (IGAM) and available online and free of charge in the InfoHidro portal. Nine (09) monitoring stations, were selected and dispersed throughout the basin, including two stations located in the amount of B1 dam, for data control. The study was based on a time interval from 2017 to 2022, with two samples per year (during wet and dry seasons). The results of the monitoring revealed concentrations of aluminium, arsenic, lead, iron, phosphorus, manganese and selenium, above the reference values (RVs) set by CONAMA Resolution 357/2005 for water bodies classified as Class 2, across the SF3 basin. Contamination of arsenic, lead and selenium has emerged as a consequence of the Brumadinho disaster. These elements demonstrated no noticeable concentrations before the disaster. High levels of aluminium, iron, phosphorus, and manganese had already been detected prior to 2019, indicating contamination of the basin due to the human use and occupation of the region, however the tragedy increased the situation, with concentrations up to 60 times higher than the RVs of these elements being detected from 2020 onwards. All the parameters discussed showed a decreasing trend in the upper reaches of the basin during the time interval analysed. The data suggests that the contamination has migrated to the lower course of the river, which has spread and distributed these elements geographically. This migration could make the corrective measures difficult to implement in the waters of the Paraopeba River, as a much larger area of action will be needed to mitigate these contaminants.

Keywords: Dam wall. Brumadinho. Water Quality. Paraopeba River. Environmental Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: ANTES E DEPOIS DO LOCAL DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1	11
FIGURA 2: IMPACTOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM.	12
FIGURA 3: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO SUB-BACIA DO RIO PARAPEBA (UNIDADE DE PLANEJAMENTO DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS - UPGRH SF3)	13
FIGURA 4: REGIÕES GEOMORFOLÓGICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA.....	17
FIGURA 5: O CRÁTON SÃO FRANCISCO.	19
FIGURA 6: MAPA GEOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA	20
FIGURA 7: MAOA DE SOLOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS.	22
FIGURA 8: LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO SELECIONADAS.	25
FIGURA 9: GRÁFICO DE TENDÊNCIA TEMPORAL DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS INORGÂNICOS NOS PONTOS P01 E P02.....	31
FIGURA 10: GRÁFICO DE TENDÊNCIA TEMPORAL DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS INORGÂNICOS NOS PONTOS P03 E P04.....	32
FIGURA 11: GRÁFICO DE TENDÊNCIA TEMPORAL DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS INORGÂNICOS NOS PONTOS P05 E P06.....	35
FIGURA 12: GRÁFICO DE TENDÊNCIA TEMPORAL DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS INORGÂNICOS NOS PONTOS P07 E P08.....	36
FIGURA 13: GRÁFICO DE TENDÊNCIA TEMPORAL DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS INORGÂNICOS NOS PONTOS P05 E P06.....	38
FIGURA 14: EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DOS PARÂMETROS INORGÂNICOS AO LONGO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA.....	40
FIGURA 15: EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE A) ARSÊNIO DISSOLVIDO; B) CHUMBO TOTAL AO LONGO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA.	42
FIGURA 16: EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE ARSÊNIO DISSOLVIDO, ALUMÍNIO DISSOLVIDO, FERRO DISSOLVIDO, FÓSFORO TOTAL E MANGANÊS TOTAL AO LONGO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA.	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	10
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVOS GERAIS	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
3.1 HIDROGRAFIA	16
3.2 CLIMA E VEGETAÇÃO	16
3.3 TOPOGRAFIA	17
3.4 CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÔMICAS	18
3.5 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	18
3.5.1 Geologia Local	20
3.6 PEDOLOGIA LOCAL	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 MONITORAMENTO REALIZADO PELO IGAM.....	24
4.2. AQUISIÇÃO E SELEÇÃO DE DADOS	24
4.3. TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. ANÁLISE TEMPORAL	30
5.1.1 Montante.....	30
5.1.2 Trecho 01.....	31
5.1.3 Trecho 02.....	34
5.1.3 Trecho 03.....	36
5.1.4 Trecho 04.....	38
5.2 ANÁLISE ESPACIAL	39
5.2.1 Pré-rompimento (2017 e 2018)	39
5.2.2 Ano do rompimento (2019).....	40
5.2.3 Pós-rompimento (2020, 2021 e 2022).....	41

6. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	47
APENDICE I.....	51

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O sudeste de Minas Gerais é reconhecido mundialmente como uma das áreas mais significativas para a exploração de bens metálicos, desde o século XVII, devido principalmente à presença do Quadrilátero Ferrífero. Foi nesse contexto que diversas cidades foram estabelecidas e impulsionadas pela abundância de importantes minérios, como ouro, bauxita, calcário, manganês, caulim e argila, e principalmente, ferro (ROESER, 2010).

A Bacia do Rio Paraopeba, objeto de estudo deste trabalho, possui uma extensão das rochas mineralizadas do Quadrilátero Ferrífero em sua porção central, e com isso, é cenário de diversos processos de licenciamento e lavra de grandes minerações, principalmente para extração de ferro. Porém a exploração mineral na região da bacia tem apresentado um risco significativo para o ecossistema local devido à alta concentração de barragens de rejeitos, que representa uma potencial fonte de danos ambientais, incluindo a perda de serviços vitais, como abastecimento de água e atividades de pesca.

No 25 de Janeiro de 2019 a barragem de contenção de rejeitos B1 da mina Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho - MG, pertencente à empresa mineradora Vale S/A, rompeu. Inicialmente, a enxurrada com cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos atingiu as instalações da Empresa e percorreu o Ribeirão Ferro-Carvão (Afluente do Rio Paraopeba), atingiu propriedades particulares, até chegar a calha do Rio Paraopeba. O fluxo de lama se espalhou por boa parte da bacia hidrográfica, até a Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo (IGAM, 2020a; SILVA *et al.*, 2020).

O rompimento dessa Barragem é dado como um dos maiores crimes ambientais e desastres de trabalho já ocorridos no Brasil, totalizando 270 óbitos – desses, 127 (47%) eram trabalhadores diretos da Vale e os outros 118 (44%) terceirizados da empresa (FREITAS *et al.*, 2019). Tal evento provocou danos ambientais irreversíveis à qualidade da água e do solo, superficiais e subsuperficiais, provocando a destruição de 133,27 hectares de vegetação nativa do bioma Mata Atlântica e 70,65 hectares de Áreas de Proteção Permanente (IBAMA, 2019).

A Figura 1 mostra imagens de satélite da Mina Córrego do Feijão, antes e depois do rompimento da barragem. É possível observar o rastro de lama de rejeito, rica em metais pesados, avançando sobre as instalações da mina, como o refeitório e o prédio administrativo da empresa. O avalanche de lama percorreu cerca de 10 quilômetros pelo curso do Ribeirão

Ferro-Carvão até atingir o Rio Paraopeba, onde se misturou com as águas do rio, e percorreu longos quilômetros ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.

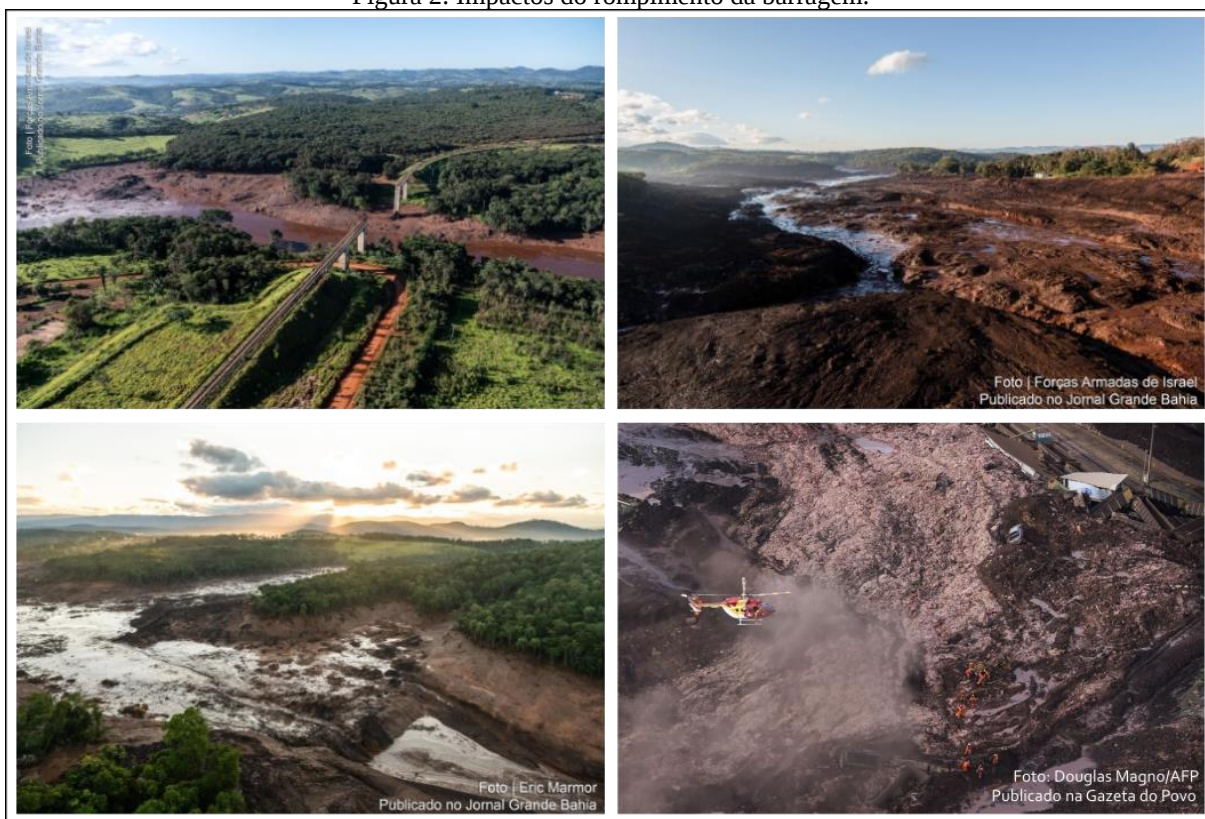
Figura 1: Antes e depois do local do rompimento da barragem B1



Fonte: Google Earth (08/2018; 02/2019)

Os impactos deste desastre incluem a contaminação e a alteração ambiental na área, que afetam diretamente a biodiversidade, a dinâmica dos rios e causam alterações dos ciclos de vetores, hospedeiros e reservatórios de doenças, além da alteração abrupta na organização social e no modo de vida da população de Brumadinho, principalmente das famílias dos trabalhadores da Mina Córrego do feijão. Para além dos “afetados” pelo desastre definidos pela imprensa (desalojados, desabrigados, mortos, feridos e doentes), todos que tiveram suas condições de vida afetadas pelo desastre também devem ser considerados. Na figura 2 estão dispostas algumas imagens da região do Vale do feijão após o desastre, em que é possível observar os primeiros impactos visuais do desastre.

Figura 2: Impactos do rompimento da barragem.



Legenda: (a) trilho do trem (propriedade da Vale S/A) que foi destruído na hora na avalanche de lama; (b e c) rastro de lama; (d) o trabalho dos bombeiros, com apoio aéreo na busca pelos corpos desaparecidos após o desastre.

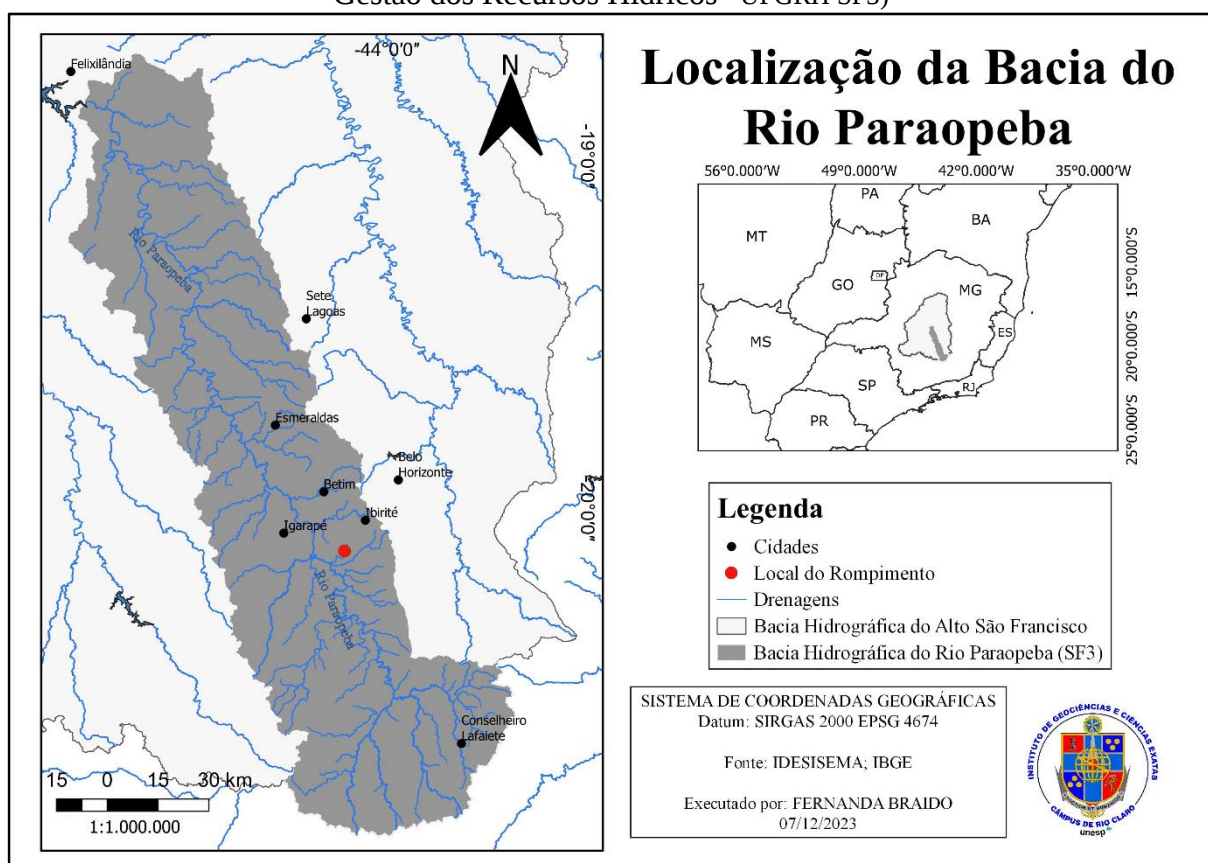
A barragem B1 era do tipo “a montante”, que consiste em utilizar o próprio rejeito para sua construção, formando progressivos degraus (diques), um sobre o outro, conforme vai aumentando seu reservatório (CAMPOS, 2021). Este método é inicialmente mais barato para as empresas, pois utiliza o próprio rejeito para formação da barragem, e até então um dos mais utilizados no Brasil, devido seu baixo custo. Porém a acumulação progressiva de sedimentos ao longo do tempo pode resultar em uma estrutura vulnerável, suscetível a deslizamentos de terra e rupturas, elevando substancialmente os riscos de rompimento (ANM, 2022).

