



**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação
de Recursos Hídricos -Profágua**

Alisson Pietro Santos Duarte

**RESILIÊNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS PÓS-ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE REJEITOS EM BRUMADINHO, MG**

**Itabira-MG
Julho/2023**

Alisson Pietro Santos Duarte

**RESILIÊNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS PÓS-ROMPIMENTO DA BARRAGEM
DE REJEITOS EM BRUMADINHO, MG**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos. Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Carolina Vasques Freitas

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves (Orientador)

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof.^a Dr.^a. Eliane Maria Vieira

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dr. Gláucio Marcelino Marques

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

(Membro externo ao ProfÁgua)

Prof. Dr. Maurício Augusto Leite

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – UNESP

(Membro externo ao ProfÁgua)

Itabira – MG

Julho/2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por me fortalecer nos momentos mais difíceis e por guiar meus passos.

Aos docentes da Universidade Federal de Itajubá, campus Itabira, pelo conhecimento compartilhado durante o curso.

Aos meus orientadores, José Augusto e Ana Carolina, pela orientação, ensinamentos, compreensão, paciência, motivação, colaboração, amizade e pelas valiosas dicas durante a elaboração deste trabalho.

À minha família pelo incentivo aos estudos e ao aperfeiçoamento profissional, em especial à minha mãe, Antônia Maria, e ao meu pai, João Batista, pelas orações nos momentos em que mais precisei.

Ao meu companheiro Eduardo Rios pelo amor, carinho, compreensão e abdicções que juntos fizemos, em prol da realização desta conquista.

À minha prima Dayane Valéria pelo grande incentivo e pelo exemplo de comprometimento, dedicação e perseverança.

Aos grandes amigos que fiz durante o curso, em especial à Januária, Lucia e Gislene, pelo ombro amigo e pelas sábias palavras nos momentos em que precisei.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

*“Seja a mudança
que você quer ver no
mundo”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

DUARTE, Alisson Pietro Santos. Resiliência dos Recursos Hídricos Pós-Rompimento da Barragem de Rejeitos em Brumadinho, MG. 2023. 171f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

O rompimento da Barragem I em Brumadinho-MG, em 25 de janeiro de 2019, causou perdas humanas, prejuízos socioeconômicos e diversos danos ambientais, inclusive aos recursos hídricos. Grande volume de rejeitos da mineração de Ferro da Mina Córrego do Feijão percorreu o ribeirão Ferro-Carvão e atingiu o rio Paraopeba, causando a interrupção da captação de água deste. Portanto, o principal objetivo do presente trabalho foi avaliar as condições de resiliência dos recursos hídricos pós-rompimento. Para isso, realizou-se uma caracterização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, em relação aos aspectos físicos, bióticos, índices pluviométricos e fluviométricos e aspectos de gestão dos recursos hídricos. Foram investigadas as origens prováveis de alguns elementos químicos, com vistas à identificação das principais origens geogênicas e antrópicas; esta compilação de informações permitiu identificar fatores prováveis de retardo do processo de resiliência. Sequencialmente, foram elaborados três Índices de Resiliência, os quais retratam as condições de qualidade da água anteriores ao rompimento, no período de 2000 a 2018. Para elaboração dos índices foram utilizados valores mínimos, médios e máximos de oito estações de monitoramento de qualidade das águas do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), instaladas no rio Paraopeba. Além dos valores das estações de monitoramento, foram trabalhados com os valores médios de precipitação mensal na bacia, os quais foram considerados na confecção de um dos três índices de resiliência, sob auxílio de modelagens matemáticas. Os valores pós-rompimento, obtidos entre janeiro de 2019 a dezembro de 2022, foram aplicados aos índices elaborados. Esta aplicação indicou a resiliência anual dos parâmetros Cobre dissolvido e Mercúrio total, segundo os três índices propostos e do Chumbo total, somente de acordo com um dos índices. As condições de resiliência anual do Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez ainda não foram satisfatórias de acordo com os índices propostos. Em uma visão geral, apesar dos avanços obtidos com a retenção e remoção dos rejeitos da Vale S.A., as condições anteriores ao rompimento ainda não foram reestabelecidas, até o ano de 2022, sendo de grande importância a continuidade das ações de reparação e dos monitoramentos de qualidade das águas do rio Paraopeba.

Palavras – Chaves: qualidade da água; mineração; rio Paraopeba.

ABSTRACT

DUARTE, Alisson Pietro Santos. Resilience of Water Resources After the Dam's Tailings Rupture in Brumadinho, MG. 2023. 171f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