Depois do desastre ocorrido no município de Mariana, em 2015 e o de Brumadinho, em 2019, ficou proibida a construção de barragens a montante por meio da Resolução Normativa nº 24/2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM). Esta norma reflete a necessidade atual de adotar práticas mais seguras e sustentáveis no setor minerário, priorizando a preservação ambiental e a segurança das comunidades próximas.

1.2 Localização da Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, no estado de Minas Gerais, é dividida em 10 sub-bacias (IGAM, 2011), são elas: alto curso da bacia hidrográfica do rio São Francisco até a confluência com o Rio Pará (SF1), Rio Pará (SF2), Rio Paraopeba (SF3), entorno do Reservatório de Três Marias (SF4), Rio das Velhas (SF5), rios Jequitai e Pacuí (SF6), afluentes mineiros do Rio Paracatu (SF7), Rio Urucuaia (SF8), rios Pandeiros e Calindó (SF9) e afluentes mineiros do Rio Verde Grande (SF10). Neste trabalho a bacia hidrográfica selecionada foi a SF3 - Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (Figura 3).

Figura 3: Localização da Área de Estudo sub-bacia do rio Paraopeba (Unidade de Planejamento de Gestão dos Recursos Hídricos - UPGRH SF3)



A sub-bacia do Rio Paraopeba (UPGRH SF3) está inserida no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, ocupando 12.054 km² de sua área. A SF3 abrange 48 municípios, dos quais 35 possuem suas sedes municipais dentro da Bacia, entre eles Conselheiro Lafaiete, Betim e Brumadinho, totalizando uma população de 930.560 habitantes próximos aos corpos hídricos (IBGE, 2012).

O Rio Paraopeba, principal corpo hídrico da bacia, nasce na Serra do Espinhaço e percorre 510 km na direção NW-SE até desaguar na represa de Três Marias, e é dividida entre alto, médio e baixo curso, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (COBRAPE, 2020).

1.3 Justificativas

A justificativa para o estudo da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba é fundamentada na sua relevância estratégica e no papel vital que desempenha para diversos setores na região. A bacia fornece água para abastecimento humano, atividades agrícolas, processos industriais e para a manutenção dos ecossistemas locais. Portanto, a manutenção da qualidade da água nessa bacia é crucial para o bem-estar humano, o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.

Nesse contexto, a urgência e a essencialidade do monitoramento da qualidade das águas superficiais tornam-se evidentes. A análise contínua de parâmetros como turbidez, pH, presença de metais pesados e outros poluentes são fundamentais para identificar possíveis contaminações e alterações significativas no meio ambiente. Além disso, considerando o contexto de desastres, como os que podem ocorrer em decorrência de atividades antrópicas ou eventos naturais, é imprescindível construir um panorama temporal e espacial desses efeitos.

Ao compreender a dinâmica temporal e espacial da qualidade da água na bacia do Rio Paraopeba, será possível implementar medidas preventivas e corretivas mais eficazes. Isso contribuirá para a gestão sustentável dos recursos hídricos, a preservação da saúde humana, a manutenção da biodiversidade e a promoção do desenvolvimento socioeconômico regional de maneira equilibrada e responsável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste estudo foi analisar como a qualidade da água na Sub Bacia do Rio Paraopeba (UPGRH SF3) foi afetada pelo rompimento da barragem B1 da mineradora Vale S/A, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, em Brumadinho.

2.2 Objetivos específicos

- Levantar os principais poluentes presentes nas águas superficiais da SF3, e analisar os impactos do desastre ambiental;
- Acompanhar a evolução temporal e espacial da qualidade das águas na Bacia;
- Buscar correlação entre algumas anomalias na composição química das águas da SF3 com a geologia e pedologia local.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Hidrografia

O Rio Paraopeba é o principal curso de água na Bacia Hidrográfica do Paraopeba e tem origem na Serra do Espinhaço de onde percorre cerca de 510 km na direção NW-SE até desaguar na represa de Três Marias.

Os principais afluentes do Rio Paraopeba, de acordo com IGAM (2009), são: Rio Maranhão, Rio Pequeri, Ribeirão Casa Branca, Ribeirão Grande, Ribeirão Sarzedo, Ribeirão Betim, Ribeirão Macacos, Ribeirão Cedro e Ribeirão São João na margem direita; e Rio Brumado, Rio da Prata, Rio Macaúbas, Rio Manso, Ribeirão Serra Azul e Rio Pardo.

A bacia possui grande importância para o abastecimento de água público da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O conjunto de reservatórios Rio Manso, Serra Azul e Vargem das Flores formam o Sistema Paraopeba, que é responsável pelo abastecimento de 60% da RMBH, aproximadamente 3,5 milhões de pessoas (ANA, 2023; ARSAE, 2013).

3.2 Clima e Vegetação

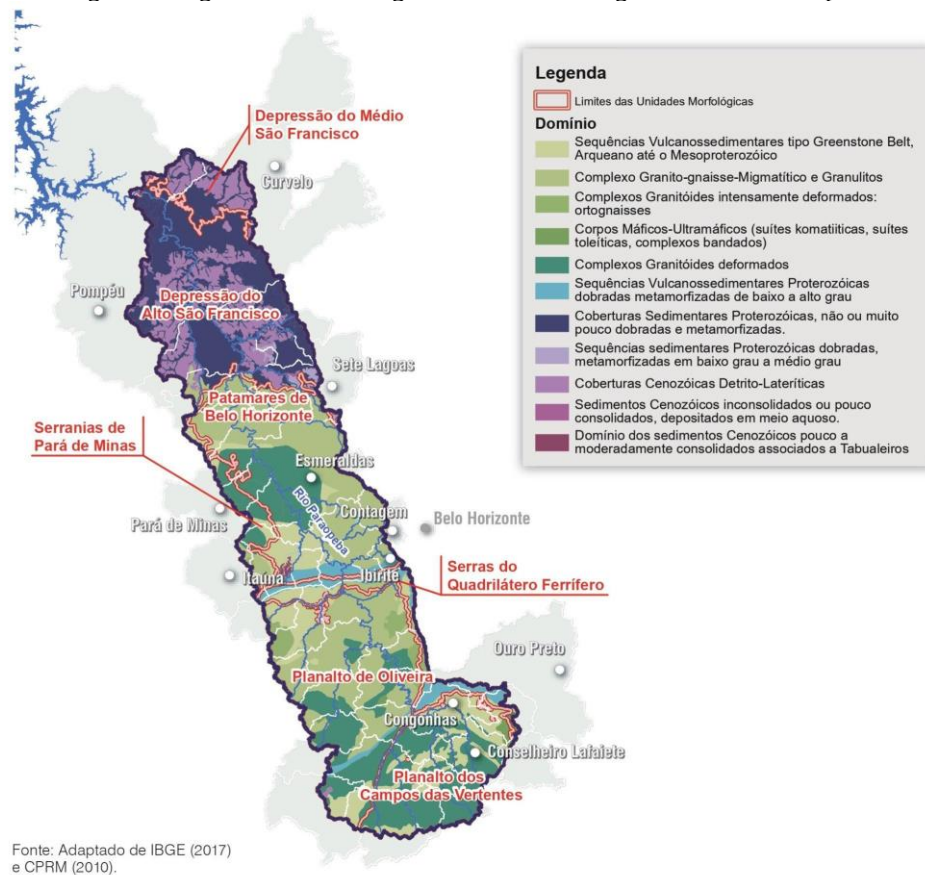
De acordo com o Mapa de Biomas do Brasil (IBGE, 2004), a área de estudo abrange uma região de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, presente de forma predominante no baixo curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Esta divisão de biomas está diretamente relacionada com os diferentes subtipos climáticos presentes na Bacia.

Segundo a classificação de Köppen, esta Bacia encontra-se em dois subtipos climáticos: Cwa e Cwb (ALVARES et al., 2013). O subtipo Cwa corresponde ao clima característico de invernos secos e verões quentes, com temperaturas acima de 22°C. Esta zona, denominada como subquente, predomina na porção central da Bacia. Já o subtipo Cwb, descrito como subtropical de altitude, se diferencia pelo verão ameno, com temperaturas médias inferiores a 22°C o ano todo (COBRAPE, 2020).

3.3 Topografia

De acordo com o Mapa de Unidades de Relevô do Brasil (IBGE, 2006), a área da bacia do Rio Paraopeba abrange quatro regiões geomorfológicas (Figura 4), são elas: Depressão do São Francisco; Planalto Centro-Sul Mineiro; Planaltos do Leste de Minas; e Serras do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 4: Regiões Geomorfológicas na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba



Fonte: COBRAPE (2020).

A região da Depressão do São Francisco é predominante no Baixo Paraopeba, na porção norte da bacia. Esta região geomorfológica apresenta as porções com menor altitude e suave variação das cotas topográficas, entre 560 e 760 metros acima do nível do mar, com declividades inferiores a 12% (COBRAPE, 2020).

A porção central da bacia, compreende principalmente a região do Planalto Centro-Sul Mineiro, além da Serra do Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por uma seção de grande altitude logo após da afluência do Rio Veloso e do Ribeirão Casa Branca (COBRAPE, 2020).

Os Planaltos do Leste de Minas compreendem o alto curso da bacia, região de maiores altitudes e declividades aparentes, com áreas mais sucessivas à ocorrência de processos de erosão laminar ou linear acelerada (ravinas e voçorocas) (BAPTISTA *et al.*, 2010).

3.4 Características socioeconômicas

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba tem grande importância socioeconômica para a região, uma vez que compreende um importante sistema de abastecimento de água, importantes mineralizações metálicas, além da presença de indústrias e áreas destinadas à agropecuária e à silvicultura (COBRAPE, 2020).

O uso e ocupação do solo predominante na bacia é a pastagem, seguido pela formação florestal (MAPBIOMAS, 2020). As atividades agropecuárias da região desempenham papel expressivo no cultivo de diversas culturas, como milho, soja, feijão e café, além da criação de gado para produção de carne e leite.

A região também é popularmente conhecida pela forte extração de minério de ferro, além da presença de indústrias metalúrgicas e do gerenciamento de resíduos e serviços. O setor minerário se concentra principalmente no médio e alto curso, onde encontram-se as mineralizações do Quadrilátero Ferrífero (COBRAPE, 2020).

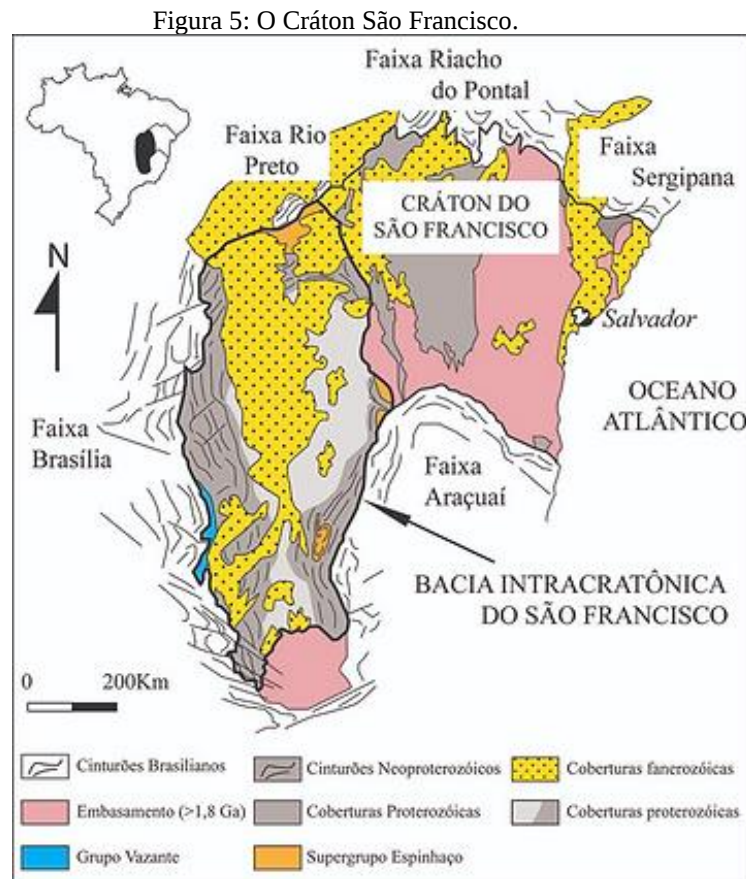
Estas condições contribuem para que a urbanização seja uma atual tendência em crescimento na bacia do Paraopeba, com o desenvolvimento de cidades e áreas urbanas ao longo do curso do Rio Paraopeba. A região do médio curso do Rio apresenta maior taxa de urbanização devido à proximidade com a capital do Estado, e está situada em uma região com maior probabilidade de impactar a qualidade das águas da Bacia do Rio Paraopeba. De acordo com (SOARES, 2021) a maioria dos municípios que compõem a região da bacia não possuem infraestrutura de saneamento suficiente para toda a população, afetando diretamente a qualidade da água dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

3.5 Contexto Geológico Regional

Geologicamente, a UPGRH SF3 encontra-se inserida na porção central do cráton do São Francisco, que atualmente se estende pelos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás, foi inicialmente descrito por Almeida (1977; 1981), como um segmento crustal consolidado no fim do Éon arqueano, não afetado pelos eventos brasileiros. O bloco continental é limitado a oeste

pela faixa Brasília, a leste pela Faixa Araçuaí, a sul pela Faixa Alto Rio Grande e a norte pelas faixas Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana (Figura 5).

O cráton em sua maior parte encontra-se coberto por rochas metassedimentares, de idades variadas, como os Supergrupos Espinhaço e São Francisco. Tais coberturas encontram-se majoritariamente deformadas por eventos compressionais ocorridos durante a orogênese Brasileira (ALKMIM et al., 1996).



Fonte: Modificado de Alkmim e Martins Neto (2001).

O Supergrupo São Francisco, também conhecido como Bacia Sedimentar do São Francisco, corresponde à porção sul do Cráton. Trata-se de uma bacia intracratônica, de idade Neo-proterozoica, que compreende duas unidades distintas: A unidade basal, essencialmente terrígena, com diamictitos, arenitos e pelitos, influenciada pelos eventos glaciais durante Neo-proterozoico (KARFUNKEL & HOPPE, 1988; PEDROSA SOARES *et al.*, 1992; UHLEIN *et al.*, 1995); e a unidade de topo, carbonática, composta por intercalações de carbonatos e pelitos marinhos, depositados em um ambiente de mar alto dominado por ondas e tempestades, no período pós-glacial (MAGALHÃES, 1989).

por siltitos e arenitos arcoseanos (COSTA & BRANCO, 1961; RADAMBRIL, 1982; NOBRE-LOPES, 1995).

O conhecido Quadrilátero Ferrífero que se dispõe na porção central da bacia, foi descrito inicialmente por Dorr (1969), e compreendido a partir dos grupos Caraçá, Piracicaba, Sabará e Itabira, sendo este último o de maior interesse econômico devido aos altos teores de ferro. De forma resumida, o Grupo Caraçá é composto por metaconglomerados, filitos e quartzitos; o Grupo Piracicaba compreende rochas metassedimentares clásticas (metaconglomerados, quartzitos, filitos e xistos), e químicas (dolomitos, mármore dolomítico e lentes de formações ferríferas); o Grupo Sabará também dispõe de rochas metassedimentares, como clorita xisto, metatufos, conglomerados, metachert, formações ferríferas pouco expressivas, metapelitos, metadiamicritos, metagrauvas, xistos, filitos, e quartzitos; e, por fim, o Grupo Itabira aflora na região a partir da Formação Cauê, com itabiritos (Formação ferrífera tipo Lago Superior) e dolomitos, com lentes de filitos e margas, (DORR, 1969; DOPICO *et al.*, 2017; CPRM, 2006).

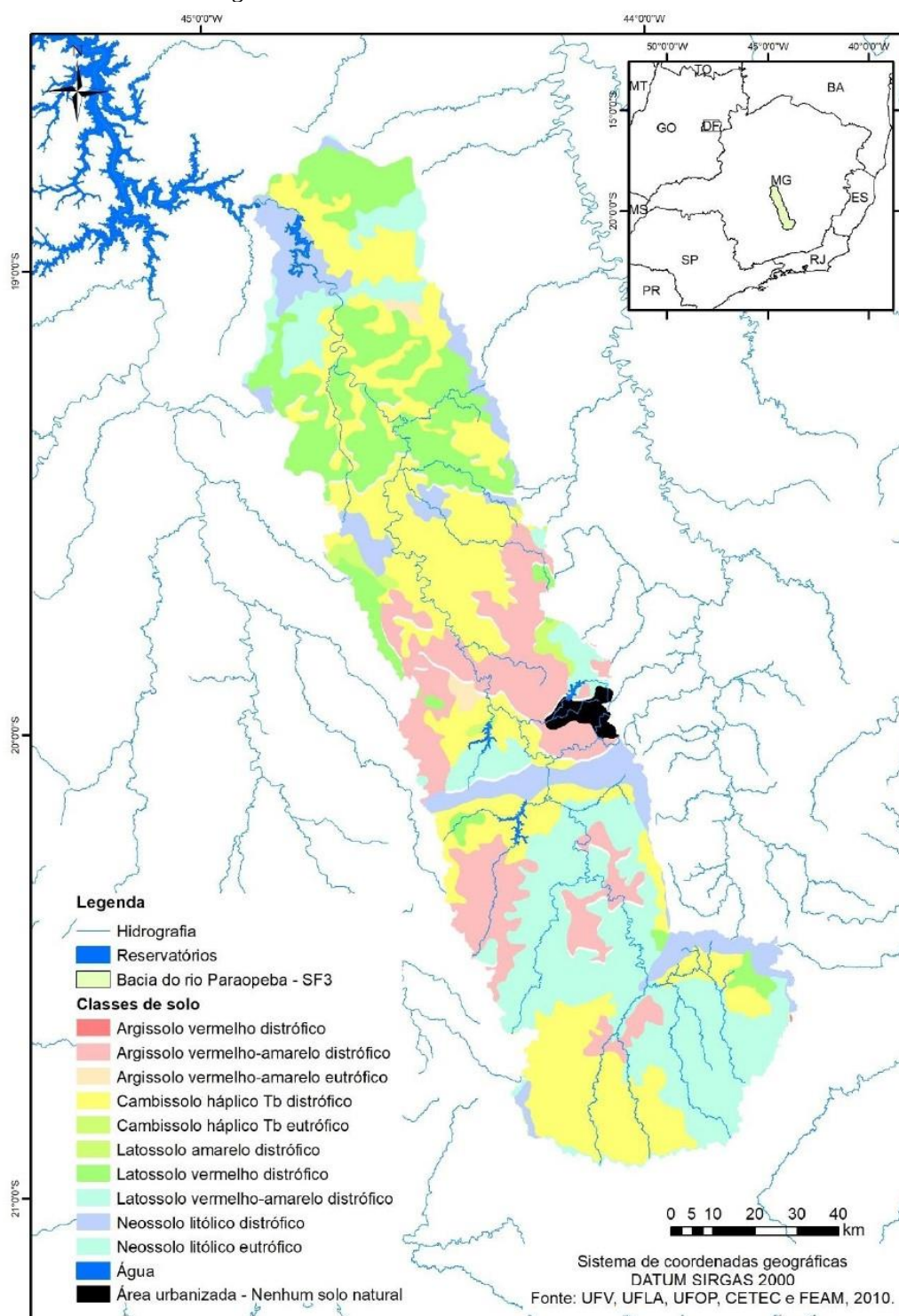
No alto e médio curso da Bacia do Paraopeba, região de maiores altitudes e amplitudes altimétricas, está o embasamento cratônico do São Francisco, com as rochas do complexo granito-gnáissico-migmatítico (CGGM) de idades Arqueanas a Neoarqueanas. No embasamento predominam o Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte, e Complexo Divinópolis, em conjunto com gnaisses, granitos e granitóides, tonalitos, além das rochas metamáficas- metaultramáficas do Grupo Nova Lima (CPRM, 2006; IDESSISEMA, 2020).

3.6 Pedologia

A pedologia local está diretamente relacionada à geologia e geomorfologia na região. A Figura 7 dispõe o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, elaborado pelas Universidades Federais de Viçosa, Lavras e Ouro Preto, juntamente com a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais e Fundação Estadual do Meio Ambiente (UFV *et al.*, 2010).

Na área de estudo, os Cambissolos Háplicos e os Latossolos Vermelho-Amarelos são as classes predominantes no alto e no baixo curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. No médio curso da bacia são observados os Cambissolos Háplicos e Argissolos Vermelho-Amarelos.

Figura 7: Mapa de Solos do estado de Minas Gerais.



Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos são bastante desenvolvidos e profundos, bem drenados, arejados, friáveis, com baixa fertilidade, resistentes à erosão, porém bastante lixiviados e deficientes em nutrientes, exceto pela alta presença de alumínio. Normalmente

ocorrem sobre rochas do do Embasamento Cristalino (granito e gnaiss) e do Supergrupo Rio das Velhas (xistos e filitos) (AMARAL *et al.*, 2004; EMBRAPA, 2006)

Os Cambissolos são semelhantes aos Latossolos, porém são menos desenvolvidos e apresentam profundidade variada, e bastante propícios à erosão. É por isso que suas características são diretamente condicionadas ao material de origem (litologia), mas de forma geral são solos de baixa fertilidade, pequena profundidade e com ocorrência de pedras na massa do solo (AMARAL *et al.*, 2004; IBGE, 2007).

Argissolos comumente apresentam uma mistura dos óxidos de ferro, são pouco férteis e muito susceptíveis à erosão, uma vez que a água tem facilidade de infiltrar no horizonte A, porém tem dificuldade para infiltrar em B, logo abaixo (AMARAL *et al.*, 2004).

Estes solos presentes na área de estudo apresentam baixa fertilidade e são susceptíveis à erosão. Isto promove o uso de fertilizantes químicos para adubação nas áreas voltadas para a cultura agrícola, que podem causar contaminações nos corpos hídricos da bacia. Além disso, na área de estudo são encontrados alguns solos ricos em misturas de elementos metálicos, devido as formações geológicas da região.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Monitoramento realizado pelo IGAM

Os corpos hídricos do Estado de Minas Gerais são monitorados pelo Instituto de Águas de Minas Gerais – IGAM, por meio do projeto “Águas de Minas” com monitoramentos trimestrais nas principais bacias hidrográficas do Estado, divididas em 36 UPGRHS, que são unidades físico-territoriais, dentro das bacias hidrográficas, onde cada região apresenta características regionais físicas, sociais, políticas e econômicas próprias (IGAM, 2021a).

Em seu monitoramento, o IGAM realiza quatro amostragens de água anualmente, duas delas intituladas, pelo próprio instituto como “Completas”, que ocorrem no primeiro e terceiro semestre de cada ano, abrangendo os principais períodos de chuva e estiagem, respectivamente. As outras amostragens, que ocorrem no segundo e quarto trimestre, são classificadas como “Intermediárias”, em que são analisados apenas parâmetros para controle (IGAM, 2021a).

O IGAM divide a porção da Bacia Hidrográfica do Paraopeba afetada pelo rompimento da barragem em cinco trechos distintos (Figura 8), para melhor definição e acompanhamento das estações ali presentes (IGAM, 2020c), de acordo com a lista a seguir:

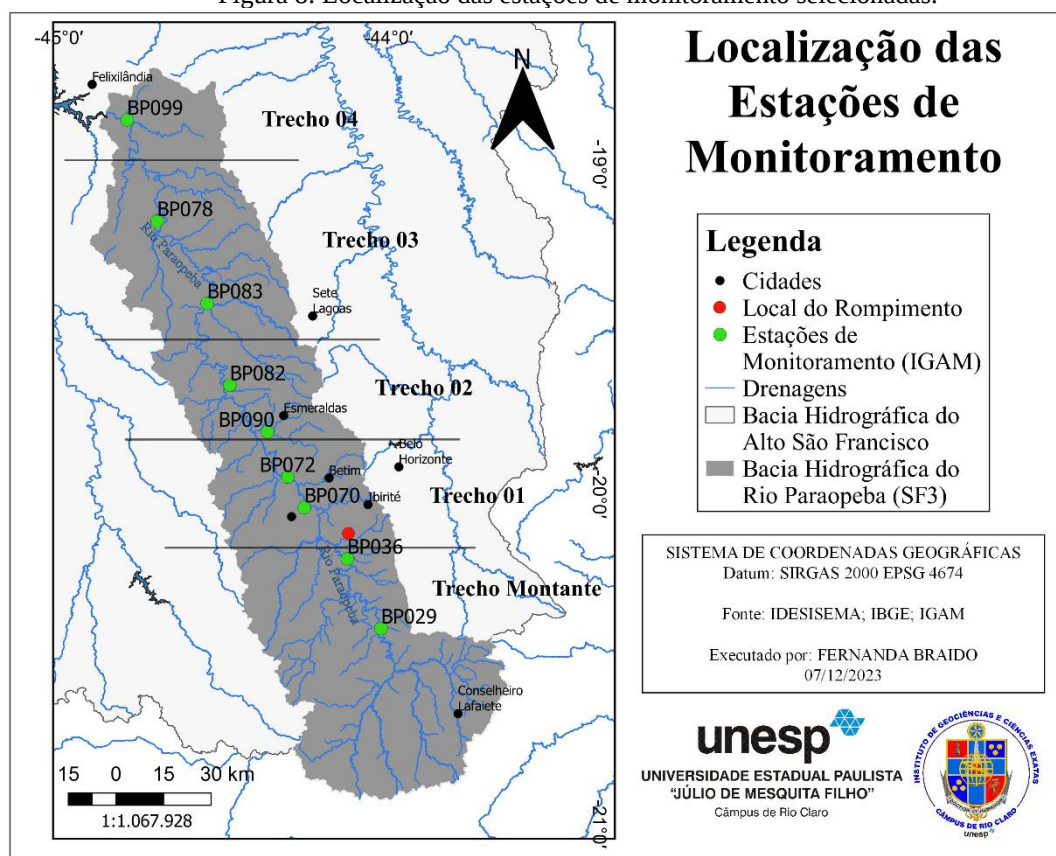
- **Trecho 1:** primeiros 40 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a montante da termelétrica de Igarapé;
- **Trecho 2:** entre 40 e 123 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão;
- **Trecho 3:** localizado entre 190 e 279km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a montante da UHE Retiro Baixo;
- **Trecho 4:** localizado a 318 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão;
- **Trecho 5:** localizado no corpo da represa de Três Marias.

4.2. Aquisição e seleção de dados

A base de dados utilizada para este estudo foi retirada do Repositório institucional do IGAM, pelo portal online InfoHidro, que está disponível com acesso livre ao público pelo link: <http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/>. Então, foram coletados dados das “Séries Históricas de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais”, posteriormente organizados em planilhas. O intervalo de tempo foi definido de 2017 a 2022, e buscou-se abranger informações antes e após o rompimento da Barragem do Córrego do Feijão.

Foram selecionadas 09 estações para análise (BP029, BP036, BP070, BP072, BP078, BP082, BP083, BP090 e BP093), distribuídas ao longo dos trechos estabelecidos, para uma amostragem representativa da área de estudo (Figura 8). Com exceção da estação BP090 que se encontra Ribeirão Grande (à montante de sua foz no Rio Paraopeba), todas as estações selecionadas localizam-se às margens do Rio Paraopeba, que dá o nome a Bacia Hidrográfica de estudo. Para cada estação, foram selecionadas as amostragens tidas como completas no monitoramento, compondo 2 (duas) amostragens por ano.

Figura 8: Localização das estações de monitoramento selecionadas.



Para este estudo não foram utilizados os dados do monitoramento especial diário de concentração de sólidos totais, realizado e disponibilizado gratuitamente pelo IGAM, uma vez que este monitoramento utiliza amostras de sedimentos de fundo de vale para acompanhar a contaminação. Esses dados não são interessantes para o atual objetivo deste estudo, que busca compreender como o desastre afetou a qualidade das águas superficiais da região, ao longo do tempo analisado.

4.3. Tratamento dos dados e análises estatísticas

Os mapas foram elaborados a partir de bases de dados disponíveis *online* gratuitamente, renderizados no *Software* QGis versão 3.16 e no *software* de edição de imagens Inkscape. As tabelas e gráficos elaborados para interpretação dos dados e análises estatísticas de tendências foram produzidos com uso do aplicativo Microsoft Excel.

Foi adotada uma nova nomenclatura para as estações de monitoramento, para facilitar a disposição e a interpretação dos dados e resultados obtidos neste trabalho. Foi estabelecida uma sequência a partir da disposição espacial das estações de monitoramento em relação à barragem (Tabela 1), seguindo os trechos definidos pelo IGAM para a bacia hidrográfica.

Tabela 1: Nomenclatura estabelecida para o trabalho em relação a distância da estação com a barragem.

Estação IGAM	Nomenclatura utilizada	Distância da Barragem	Trecho	Localidade
BP029	P01	48 Km	Montante	Município de Belo Vale (MG)
BP036	P02	10 Km		Município de Brumadinho (MG)
BP070	P03	42 Km	Trecho 01	Município de Betim (MG), próximo a cidade de São Joaquim de Bicas
BP072	P04	59 Km		Divisa entre os municípios de Betim e Juatuba (MG)
BP090	P05	99,3 Km	Trecho 02	Município de Esmeraldas (MG)
BP082	P06	123 Km		Município de Esmeraldas (MG)
BP083	P07	192 Km	Trecho 03	Município de Paraopeba (MG)
BP078	P08	251 Km		Município de Pompeu (MG)
BP099	P09	328 Km	Trecho 04	Município de Felixlândia (MG), próximo da barragem de Três Marias

Fonte: Elaborado por autor.

Neste trabalho foram caracterizados os impactos do rompimento da barragem do município de Brumadinho na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (SF3), para isto foram selecionados apenas parâmetros inorgânicos (metais), são eles: Alumínio dissolvido, Arsênio total, Cádmio total, Chumbo total, Cobre dissolvido, Cromo total, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Mercúrio total, Níquel total, Nitrato, Nitrito, Selênio total, Sulfato total, Sulfeto e Zinco total.

As análises estatísticas realizadas foram divididas em duas etapas para estudo: temporal e espacial, a primeira organizada a partir de uma estação de monitoramento fixa, em que foi observada a evolução das concentrações dos parâmetros inorgânicos ao longo dos anos. Para a análise espacial, foram escolhidas datas fixas e as estações dispostas de acordo com a respectiva distância em relação ao local do rompimento da barragem, o que possibilitou a análise da dispersão dos poluentes ao longo da bacia hidrográfica.

Para melhor visualização dos resultados e de possíveis tendências em relação à concentração dos compostos inorgânicos, durante as análises temporais e espaciais foram gerados gráficos e tabelas apenas com os valores das amostragens realizadas no primeiro trimestre de cada ano. As amostragens realizadas nos terceiros trimestres permaneceram apenas como controle dos resultados. Os gráficos completos, com as informações de todas as amostragens realizadas encontram-se no Apendice I.

Para determinar a conformidade das concentrações dos parâmetros inorgânicos analisados, foi adotada a Resolução CONAMA nº 357/2005, que “dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências” (CONAMA, 2005).

Segundo dados do IGAM (2020a), as águas do Rio Paraopeba, onde estão inseridas as estações de monitoramento, são classificadas como Classe 2. De acordo com CONAMA (2005) as águas doces de classe 2 podem ser destinadas:

Ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e à atividade de pesca.

Portanto, foram utilizados os valores máximos definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos de água doce Classe 2, dispostos na Tabela 02.

Tabela 02: Valores máximos de referência para os parâmetros utilizados.

Parâmetro Inorgânico	Valor de referencia*
Alumínio dissolvido	0,1 mg/L
Arsênio total	0,01 mg/L
Cádmio total	0,001 mg/L
Chumbo total	0,01 mg/L
Cobre dissolvido	0,009 mg/L
Cromo total	0,05 mg/L
Ferro dissolvido	0,3 mg/L
Fósforo total	0,1 mg/L
Manganês total	0,1 mg/L
Mercurio total	0,2 µg/L
Níquel total	0,025 mg/L
Nitrato	10,0 mg/L
Nitrito	1,0 mg/L
Selênio total	0,01 mg/L
Sulfato total	250 mg/L
Sulfeto	0,002 mg/L
Zinco total	0,18 mg/L

*Valores máximos estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 2.

Fonte: Elaborado por autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as amostras coletadas nos períodos de seca (3^o trimestre) foram nitidamente inferiores em comparação com os resultados obtidos para as amostras coletadas nos períodos chuvosos (1^o trimestre). As chuvas atuam como agitadores, que colocam os sedimentos de fundo em suspensão, e conseqüentemente, cria a tendência de maiores concentrações dos elementos nos períodos chuvosos.

Em todas as amostragens disponibilizadas pelo IGAM, não foram obtidos resultados acima do limite de quantificação laboratorial (LQ) para Cádmio total, Cobre dissolvido, Cromo total e Mercúrio total em nenhum ponto de amostragem selecionado.

Em relação ao mercúrio, vale ressaltar que em alguns estudos (BRASIL, 2020; IGAM, 2020b; POLIGNANO, 2020; RAMOS *et al.*, 2020) realizados após o desastre de 2019, em áreas à jusante da barragem, foram identificadas concentrações do metal acima dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

O relatório do IGAM de acompanhamento da qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 2 anos do rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão aponta que “a presença do mercúrio em água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, o que propiciou um aumento nas concentrações desse contaminante no período pós-desastre” (IGAM, 2021b). Este relatório também relata 05 registros de valores acima dos limites de Classe 2 para Cádmio, nos municípios de Brumadinho, Mario Campos e São Joaquim de Bicas.

Esta divergência em relação às concentrações de cádmio e mercúrio encontradas neste trabalho e em outros estudos, possivelmente ocorre devido às diferentes formas de amostragem. A série histórica (base de dados utilizada neste estudo) não coleta sedimentos de fundo, ou qualquer tipo de material sólido, já os monitoramentos especiais realizados pelo IGAM e outros órgãos ambientais após o rompimento da barragem amostram tanto água quanto sedimentos de fundo dos corpos hídricos.

O período e local de coleta das amostras de água também devem ser levados em consideração para caracterizar esta divergência, uma vez que as principais anomalias de mercúrio foram identificadas logo nos primeiros dias após o rompimento (RAMOS *et al.*, 2020), sendo a última violação do parâmetro identificada em março de 2019, em São Joaquim de Bicas, pelo IGAM (2020b).

Além disso, ao analisar o banco de dados disponibilizado pelo IGAM, com todos os resultados do monitoramento realizado no período de tempo selecionado, foram identificados

alguns resultados faltantes, em que algumas células ficaram sem preenchimento. Este é o caso das análises realizadas no 3º trimestre de 2022 para selênio, sulfato e sulfeto em todos os pontos de amostragem. Também não foi possível obter os resultados do 3º trimestre de 2022 no P03, para todos os parâmetros.

Todos os resultados obtidos neste trabalho, como as tabelas utilizadas e todos os gráficos gerados ao longo do estudo estão disponíveis no Apêndice I.

5.1. Análise Temporal

Para uma maior compreensão da evolução da qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, a primeira interpretação dos dados foi baseada na evolução temporal dos parâmetros, para cada estação de monitoramento. Desta forma, foi possível observar padrões de comportamento de alguns compostos em cada trecho da bacia.

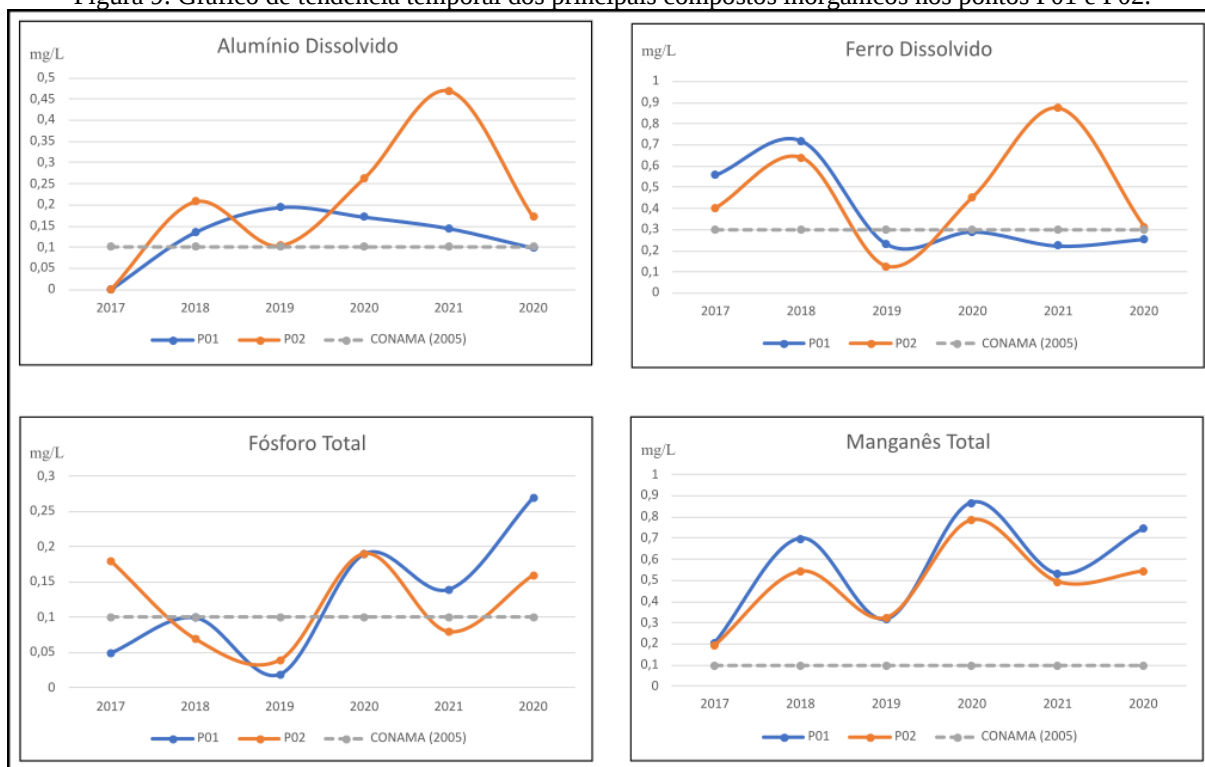
Nesta etapa foi possível identificar que, previamente ao rompimento da barragem B1, ocorrida no município de Brumadinho em 2019, os corpos hídricos da SF03 já apresentavam indícios de contaminações de alumínio, ferro, fósforo e manganês. Porém as altas concentrações dos elementos metálicos nas águas superficiais foram drasticamente intensificadas pelo desastre de 2019, que aumentou a concentração destes elementos em até 60 vezes, com referência a Resolução CONAMA (CONAMA, 2005). Além destes elementos, foram identificadas altas concentrações de arsênio, chumbo e zinco a jusante do local do rompimento.

Felizmente observou-se uma forte tendência de atenuação das concentrações dos elementos inorgânicos, ao longo de toda a bacia hidrográfica, a partir de 2021 e 2022. Isto demonstra que, embora os valores ainda estejam acima da norma ambiental, as ações corretivas implementadas na região apresentaram resultados positivos.

5.1.1 Montante

Os pontos P01 e P02 correspondem as estações à montante do local do rompimento da barragem, e foram utilizadas como controle. Nestas estações foram identificadas concentrações de alumínio, ferro, fósforo e manganês acima dos valores de referência para Classe 2 (CONAMA, 2005). Na figura 9 é possível observar a distribuição temporal destes resultados nos pontos P01 e P02.

Figura 9: Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P01 e P02.



Fonte: Elaborado por autor.

Estas anomalias estão distribuídas temporariamente de forma homogênea, ou seja, não é possível relacionar a variação das concentrações com o evento em Brumadinho, uma vez que não houve aumentos significativos após a data do rompimento.

Segundo Falqueto (2008) e Paganini (2008) as altas concentrações de fósforo nas águas superficiais ocorrem devido a lixiviação de fertilizantes agrícolas utilizados no entorno de um corpo hídrico ou devido lançamento de esgotos sanitários ou efluentes industriais.

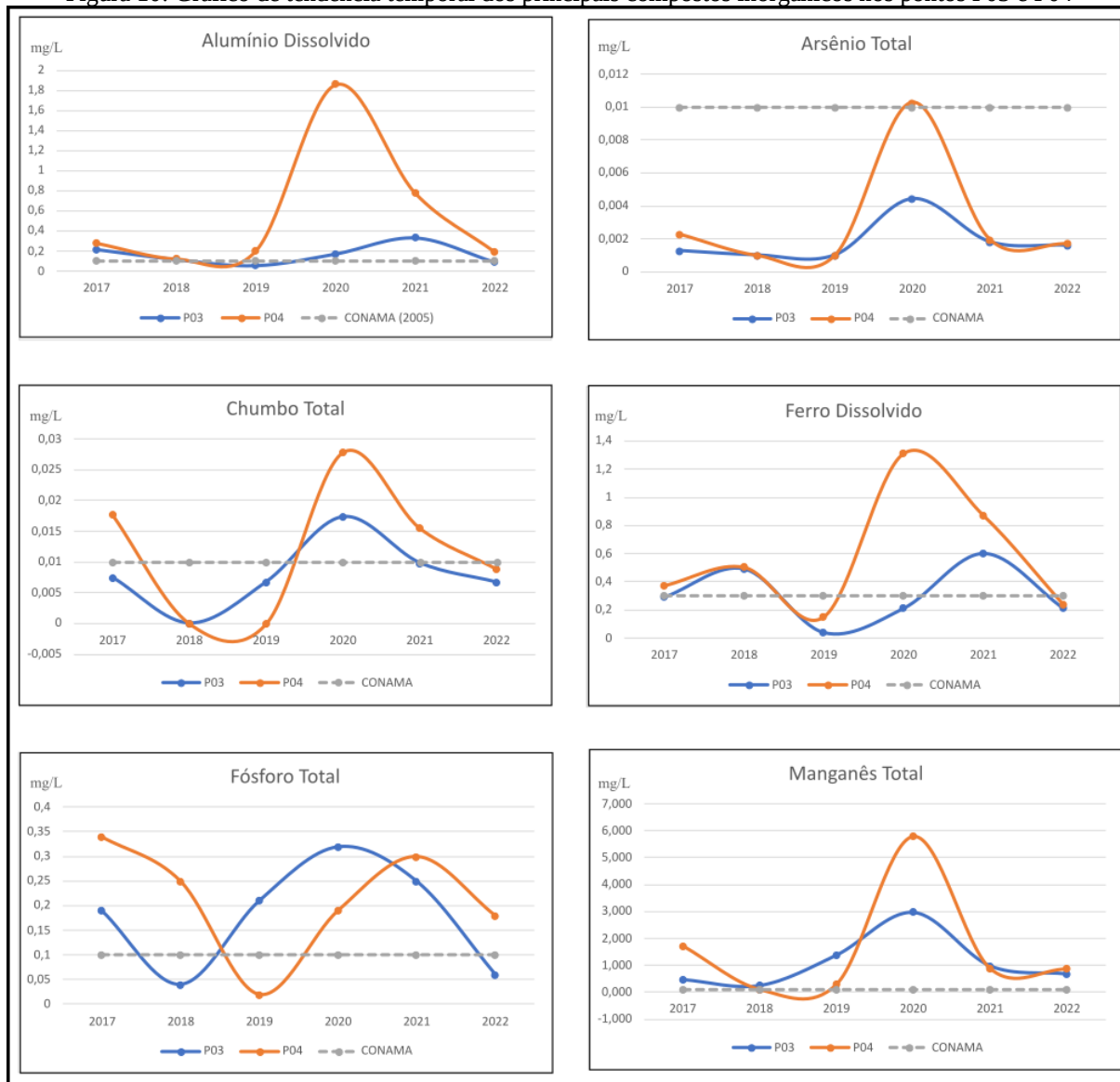
A região da SF3 está inserida num contexto geologicamente rico em elementos metálicos, e com a presença de latossolos ricos em alumínio e argilossolos ricos em ferro, com isso a área de estudo apresenta naturalmente altos teores destes elementos, tanto no solo quanto nos corpos hídricos, devido a sua lixiviação. Portanto, as concentrações de ferro e alumínio são provenientes do processo natural de erosão e lixiviação dos solos, devido as características geológicas e pedológicas locais.

5.1.2 Trecho 01

No trecho 01 estão os pontos de amostragem P03 e P04, os primeiros a serem diretamente afetados pelo rompimento da barragem. Em ambas as estações foram identificadas concentrações de alumínio, chumbo, ferro, fósforo e manganês acima dos valores de referência,

com comportamentos parecidos (Figura 10). No ponto P04 também foi observada a concentração de arsênio acima do valor de referência.

Figura 10: Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P03 e P04



Fonte: Elaborado por autor.

Ao observar os gráficos para alumínio, arsênio, chumbo, ferro e manganês percebe-se um comportamento semelhante entre os elementos, evidenciado pela ascensão abrupta nas concentrações a partir de 2019, atingindo seus valores máximos entre 2020 e 2021, seguida por uma posterior atenuação de seus valores.

Este comportamento evidencia que a área do Trecho 01, a jusante do local do rompimento da barragem B1, foi diretamente afetada pelo acidente, apresentando

concentrações máximas de alumínio, arsênio, chumbo e ferro em 2020 e 2021, que estão relacionadas ao e vento.

Em relação ao alumínio, foram identificadas concentrações acima dos valores de referência no P04, que atingiu um valor de 1,85 mg/L em 2020, e no P03, com valores de 0,33 mg/L em 2021. O arsênio teve suas principais concentrações também no P04, onde atingiu um pico de 0,0102 mg/L em 2020, já no P03 o maior valor obtido foi de 0,004 mg/L em 2020, permanecendo abaixo dos valores de referência.

O chumbo apresentou em ambos os pontos de monitoramento elevadas concentrações antes da data do rompimento, de 0,074 mg/L e 0,017 mg/L, respectivamente, em 2017, porém as maiores concentrações observadas para este elemento foram respectivamente de 0,017 mg/L e 0,027 mg/L, em 2020.

As concentrações de ferro apresentaram uma situação semelhante à do chumbo, com anomalias em 2017 no P04 de 0,37 mg/L e em 2018 de 0,49 mg/L no P03 e 0,50 mg/L no P04. Posteriormente, as concentrações de ferro no P03 chegaram a 0,60 mg/L em 2021, e no P04 eles valores foram de 1,31 mg/L em 2020, 0,87 mg/L em 2021 e de 0,76 mg/L em 2022.

Interessante notar que o chumbo e o ferro já apresentavam concentrações acima dos limites estabelecidos para o corpo hídrico antes de 2019, porém, após o evento de Brumadinho estas anomalias foram significativamente mais altas. Isto indica que o rompimento da barragem intensificou a situação destes compostos, que já caracterizavam uma situação de contaminação.

Ao analisar o comportamento das concentrações de fósforo ao longo dos anos é possível observar um certo “atraso” do P04 em relação ao P03, uma vez que ambos apresentam uma queda em sua concentração inicial, até atingir valores abaixo do LQ (em 2018 no P03 e em 2019 no P04), seguida por uma ascensão até atingir seus maiores picos (em 2020 no P03 e em 2021 no P04), e posterior queda de suas concentrações novamente.

Pode-se dizer que as concentrações de fósforo observadas nestes pontos não são oriundas exclusivamente do rompimento da barragem, uma vez que já existiam anomalias anteriores a 2019. Porém é notável o aumento significativo de fósforo após o ano de 2019, que atingiu um pico de 0,32 mg/L no 1º Trimestre de 2020, no P03.

As concentrações de manganês extrapolaram os valores de referência em praticamente todas as amostragens realizadas, com exceção do 3º Trimestre de 2017 e de 2021. Em 2020 foram encontradas as maiores concentrações de manganês, que atingiram 2,9 mg/L no P03 e 5,80 mg/L no P04.

5.1.3 Trecho 02

O trecho 02 compreende a região do município de Esmeraldas (MG), composto pelos pontos P05 e P06 do monitoramento. Neste trecho, os elementos que apresentaram concentrações acima dos valores de referência (CONAMA, 2005) foram: Alumínio, chumbo, ferro, fósforo, manganês e zinco (Figura 11). Diferentemente do trecho anterior, não foram obtidas concentrações acima dos valores de referência para o elemento arsênio, que apresentou apenas valores abaixo do LQ no P05, e concentrações traço no P06.

Devido a maior distância com o local do rompimento, as tendências observadas apresentam relações menos óbvias com o evento, em comparação com as amostragens do Trecho 01. A localização do P05 (Rio Grande) também influenciou diretamente nos resultados observados, pois as demais estações de monitoramento foram instaladas às margens do Rio Paraopeba. Ainda assim, é possível observar uma correlação com o evento, principalmente para alumínio, ferro e manganês.

As concentrações de alumínio permaneceram acima do valor de referência a partir de 2019, com valores máximos de 0,40 mg/L no P05, em 2021, e 0,61 mg/L no P06, em 2022. Estes valores extrapolam o valor de referência (0,1 mg/L) em 6 vezes, apontando uma importante questão de contaminação. Nesse contexto, as concentrações de alumínio permanecerem tão altas mesmo depois de anos do evento, indica que as medidas corretivas nesta área não foram tão efetivas quanto em outras regiões do Rio Paraopeba.

As concentrações de chumbo estiveram ligeiramente acima dos limites estipulados, no P05 em 2019 (0,0105 mg/L) e no P06 em 2020 (0,106 mg/L) e 2021 (0,152 mg/L). As concentrações de zinco também extrapolaram os valores de referência de forma bem sutil, neste caso apenas em 2018, com 0,36 mg/L no P05 e 0,34 mg/L no P06. Portanto, a contaminação de zinco não possui relação com o evento de Brumadinho.

Figura 11: Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P05 e P06



Fonte: Elaborado por autor.

Ao observar os resultados para o elemento ferro, nota-se uma grande divergência entre os pontos de amostragem: no P06, com uma baixa variação nas concentrações, permanecendo numa faixa de 0,15 mg/L a 0,64 mg/L. Já no P05 esta variação se deu entre 0,13 mg/L e 1,68 mg/L. Foi verificado que as maiores concentrações ocorreram a partir de 2020, porém as águas já estavam contaminadas por este elemento desde 2017 e 2018.

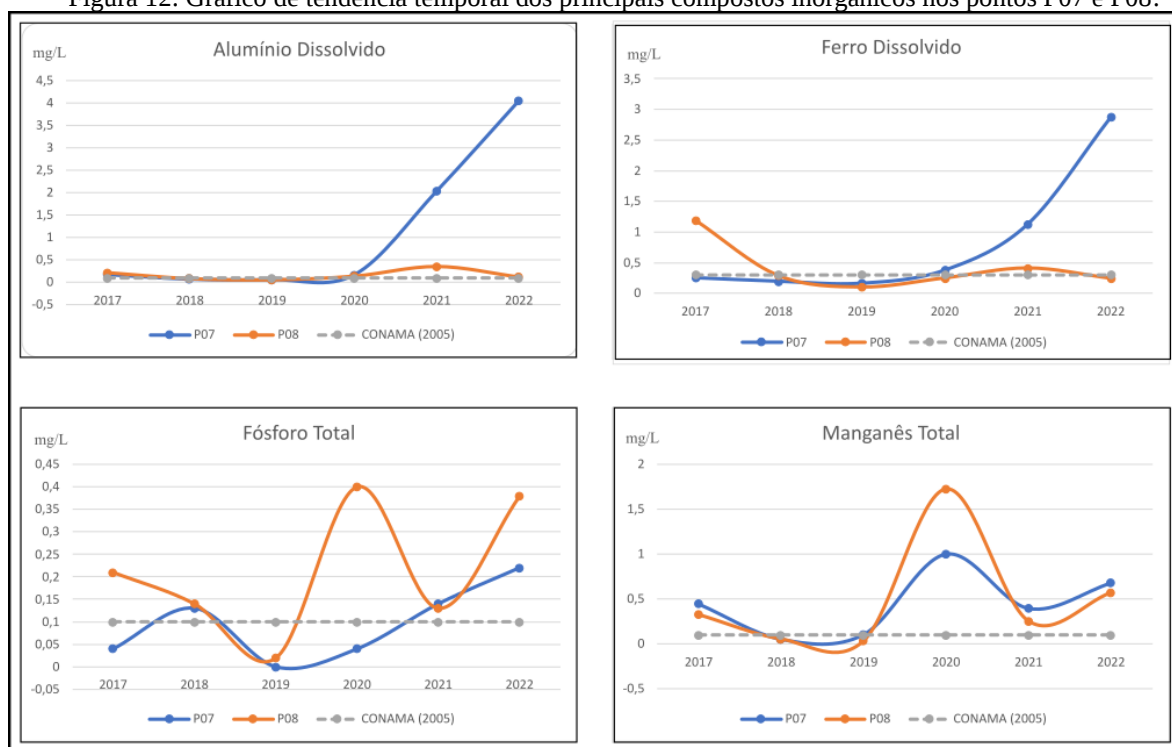
Os elementos fósforo e manganês apresentaram comportamentos semelhantes (com exceção do P05, em que não foram identificadas alterações na concentração de manganês, que permaneceu constantemente próxima de 0,1 mg/L durante todo o período de amostragem). O restante das amostragens de fósforo e manganês apresentaram concentrações elevadas em 2017, porém com as maiores concentrações obtidas a partir de 2019, seguida de uma atenuação. Como

observado em outras amostragens, este comportamento aponta a existência de fonte de contaminação previamente ao rompimento da barragem, que foi intensificada pelo evento de 2019, sendo mitigado ao longo do período estudado.

5.1.3 Trecho 03

O trecho 03 localiza-se no município de Paraopeba (MG), caracterizado pelos pontos P07 e P08 da amostragem realizada. Neste trecho, os parâmetros alumínio, chumbo, ferro, fósforo, manganês, selênio e zinco apresentaram concentrações acima dos valores de referência (Figura 12). As anomalias de chumbo e selênio foram identificadas apenas no P08, de forma pontual.

Figura 12: Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P07 e P08.



Fonte: Elaborado por autor.

O chumbo esteve acima do VR apenas no P08, em 2020 (0,018 mg/L). Em 2017, 2021 e 2022 apresentou concentrações traço (abaixo do valor de referência) nos dois pontos de monitoramento, e no restante das amostragens não foram identificadas concentrações deste elemento acima do LQ.

O comportamento do alumínio e ferro são nitidamente semelhantes e ambos apresentam diferenças em relação aos pontos de monitoramento. No P07 os dois elementos permaneceram

com concentrações constantes, muito próximas ao VR (0,1 mg/L e 0,3 mg/L, respectivamente), porém a partir de 2020 houve uma ascensão de ambos os parâmetros, que atingiram seus valores máximos em 2022 (4,06 mg/L de alumínio e 2,80 mg/L de ferro). No P08 as concentrações também foram constantes, próximas aos respectivos VRs, e foram observadas oscilações em 2017 (ferro) e em 2021 (alumínio e ferro).

Os parâmetros fósforo e manganês também apresentam comportamento semelhante entre si (igualmente observado nos trechos anteriores): ambos apresentam concentrações elevadas em 2017 e 2018, porém com tendência de queda. A partir de 2019 estas concentrações crescem de forma acelerada, e atingem seus valores máximos em 2020. Em 2021, a concentração destes elementos cai novamente, e em 2022 voltam a ascender.

O fósforo teve comportamentos diferentes entre os pontos de amostragem. No P07, em 2018 sua concentração era de 0,13 mg/L, só em 2021 volta a ultrapassar o VR, atingindo 0,14 mg/L e em 2022 seu valor máximo atinge 0,22 mg/L. No P08, com exceção do ano de 2019, em todas as amostragens foram identificadas concentrações acima do VR, sendo as máximas em 2020 (0,40 mg/L) e em 2022 (0,38 mg/L).

Diferentemente do fósforo, o manganês comportou-se de forma semelhante em seus dois pontos de amostragem. Em 2017 obteve concentrações de 0,44 mg/L no P07 e de 0,33 mg/L no P08, e seus valores máximos ocorreram em 2020, atingindo 1,00 mg/L no P07 e 1,72 mg/L no P08. Após 2019, mesmo passando por um período de queda, as concentrações de manganês permaneceram acima do VR em todas as amostragens analisadas.

Em 2017, o selênio esteve acima do VR (0,014 mg/L) no P08, e no restante das amostragens realizadas não foram identificadas concentrações deste elemento acima do LQ. Segundo Plant et al. (2005) altas concentrações de Selênio em corpos hídricos estão relacionadas a ambientes ácidos (em alguns casos afetados pela presença de drenagem ácida de mina), em que o elemento é lixiviado com maior facilidade para ambientes aquáticos.

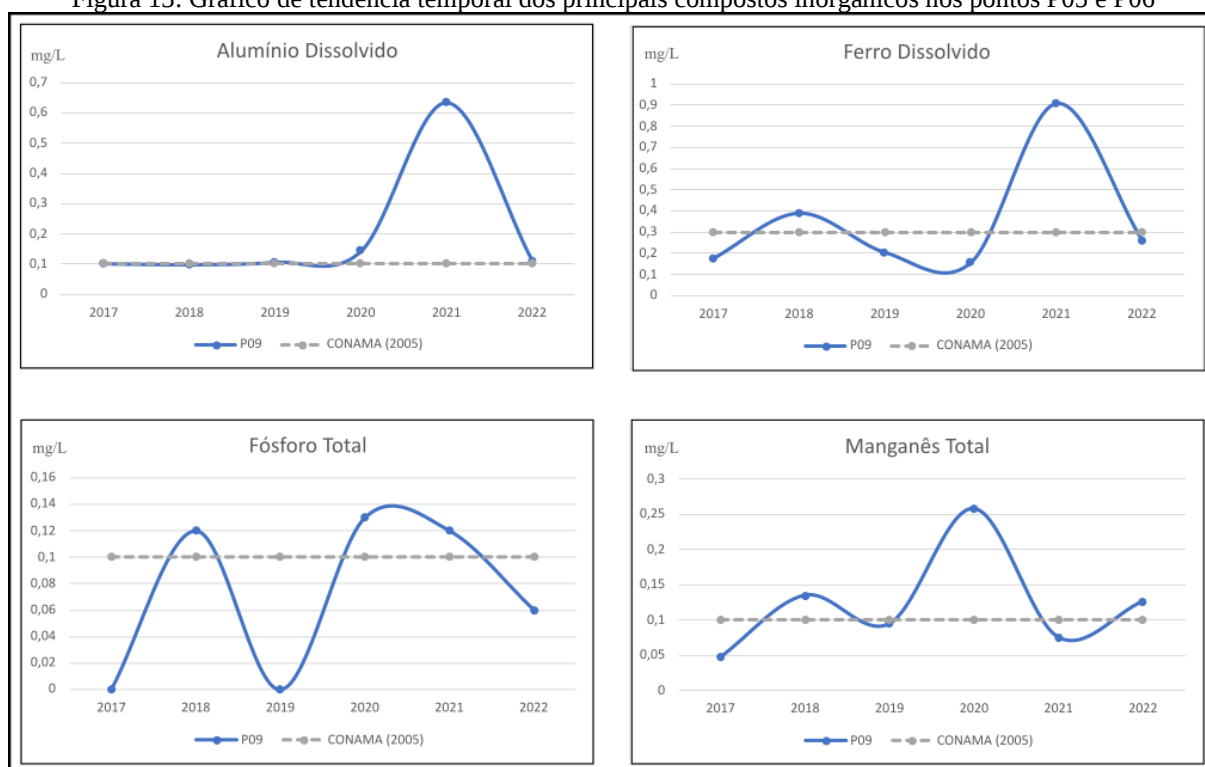
O caso do elemento zinco é semelhante ao observado no trecho 02 para este elemento, que apresentou uma anomalia em suas concentrações de forma pontual, no 3º Trimestre de 2018 no P07 (0,32 mg/L) e no P08 (0,33 mg/L). Posteriormente, em 2018 não foram encontradas concentrações acima do LQ. Portanto a anomalia de zinco observada nos trechos 02 e 03 não possuem relação com o evento de Brumadinho.

5.1.4 Trecho 04

O trecho 04 é composto apenas por um ponto de amostragem (P09), localizado próximo a barragem Três Marias. Por se tratar do trecho de maior distância em relação ao local da antiga barragem B1, esperava-se encontrar uma situação mais atenuada dos contaminantes.

Porém as concentrações de alumínio, ferro e manganês apresentaram concentrações acima dos valores de referência com comportamentos similares aos observados em outros trechos (Figura 13), ou seja, os valores máximos observados a partir de 2019 tiveram origem com o rompimento da barragem, a 328 km de distância. Neste trecho houve uma única amostragem, no 3º Trimestre de 2018 que identificou uma anomalia de zinco (0,37 mg/L).

Figura 13: Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P05 e P06



Fonte: Elaborado por autor.

As concentrações de alumínio mantiveram-se constantemente próximas ao limite estabelecido pela CONAMA (2005), em torno de 0,10 mg/L, e a partir de 2020 houve um aumento significativo, atingindo 0,63 mg/L em 2021.

Os elementos ferro, fósforo e manganês apresentaram concentrações acima dos valores de referência em 2018 (0,38 mg/L, 0,12 mg/L e 0,13 mg/L, respectivamente), em 2019 todos apresentaram queda em seus valores, e a partir de 2020 atingiram suas concentrações máximas: 0,15 mg/L, 0,13 mg/L e 0,25 mg/L, respectivamente, em 2020; e em 2021 estas concentrações foram para 0,90 mg/L, 0,12 mg/L e 0,12 mg/L, respectivamente.

5.2 Análise Espacial

A análise espacial teve como objetivo caracterizar a evolução dos contaminantes ao longo dos trechos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, para compreender a dispersão destes elementos ao longo de um corpo hídrico. O monitoramento foi dividido em três etapas (pré-rompimento, ano do rompimento e pós-rompimento), para possibilitar a compreensão dos impactos causados pelo desastre de 2019.

5.2.1 Pré-rompimento (2017 e 2018)

Este item foi separado dos restantes para que fosse possível observar o comportamento dos contaminantes antes do rompimento da barragem, como uma forma de obter uma “situação controle” da SF3. Os dados dispostos na Tabela 3 ilustram a situação da Bacia Hidrográfica neste período.

Tabela 3: Resultados analíticos do monitoramento realizado nos anos de 2017 e 2018.

Parâmetros Inorgânicos		Alumínio dissolvido	Arsênio total	Chumbo total	Ferro dissolvido	Fósforo total	Manganês total	Zinco total
CONAMA 2005		0,1 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,3 mg/L	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,18 mg/L
P01	2017	N.D.	N.D.	N.D.	0,556	0,05	0,205	N.D.
P02		N.D.	N.D.	N.D.	0,4	0,18	0,194	N.D.
P03		0,216	0,00127	0,0074	0,291	0,19	0,475	0,0354
P04		0,276	0,00229	0,01766	0,372	0,34	1,727	0,0507
P05		0,248	N.D.	N.D.	0,772	0,06	0,0712	N.D.
P06		0,194	0,00139	0,00939	0,208	0,19	0,678	0,0323
P07		0,172	N.D.	0,00981	0,255	0,04	0,448	0,0341
P08		0,22	N.D.	0,00681	1,189	0,21	0,331	0,031
P09		0,102	N.D.	N.D.	0,1759	N.D.	0,0471	0,02
P01	2018	0,134	0,00124	N.D.	0,718	0,1	0,698	0,0333
P02		0,207	0,00123	N.D.	0,639	0,07	0,545	N.D.
P03		0,115	N.D.	N.D.	0,493	0,04	0,256	0,0379
P04		0,119	N.D.	N.D.	0,503	0,25	0,113	N.D.
P05		0,04	N.D.	N.D.	0,1357	0,24	0,0715	N.D.
P06		0,121	N.D.	N.D.	0,375	0,19	0,124	N.D.
P07		0,069	N.D.	N.D.	0,1977	0,13	0,0566	N.D.
P08		0,087	N.D.	N.D.	0,287	0,14	0,059	N.D.
P09		0,099	N.D.	N.D.	0,389	0,12	0,135	N.D.

*Valores em azul ultrapassam os valores de referência (Resolução CONAMA 237/2005)

Fonte: Elaborado por autor.

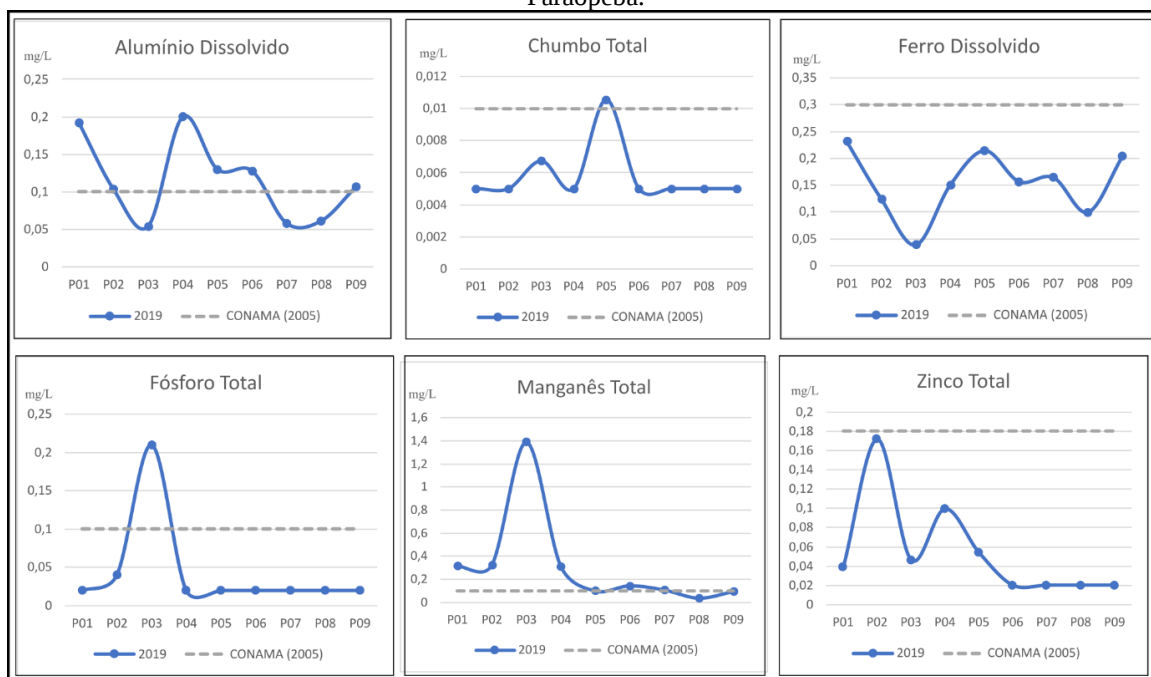
Devido ao uso e ocupação do entorno das águas do Rio Paraopeba, já existia na região importantes focos de contaminação, principalmente por alumínio, ferro, fósforo, manganês e pontualmente por chumbo. As concentrações de arsênio e zinco não ultrapassaram os valores de referência, neste período, em nenhum ponto da bacia.

No ano de 2017 foram identificados 1,18 mg/L de ferro e 1,72 mg/L de manganês nas águas do Rio Paraopeba. A presença destes elementos nas águas superficiais está naturalmente associada à geologia da região, uma vez que o Quadrilátero Ferrífero compreende rochas ricas em minerais metálicos, que são naturalmente lixiviados para as águas superficiais. Porém os valores obtidos no monitoramento ultrapassam o que poderia ser considerada como uma simples presença natural e passam a caracterizar uma situação de contaminação, possivelmente por efluentes industriais líquidos, esgoto sanitário urbano ou uso de defensivos agrícolas.

5.2.2 Ano do rompimento (2019)

As amostragens realizadas em 2019 podem trazer informações distorcidas, pois algumas delas foram realizadas semanas ou dias antes do rompimento da barragem, ou alguns meses depois. Portanto, este período do monitoramento não apresentou resultados claros e objetivos. Na Figura 14 estão dispostos graficamente os valores das concentrações dos principais elementos inorgânicos presentes na área de estudo.

Figura 14: Evolução das concentrações dos parâmetros inorgânicos ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.



Fonte: Elaborado por autor.

Os parâmetros que apresentaram altas concentrações em 2019, que em sua maioria ultrapassaram seus respectivos valores de referência foram o alumínio e o manganês. As maiores concentrações de alumínio observadas foram no P01 (Montante) com 0,19 mg/L e no P04 (trecho 01) com 0,20 mg/L. As concentrações de manganês estiveram acima do valor de referência em praticamente toda a bacia hidrográfica, do P01 até o P07, sendo a maior concentração observada no P03 (Trecho 01) com 1,39 mg/L.

Neste ano apenas o P02 apresentou concentração traço de arsênio (0,0011 mg/L). Em relação ao elemento chumbo, o P03 apresentou concentração traço de 0,0067 mg/L e o P05 apontou 0,010 mg/L. Foram encontradas apenas concentrações traço do elemento ferro, todas abaixo do valor de referência, sendo o maior valor obtido neste ano no P09 com 0,20 mg/L. As concentrações de fósforo, em sua maioria não ultrapassaram o limite de quantificação laboratorial, com exceção do P02 (0,04 mg/L) e no P03 (0,21 mg/L), que extrapolou o valor de referência deste elemento. Em relação ao zinco, também foram encontradas apenas concentrações traço, nos primeiros cinco pontos de monitoramento (P01 ao P05), todos abaixo do valor de referência (0,18 mg/L).

Por mais que alguns elementos permaneceram abaixo dos respectivos valores de referência, há um comportamento similar principalmente entre fósforo, manganês e zinco, que apresentaram o pico de suas concentrações neste ano nos pontos P02 e P03 (Montante e Trecho 01)

5.2.3 Pós-rompimento (2020, 2021 e 2022)

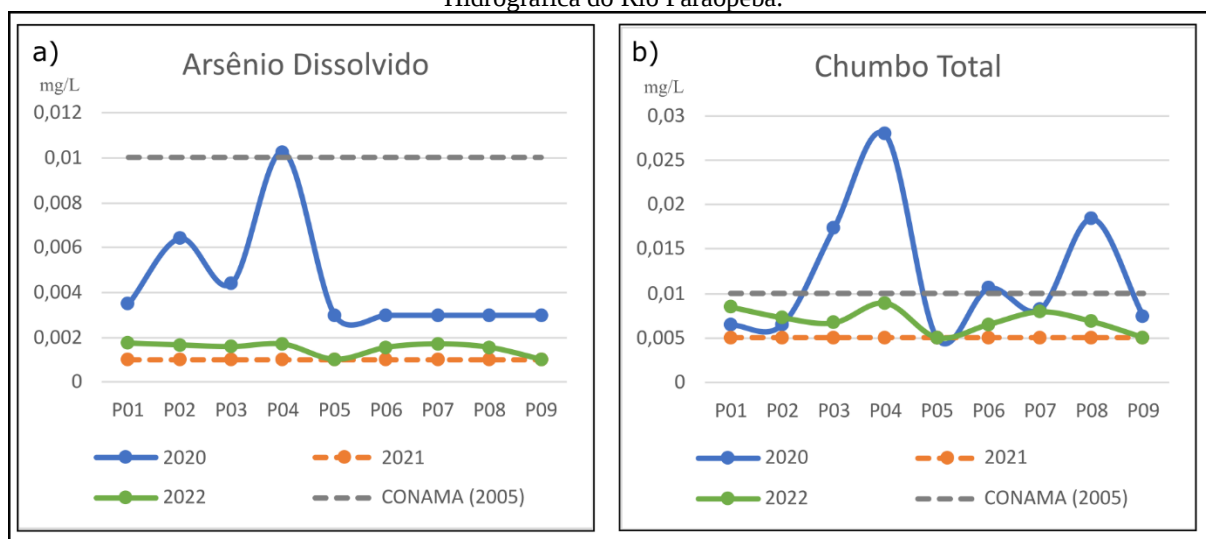
Nos anos de 2020, 2021 e 2022 foi possível observar as tendências dos principais elementos contaminantes presentes na área de estudo. Os gráficos gerados apontam importantes informações de como as contaminações se distribuíram ao longo da bacia, e como ocorreu sua dispersão ao longo do curso do Rio Paraopeba após o desastre em Brumadinho.

Na Figura 15a estão dispostas as concentrações de arsênio ao longo da SF3 em 2020, 2021 e 2021. Foi identificada apenas um evento em que as concentrações deste elemento extrapolaram (de forma muito sutil) os valores de referência, que ocorreu no P04 em 2020 (0,01027 mg/L). O restante das amostragens permaneceu abaixo do VR, ou abaixo do limite de quantificação laboratorial.

Na figura 15b estão dispostas as concentrações de chumbo na Bacia. Da mesma forma que o arsênio, apenas em 2020 foram obtidas concentrações acima do valor de referência, sendo os pontos P04 (Trecho 01) com 0,027 mg/L e P08 (Trecho 03) com 0,018 mg/L os principais

picos deste contaminante. No ano de 2021 não foram encontrados valores acima do LQ, e em 2022, foram encontradas apenas concentrações traço deste elemento.

Figura 15: Evolução das concentrações de a) Arsênio Dissolvido; b) Chumbo Total ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.



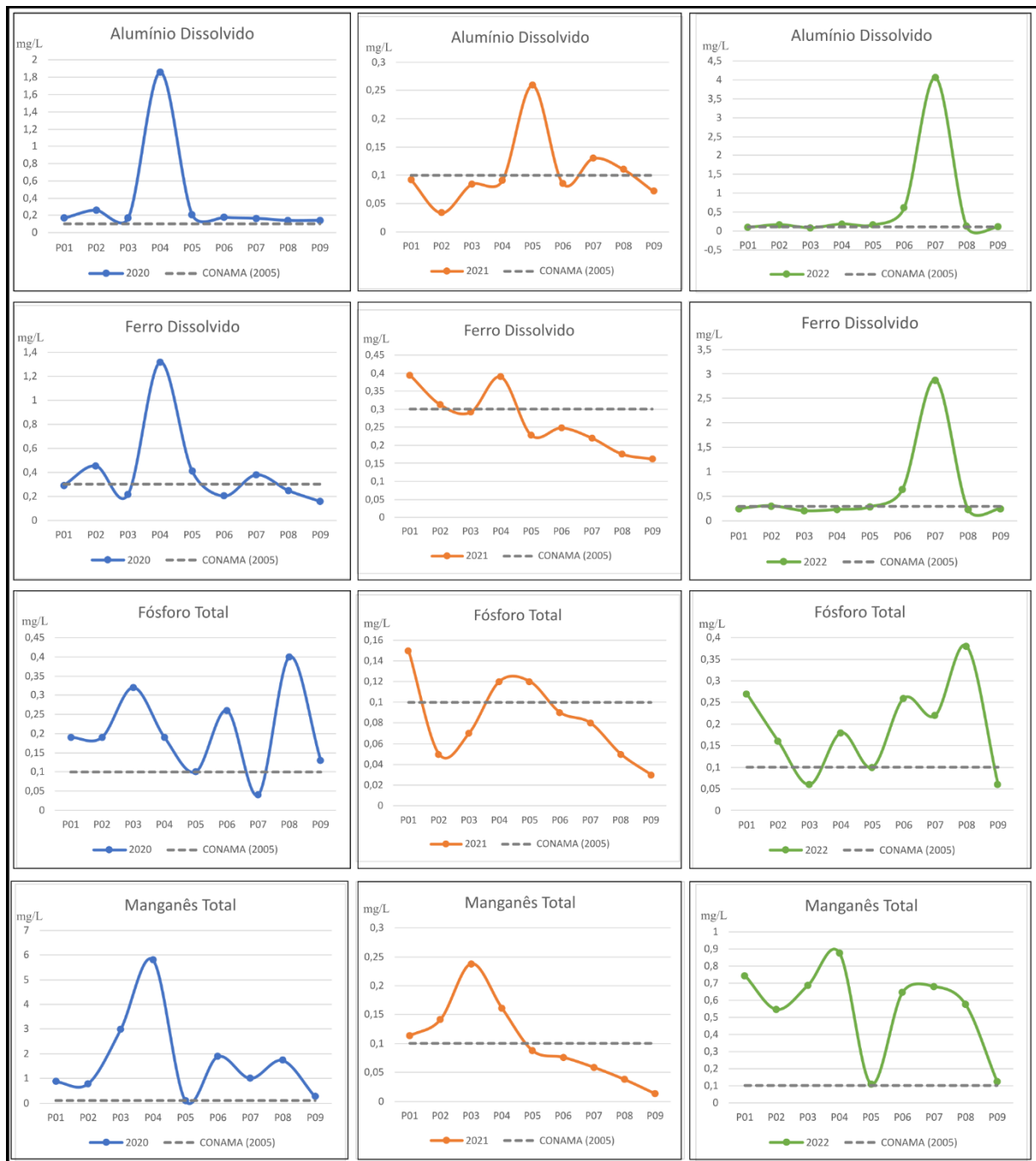
Fonte: Elaborado por autor.

Os elementos alumínio, ferro, fósforo e manganês apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 16): No ano de 2020 as maiores concentrações destes elementos estavam localizadas principalmente no Trecho 01 (P03 e P04), com altíssimos teores, extrapolando os valores de referência em 10 vezes (no caso do alumínio) até 60 vezes (no caso do manganês). Em 2021 houve uma atenuação da contaminação de todos estes elementos, que apresentaram concentrações relativamente próximas aos valores de referência, e os trechos 03 e 04, em sua maioria, não ultrapassaram tais. Já em 2022 observa-se um grande foco de contaminação de todos estes elementos, no trecho 03 (P07), que extrapola o valor de referência em até 50 vezes.

Em 2020, o pico da contaminação de alumínio estava no P04 (Trecho 01) com 1,85 mg/L, em 2021 avançou para o P05 (Trecho 02) de forma bem atenuada, atingindo apenas 0,25 mg/L. Em 2022 as concentrações de alumínio atingiram 4,06 mg/L no P07 (trecho 03), maior concentração observada durante todo o período de monitoramento.

No ano de 2020 a maior concentração de ferro ocorreu no P04 (Trecho 01) com 1,31 mg/L, nos pontos P02 (montante), P05 (Trecho 02) e P07 (Trecho 03) com 0,45 mg/L, 0,41 mg/L e 0,24 mg/L, respectivamente. Em 2021 todos os pontos de monitoramento relataram altos teores de ferro, em especial o P01 (Montante) e P04 (Trecho 02), ambos com 0,39 mg/L. Já em 2022 a contaminação por ferro ficou acumulada apenas no P07 (Trecho 03) com 2,80 mg/L, maior concentração obtida para este elemento durante o monitoramento.

Figura 16: Evolução das concentrações de arsênio dissolvido, alumínio dissolvido, ferro dissolvido, fósforo total e manganês total ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.



Fonte: Elaborado por autor.

O fósforo apresentou maiores concentrações em 2020 nos pontos: P03 (Trecho 01) com 0,32 mg/L, P06 (Trecho 02) com 0,26 mg/L e P08 (Trecho 03) com 0,40 mg/L. Em 2021 apenas três estações ultrapassaram os valores de referência, sendo elas o P01 (Montante) com 0,15 mg/L e os pontos P04 (trecho 01) e P05 (Trecho 02) ambos com 0,12 mg/L de fósforo. Pode-

se observar que, em 2021 as estações no baixo curso da bacia (Trechos 03 e 04) apresentaram forte tendência de queda das concentrações de poluentes, conforme a proximidade com a foz.

No ano de 2022, as concentrações de fósforo voltam a predominar ao longo de toda a bacia, sendo seus principais picos de contaminação localizados nos pontos P01 (Montante) com 0,27 mg/L, P04 (Trecho 01) com 0,18 mg/L, P06 (Trecho 02) com 0,26 mg/L e P08 (Trecho 03) com 0,38 mg/L.

A primeira informação que se destaca em relação ao manganês é o ponto de monitoramento P05, que apresentou baixas concentrações em todos os anos de amostragem, uma vez que esta estação está às margens do Ribeirão Grande, diferente das outras estações que se encontram no Rio Paraopeba.

Os maiores picos de manganês em 2020 ocorreram no P04 (Trecho 01) com 5,80 mg/L, no P06 (Trecho 02) com 1,88 mg/L e no P08 (Trecho 03) com 1,72 mg/L mg/L. Em 2021 apenas as estações P01 a P04 apresentaram concentrações acima do valor de referência, ultrapassando em 0,06 mg/L a 0,1 mg/L as concentrações permitidas pela legislação. Em 2022, a maior concentração obtida foi no P04 (Trecho 01) com 0,87 mg/L e nos pontos P06 a P08 (Trecho 02 e 03), que permaneceram entre 0,57 mg/L e 0,68 mg/L.

Durante o intervalo de 2020 até 2022 foram identificadas apenas duas concentrações traço (abaixo dos valores de referência) de zinco, ambas em 2020: no P02 (Montante) e no P04 (Trecho 01) ambas com 0,25 mg/L.

6. CONCLUSÕES

Devido às formações geológicas e as características pedológicas da área da bacia, predominantemente mineralizada e rica em elementos metálicos, as altas concentrações de alumínio e ferro observadas antes da data do rompimento são oriundas, em parte, de características naturais do meio. As águas do Rio Paraopeba recebem elementos metálicos a partir da lixiviação do solo e das rochas, o que enriquece as águas superficiais e subterrâneas com estes elementos. Porém foram observadas concentrações acima dos valores de referência para estes elementos, portanto as atividades antrópicas realizadas no entorno, antes do rompimento da barragem, já causavam anomalias nos corpos hídricos da bacia.

O monitoramento em 2019 traz dados um tanto quanto confusos e contraditórios, uma vez que o monitoramento padrão do IGAM ocorreu na semana do rompimento da barragem em Brumadinho. Portanto, algumas anomalias foram identificadas apenas no 3º Trimestre de 2019, e em sua maioria, foram observadas nos gráficos gerados somente no ano de 2020. Para obter uma análise concreta e verídica deste período, é necessário utilizar os dados do monitoramento especial realizado pelo IGAM, que monitorou diariamente águas superficiais e sedimentos de fundo, após o rompimento.

Ao observar o comportamento do elemento zinco, foi identificada uma anomalia no 3º Trimestre de 2018, em todos os pontos de amostragem. Não foi possível encontrar uma justificativa para tal fato, sendo necessário um estudo detalhado a respeito do uso da terra na região, e eventos que ocorreram próximos deste período, que explicasse esta anomalia.

Foram identificados pontos com concentrações elevadas de fósforo espalhados ao longo da SF3, o que indica uma grande dispersão deste elemento nas águas. Altos teores de fósforo normalmente estão associados ao uso e ocupação no entorno dos corpos hídricos, como o lançamento de efluentes industriais, esgoto sanitário ou uso de fertilizantes agrícolas.

No Trecho 01 do monitoramento (P03 e P04), os resultados obtidos apontam uma divergência significativa dos resultados obtidos nos pontos de amostragem, onde o P04 apresentou concentrações maiores em relação ao P03. Esta divergência pode estar relacionada a fatores externos, como a presença de alguma fonte poluidora próxima entre os pontos.

O impacto do rompimento da barragem B1 na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba é indiscutivelmente um aspecto ambiental importante de se observar cautelosamente. A presença de metais pesados em concentrações acima do ideal foi observada ao longo de toda a bacia, principalmente a partir de 2019 (pós desastre), em até 60 vezes os valores de referência adotados para corpos d'água Classe 2 (CONAMA, 2005).

Pode-se dizer que a SF3 já estava em desconformidade com os padrões de qualidade de água superficial, em relação aos parâmetros Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Fósforo total e Manganês total. O rompimento da barragem B1 no município de Brumadinho em 2019 intensificou estas anomalias pré-existentes na região, além de inserir metais pesados nas águas, como arsênio, chumbo e zinco.

A maioria dos elementos analisados apresentaram tendência de queda nas estações de monitoramento do alto curso da bacia. Este comportamento indica uma migração dos contaminantes para as regiões do baixo curso, próximo à represa de Três Marias. Conforme os elementos são dissipados ao longo de uma grande área, as atividades para contenção destes elementos e a implantação de medidas corretivas ficam cada vez mais complexas e caras. Portanto, quanto mais o tempo passa, mais os contaminantes vão se dispersar ao longo dos corpos hídricos, por uma área cada vez maior, e mais complexos ficarão os planos de recuperação ambiental dos impactos causados pelo rompimento da barragem, em Brumadinho.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**: Paraopeba. Brasília (DF), 2023. Disponível em: <[https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba#:~:text=O%20conjunto%20de%20reservat%C3%B3rios%20Rio,de%20Belo%20Horizonte%20\(RMBH\).?](https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba#:~:text=O%20conjunto%20de%20reservat%C3%B3rios%20Rio,de%20Belo%20Horizonte%20(RMBH).?)>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Report Trimestral**. Descaracterização de Barragens a Montante. Brasília, 2022. Disponível em: < https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/nota_tecnica_2022_descaracterizacao_publicacao_3.pdf>. Acesso em: 06 de dezembro de 2023.
- AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (ARSEA-MG). **Relatório de Fiscalização**: Sistema Integrado de Abastecimento de Água da RMBH. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf_tec_op_saa_sistema_bacia_paraopeba.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- ALKMIM, F. F.; CEMALE JR, F.; ENDO, I. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. **Revista Escola de Minas**, v. 49, n. 1, p. 22-38, 1996.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. **A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais**. SBG, Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.
- ALMEIDA, F. F. M. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. **Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais**, v. 1, n. 1981, p. 1-10, 1981.
- ALVARES, C. A. *et al.* **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Tradução. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/00000022/00000006/art00008?token=004f1a11bab2a729bc7e41225f40382d2c2b4652767446624550576b34272c5f7b3d6d3f4e4b34a>. Acesso em: 17 jun. 2023.
- AMARAL, F. C. S.; DOS SANTOS, H. G.; ÁGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N.; PEREIRA, N. R.; DE OLIVEIRA, R. P.; CARVALHO JUNIOR, W. D. **Mapeamento de solos e aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais** - Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: 2004.
- BAPTISTA, M. C. *et al.* Aspectos gerais do meio físico. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, p. 15-34, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309351371_Aspectos_gerais_do_meio_fisico_do_Estado_de_Minas_Gerais> Acesso em 22 jun. 2023.
- Brasil. Ministério da Saúde - Secretaria de Vigilância em Saúde. “Um ano do desastre da Vale Organização e resposta do Ministério da Saúde”. Boletim Epidemiológico, Ministério da Saúde, v. 51, n. esp., p. 1-35, jan 2020 Disponível em: <http://www.saude.gov.br/boletins-epidemiologicos>.. Acesso em 20 de outubro de 2023.
- CAMPOS, Júnia Lorena Olinda et al. A extinção das barragens a montante no Brasil. 2021.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS - COBRAPE. **Plano de ação e diretrizes e critérios para aplicação dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba**. 2020.
- CONAMA. BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geodiversidade do Brasil**. escala 1: 2.500. 000. 2006

COSTA, M.T.; BRANCO, J. J. R. Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. 1961. p. 15-25.

DOPICO, C. I. M. *et al.* U–Pb ages and Hf-isotope data of detrital zircons from the late Neoarchean–Paleoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. **Precambrian Research**, v. 291, p. 143-161, 2017.

DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. US Government Printing Office, 1969.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FALQUETO, M. A. Avaliação do índice de qualidade da água (IQA) e dos elementos químicos nas águas e nos sedimentos do rio Corumbataí, SP. 2008. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2008.

FREITAS, C. M. *et al.* Desastres em barragens de mineração: lições do passado para reduzir riscos atuais e futuros. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 28, mar. 2019. Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742019000100029&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 jun. 2023.

IBAMA. Nota Técnica nº 5/2019/Nubio-MG/Ditec-MG/Supes-MG. [S.l.], p. 3, 2019.

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Ottotrechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Belo Horizonte: ANA/IGAM, 2020. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 05 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Biomas do Brasil**, primeira aproximação. 2004. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 03 jun. 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Unidades de Relevo do Brasil**. 2006. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 03 jun. 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico de pedologia. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de Monitoramento das Águas Superficiais na Bacia do Rio São Francisco e Afluentes em 2008**: Projeto: Sistema de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais - Águas de Minas. Belo Horizonte, 2009. 435 p. Disponível em: <<http://10.47.16.18:8080/jspui/handle/123456789/295>>. Acesso em 06 jun. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Monitoramento Hidrometeorológico da Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais e Distrito Federal: Relatório de avaliação dos resultados de 2010 e 2011. Belo Horizonte: Igam, 2011. 168 p. Disponível em: < <http://10.47.16.18:8080/jspui/handle/123456789/955>>. Acesso em 07 de dezembro de 2023

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Avaliação da qualidade da água 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. Disponível em: <<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3847>>. Acesso em 30 mai. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Informativo trimestral dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do rio paraopeba, após o desastre na barragem b1 no complexo da mina córrego feijão da mineradora vale/sa de brumadinho-** Minas Gerais. Belo Horizonte: Igam, n.59, maio., 2020b. 314 p. Disponível em: <

<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3854>>. Acesso em 23 de outubro de 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba**: RF01: Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba - SF3. Belo Horizonte: Igam, 2020c. Disponível em: <<https://www.pdrhparaopeba.com/>>. Acesso em: 06 de junho de 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2020**: resumo executivo anual. Belo Horizonte: Igam, 2021a. Disponível em: <<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4001>>. Acesso em 06 jun. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Caderno Especial de 2021**. Avaliação da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba: acompanhamento da qualidade das Águas do rio Paraopeba após 2 anos do rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA – Brumadinho/MG. Belo Horizonte: Igam, 2021b. Disponível em: <<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3849>>. Acesso em 04 de outubro de 2023.

KARFUNKEL, J.; HOPPE, A. Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, v. 65, n. 1-2, p. 1-21, 1988.

MAGALHÃES, P. M. Análise estrutural qualitativa das rochas do Grupo Bambuí, na porção sudoeste da Bacia do São Francisco. **Ouro Preto**, 1989.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil** (MapBiomias). 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

NOBRE-LOPES, J. **Faciologia e gênese dos carbonatos do Grupo Bambuí na região de Arcos, Estado de Minas Gerais**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PAGANINI, W. da S.. A identidade de um rio de contrastes: o Tietê e seus múltiplos usos. 2ed. São Paulo: ABES, AESABESP, 2008. 171p.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* Toward a new tectonic model for the late proterozoic Araçuaí (SE Brazil)-West Congolian (SW Africa) belt. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 6, n. 1-2, p. 33-47, 1992.

PLANT, J. A. *et al.* Arsenic and selenium. **Environmental geochemistry**, v. 9, p. 17-66, 2005.

POLIGNANO, Marcus Vinicius; LEMOS, Rodrigo Silva. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 37-43, 2020.

RADAMBRASIL, Projeto. Ministério das Minas e Energia. **Secretaria Geral-Folhas SF**, v. 23, n. 24, p. 20-100, 1982.

RAMOS, A. M. *et al.* Monitoring the water quality of the paraopeba river and surroundings after the breakage of the waste dam in Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7594. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7594>. Acesso em: 23 oct. 2023.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. **Geonomos**, v. 18, p. 34-37, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11598>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

SILVA, M, A.; *et al.* Sobreposição de riscos e impactos no desastre da Vale em Brumadinho. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 21-28, 2020.

SOARES, A. L. C. **Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba**: Análise Integrada dos Diferentes Impactos Antrópicos. 2021. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.2021.

Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/tese_defesas_detalhes.php?aluno=1251>. Acesso em 22 jun. 2023.

UFV-CETEC-UFLA-FEAM. Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. 2010. Disponível em: <http://www.dps.ufv.br/?page_id=742>. Acesso em: 06 de dezembro de 2023

UHLEIN, A.; TROMPETTE, R.; EGYDIO-SILVA, M. Rifeamentos superpostos e tectônica de inversão na borda sudeste do Cráton do São Francisco. **Geonomos**, 1995

APENDICE I

CONAMA (2005)	Estação	BP029											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido		0,058	0,134	0,054381657	0,192513318	0,054675778	0,17	0,0920574	0,143248552	0,03191977	0,097472828	
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,00167	0,00124	0,001	0,001	0,001	0,003491173	0,001	0,00198136	0,001	0,001760102	
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total							0,006500224		0,005832921		0,008470836	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,556	0,1545	0,718	0,336736959	0,231464726	0,22464534	0,29	0,395312181	0,223453445	0,299216954	0,255398281	0,449382728
0,1 mg/L	Fósforo total	0,05	0,25	0,1	0,05	0,02	0,07	0,19	0,15	0,14	0,06	0,27	0,1
0,1 mg/L	Manganês total	0,205	0,965	0,698	0,142657492	0,316577979	0,060144962	0,86704	0,11347383	0,530844192	0,069904647	0,744623746	0,334025906
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
0,025 mg/L	Níquel total	0,004	0,004	0,00579	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004829888	0,004	0,007669958	
10,0 mg/L	Nitrato	0,98	2,77	1,03	1,48	2,52	1,89	0,78	1,32	1,16	2,13	0,56	0,46
1,0 mg/L	Nitrito	0,057	0,649	0,053	0,027	0,047	0,063	0,018	0,052	0,011	0,059	0,015	0,021
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,0053	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	5	36,3	5	11,4	7,9	9,7	6	5,9	6,6	10	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	
0,18 mg/L	Zinco total	0,02	0,0442	0,0333	0,02	0,038547407	0,02	0,02	0,02	0,025616624	0,02848687	0,02	

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP036											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido		0,028	0,207	0,102480338	0,103575224	0,061581801	0,262325	0,03380725	0,467938472	0,045649523	0,169938436	0,0365958
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,001	0,00123	0,001	0,001141697	0,001	0,006422979	0,001	0,001667031	0,001	0,001674577	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total							0,00652536		0,006075342		0,007262811	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,4	0,238	0,639	0,203737467	0,124499337	0,087878285	0,452115	0,313226766	0,873156041	0,316820323	0,312422557	0,193146962
0,1 mg/L	Fósforo total	0,18	0,23	0,07		0,04	0,05	0,19	0,05	0,08	0,05	0,16	0,05
0,1 mg/L	Manganês total	0,194	0,176	0,545	0,077456036	0,325180458	0,089500707	0,788468338	0,141695059	0,495385288	0,065238454	0,546141348	0,157821926
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004478726	0,004	0,005026169	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	1,01	1,41	1,31	1,42	4,63	3,43	0,88	1,01	0,96	1,89	0,48	0,67
1,0 mg/L	Nitrito	0,011	0,208	0,022	0,008	0,005	0,008	0,007	0,009	0,004	0,012	0,005	0,01
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	5	11	6,3	8	5,6	6,4	6	5	5,5	8,7	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	
0,18 mg/L	Zinco total	0,02	0,02	0,02	0,02	0,171578089	0,02	0,025526738	0,02	0,02	0,03550603	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP070											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,216	0,096	0,115	0,228043127	0,053960756	0,087403613	0,17113	0,084437518	0,333105102	0	0,087692251	0,062605169
0,01 mg/L	Arsênio total	0,00127	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004412307	0,001	0,001801545	0,001	0,001593981	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total	0,0074				0,006732906		0,017320584		0,009818887		0,006679519	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,291	0,148	0,493	0,246085166	0,038727686	0,188656551	0,212495	0,292344167	0,60311849	0,25350589	0,211415311	0,283567298
0,1 mg/L	Fósforo total	0,19	0,05	0,04	0,11	0,21	0,06	0,32	0,07	0,25	0,07	0,06	0,06
0,1 mg/L	Manganês total	0,475	0,0881	0,256	0,224215657	1,39144382	0,119551157	2,976342355	0,238096167	0,986066662	0,072850472	0,687538209	0,175912074
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,00567	0,004	0,004	0,004	0,005140533	0,004	0,00708367	0,004	0,005893722	0,004	0,004880937	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	0,81	1,34	1,78	1,05	1,55	2	1,12	1,17	1,91	2,56	0,13	0,63
1,0 mg/L	Nitrito	0,033	0,008	0,036	0,047	0,042	0,032	0,035	0,027	0,038	0,039	0,014	0,023
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	9	9,8	8,6	11,2	10,2	8,1	7	6,2	5,2	6,9	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	
0,18 mg/L	Zinco total	0,0354	0,02	0,0379	0,035842236	0,046253223	0,02918598	0,02	0,02	0,02	0,032964969	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP072											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,276	0	0,119	0,212815797	0,200059584	0,067795095	1,859312789	0,090060315	0,777097618	0,060011819	0,188413397	0,154103777
0,01 mg/L	Arsênio total	0,00229	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,010276767	0,001	0,001965233	0,001	0,001712003	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total	0,01766						0,027877157		0,01555484		0,008930103	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,372	0,1689	0,503	0,273674629	0,150288674	0,157965825	1,314986868	0,390745114	0,870883676	0,29622235	0,23633401	0,765001261
0,1 mg/L	Fósforo total	0,34	0,39	0,25	0,09	0,02	0,26	0,19	0,12	0,3	0,14	0,18	0,07
0,1 mg/L	Manganês total	1,727	0,467	0,113	0,106644579	0,313994261	0,146184359	5,802861544	0,161362269	0,896199837	0,068934527	0,876150143	0,112973014
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,01147	0,004	0,004	0,004	0,004	0,009122457	0,00918687	0,004	0,007524888	0,004	0,005877552	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	1	1,03	1,89	1,27	1,02	3,38	0,92	0,67	0,8	2,14	0,12	0,77
1,0 mg/L	Nitrito	0,034	0,177	0,086	0,128	0,096	0,123	0,039	0,069	0,034	0,226	0,019	0,05
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,00551	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	7,7	19,9	5,3	11,5	9,9	9,6	8,1	6	5	8,2	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	
0,18 mg/L	Zinco total	0,0507	0,02	0,02	0,02	0,099252843	0,02	0,025352622	0,02	0,024374711	0,032758145	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP078											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,22	0,194	0,087	0,194878375	0,061220959	0,1313126	0,141985	0,11044431	0,356294859	0,086116481	0,122853397	0
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,00427	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001234069	0,001	0,001561419	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total	0,00681						0,018440801				0,006832041	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	1,189	0	0,287	0,186676518	0,09971237	0,121536834	0,247125	0,176368582	0,410779789	0,155877989	0,242650161	0,575888355
0,1 mg/L	Fósforo total	0,21	0,29	0,14	0,09	0,02	0,05	0,4	0,05	0,13	0,06	0,38	0,04
0,1 mg/L	Manganês total	0,331	0,439	0,059	0,027638084	0,037740384	0,014990375	1,729723799	0,037866109	0,256826166	0,009289356	0,576554442	0,07124171
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,00507	0,00643	0,004	0,004	0,004	0,004	0,00473792	0,004	0,004	0,004	0,004557706	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	1,2	4,63	2,61	3,25	2,74	2,76	0,92	2,19	0,68	4,97	0,08	0,95
1,0 mg/L	Nitrito	0,02	0,281	0,006	0,011	0,005	0,006	0,007	0,005	0,108	0,005	0,018	0,006
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,0144	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	7,4	160	5,9	10,2	10,3	8,1	5,3	5	5	5,9	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	
0,18 mg/L	Zinco total	0,031	0,1191	0,02	0,337006094	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP082											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,194	0,13	0,121	0,248835529	0,128195337	0,13627526	0,177285	0,08562433	0,367454189	0,094130537	0,611829334	0,059163766
0,01 mg/L	Arsênio total	0,00139	0,0011	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002226018	0,001	0,00156018	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total	0,00939						0,010601154		0,015200908		0,006494232	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,208	0,3	0,375	0,304356601	0,156761058	0,132095646	0,200835	0,248849477	0,424241009	0,158699687	0,645693462	0,17278502
0,1 mg/L	Fósforo total	0,19	0,62	0,19	0,08	0,02	0,13	0,26	0,09	0,31	0,11	0,26	0,08
0,1 mg/L	Manganês total	0,678	0,199	0,124	0,098177913	0,14493943	0,169015645	1,889073619	0,076368509	1,113417876	0,124249267	0,645233159	0,126911829
0,2 µg/L	Mercurio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,00651	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,007553351	0,004	0,004795658	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	0,98	1,89	2,83	2,8	1,6	3,96	0,96	2,2	0,9	2,96	0,07	1,52
1,0 mg/L	Nitrito	0,042	0,013	0,067	0,037	0,043	0,042	0,031	0,069	0,026	0,088	0,021	0,072
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	7,1	23,3	6,8	7,8	6,8	6,2	7	5,3	5	7,6	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	
0,18 mg/L	Zinco total	0,0323	0,02	0,02	0,348620368	0,02	0,02	0,02	0,02	0,039172119	0,02	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP083											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,172	0,07	0,069	0,151361476	0,058171519	0,095773767	0,16793	0,129828509	2,040977146	0,069753963	4,065341982	0,09555077
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001386869	0,003	0,001	0,001400666	0,001	0,001724749	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total	0,00981						0,0082438		0,007672111		0,007933849	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,255	0,1438	0,1977	0,178399526	0,164583776	0,140085365	0,37773	0,220951293	1,1274513	0,158819495	2,8749463	0,2591838
0,1 mg/L	Fósforo total	0,04	0,29	0,13	0,07	0	0,11	0,04	0,08	0,14	0,11	0,22	0,04
0,1 mg/L	Manganês total	0,448	0,0618	0,0566	0,032042234	0,108265817	0,063501525	1,001372169	0,058870727	0,398134613	0,023205976	0,681354643	0,110676502
0,2 µg/L	Mercúrio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,00604	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005322455	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	0,99	3,92	2,61	3,39	1,96	2,16	0,91	2,17	0,32	4,22	0,1	1,32
1,0 mg/L	Nitrito	0,041	0,198	0,011	0,006	0,02	0,012	0,019	0,039	0,009	0,023	0,022	0,027
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	6,6	12,4	7,5	8,1	7,9	5	5,1	5	5	6,3	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	
0,18 mg/L	Zinco total	0,0341	0,02	0,02	0,324669508	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP090											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,248	0,085	0,04	0,678367455	0,130037723	0,209483617	0,21	0,259096193	0,406451882	0	0,160985833	
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	
0,01 mg/L	Chumbo total	0	0	0	0,006357172	0,010557192	0	0	0	0	0	0	
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,772	0,0694	0,1357	0,822684686	0,214691012	0,348607656	0,41	0,228746671	1,686516906	0,143516155	0,288365577	
0,1 mg/L	Fósforo total	0,06	0,15	0,24	0,07	0	0,16	0,1	0,12	0,15	0,21	0,1	
0,1 mg/L	Manganês total	0,0712	0,0278	0,0715	0,087787899	0,100112198	0,05866846	0,09728	0,08772896	0,058534621	0,057108134	0,110180004	
0,2 µg/L	Mercúrio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
0,025 mg/L	Níquel total	0,004	0,004	0,004	0,005379959	0,00561754	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	
10,0 mg/L	Nitrato	1,02	5,57	5,25	2,04	1,4	4,37	1,54	3,03	0,46	14,3	0,12	
1,0 mg/L	Nitrito	0,043	0,089	0,398	0,056	0,066	0,074	0,048	0,065	0,017	0,102	0,032	
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	5	9,6	10,3	9,8	12,1	5	5	5	5	6,1	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	
0,18 mg/L	Zinco total	0,02	0,02	0,02	0,362642972	0,054088817	0,02	0,02	0,02	0,02	0,024412639	0,02	

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)

CONAMA (2005)	Estação	BP099											
	Data de Amostragem	1ºTri/2017	3ºTri/2017	1ºTri/2018	3ºTri/2018	1ºTri/2019	3ºTri/2019	1ºTri/2020	3ºTri/2020	1ºTri/2021	3ºTri/2021	1ºTri/2022	3ºTri/2022
0,1 mg/L	Alumínio dissolvido	0,102	0,035	0,099	0,108219126	0,106466865	0,037641974	0,143405	0,071516071	0,634829925	0	0,109925479	0,022915905
0,01 mg/L	Arsênio total	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,001 mg/L	Cádmio total	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,01 mg/L	Chumbo total							0,007418639					
0,009 mg/L	Cobre dissolvido	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0,05 mg/L	Cromo total	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,3 mg/L	Ferro dissolvido	0,1759	0,0382	0,389	0,102326392	0,203503964	0	0,15546	0,162508494	0,90731242	0,032119382	0,258283665	0,067423822
0,1 mg/L	Fósforo total	0	0	0,12	0	0	0	0,13	0,03	0,12	0,08	0,06	0,06
0,1 mg/L	Manganês total	0,0471	0,0208	0,135	0,026400212	0,094480918	0,01396988	0,258659633	0,013199425	0,075388751	0,036307651	0,126080494	0,017612113
0,2 µg/L	Mercúrio total	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,025 mg/L	Níquel total	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
10,0 mg/L	Nitrato	0,89	1,81	0,74	0,99	0,97	1,34	0,72	0,92	0,57	0,7	0,07	0,43
1,0 mg/L	Nitrito	0,008	0,002	0,006	0,005	0,006	0,003	0,006	0,003	0,008	0,001	0,018	0,002
0,01 mg/L	Selênio total	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,00282	0,002	0,002	0,002	0,002	
250 mg/L	Sulfato total	6	6	5	5,9	6,4	5	5,3	5	5	5	5	
0,002 mg/L	Sulfeto	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	
0,18 mg/L	Zinco total	0,02	0,02	0,02	0,374657516	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Valores em destaque ultrapassaram os valores de referência estipulados (Resolução CONAMA 357/2005)