The rupture of Dam I in the city of Brumadinho-MG, on January 25, 2019, caused human deaths, socioeconomic impacts and various environmental damages, including water resources. A large volume of iron mining tailings from the Córrego do Feijão mine traveled along the Ferro-Carvão stream and reached the Paraopeba river, causing an interruption in water collection. Therefore, the main purpose of the present study was to evaluate the conditions of resilience of water resources, post-rupture. For this, a characterization of the study area was carried out, which corresponds to the Paraopeba river basin, in relation to the physical, biotic and management aspects of water resources, and subsequently by analyzing data from pluviometric and fluviometric monitoring of that basin. The probable origins of the chemical elements evaluated in the present work were investigated, with the purpose of identifying the main geogenic and anthropic origins; this compilation of information made it possible to identify probable delay factors in the resilience process. Sequentially, three Resilience Indexes were elaborated and determined, capable of portraying the water quality conditions before the failure, in the period from 2000 to 2018. For the elaboration of the Indexes, minimum, average and maximum values of eight water quality monitoring stations of the Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), installed on the Paraopeba River, were used. In addition to the values from the monitoring stations, the average values of monthly precipitation in the basin were used, which were considered in the creation of one of the three Resilience Indexes, with the aid of mathematical modeling. The post-rupture values, obtained between January 2019 and December 2022, were applied to the certain indices. This application indicated the annual resilience of the Dissolved Copper and Total Mercury parameters, according to the three proposed indices, and the Total Lead, only according to one of the proposed Indexes. The annual resilience conditions of dissolved aluminum, dissolved iron, total manganese and turbidity were not yet satisfactory according to the proposed Indexes. In a general view, despite the advances obtained with the retention and removal of tailings from Vale S.A., the conditions before the rupture have not yet been re-established, until the year 2022, being of great importance the continuity of the repair actions and the monitoring of quality of the waters of the Paraopeba river.

Keywords: water quality; mining; Paraopeba river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução esquemática do método de alteamento a montante.	26
Figura 2 – Acidentes ocorridos com barragens da mineração em diversos países indicando, respectivamente, ano de ocorrência, nome da mina/barragem, país de ocorrência, bem mineral extraído e número de mortes.	29
Figura 3 – Área da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, antes e depois do rompimento... ..	29
Figura 4 – Rejeitos da B-I pós-rompimento, inseridos no ribeirão Ferro-Carvão, Brumadinho – MG.	30
Figura 5 – Impactos do rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão à ictiofauna (a), à avifauna (b), à agricultura (c) e à bovinocultura (d).....	31
Figura 6 – Índices NDVI e EVI aplicados à região do ribeirão Ferro-Carvão.....	33
Figura 7 – Matriz de danos socioambientais pós-rompimento da B-I.....	34
Figura 8 – Perfil esquemático do entulhamento da calha de um rio em função da inserção de rejeitos.....	35
Figura 9 – Terminal de Carregamento Ferroviário (TCF).....	37
Figura 10 – Espacialização de estruturas previstas pelo Plano de Manejo de Rejeitos e Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos.....	38
Figura 11 – Estruturas construídas no ribeirão Ferro-Carvão. a) Dique 2; b) BH-0; c) BH-1; d) Cortina Metálica em Estaca-Prancha.	39
Figura 12 – Estações de Tratamento de Água Fluvial ETAF 1 (a) e ETAF 2 (b).....	40
Figura 13 – Principais locais de operação da dragagem no rio Paraopeba.....	41
Figura 14 – Vista aérea dos <i>Sumps</i> 1 e 2.	42
Figura 15 – Metodologia de trabalho.....	53
Figura 16 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no Estado de Minas Gerais, e seus municípios.	64
Figura 17 – Subdivisões da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	65
Figura 18 – Trajeto percorrido pelos rejeitos da Barragem I, da Mina Córrego do Feijão, e municípios atingidos, em ordem cronológica do avanço da lama.	66
Figura 19 – Hidrografia principal da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	67
Figura 20 – Principais biomas encontrados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	68
Figura 21 – Principais climas descritos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, de acordo com a classificação climática de Köppen.	69

Figura 22 – Principais domínios hidrogeológicos encontrados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.....	70
Figura 23 – Principais unidades geológicas e estruturas identificadas na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.....	71
Figura 24 – Principais tipos de solos identificados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, de acordo com o mapeamento realizado pela FEAM e Universidade Federal de Viçosa (UFV).	73
Figura 25 – Compartimentação das unidades geomorfológicas que compõem a bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	77
Figura 26 – Categorização dos usos e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, a partir dos dados do MapBiomias.....	78
Figura 27 – Classes de enquadramento dos corpos d’água da Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba.....	83
Figura 28 – Espacialização das outorgas deferidas, renovadas e retificadas e dos usos insignificantes com cadastros efetivados.....	85
Figura 29 – Quantitativo dos processos de outorga e usos insignificantes por status dos processos.....	88
Figura 30 – Localização das estações de monitoramento selecionadas para o estudo.	93
Figura 31 – Precipitação total média anual na bacia do rio Paraopeba.	95
Figura 32 – Precipitação média mensal na bacia do rio Paraopeba.	96
Figura 33 – Estações fluviométricas consideradas no presente estudo.	97
Figura 34 – Fluxograma de origem provável dos elementos químicos associados às litologias da área de estudo (círculo verde) e ao rejeito da B-I (círculo marrom).....	113
Figura 35 – Principais locais de lançamento das Cargas Poluidoras Declaradas na bacia do rio Paraopeba.....	117
Figura 36 – Quantitativo das tipologias de destinação final dos RSU na bacia hidrográfica do rio Paraopeba em 2018.	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Símbolos para as classes de solos no 1º, 2º e 3º níveis categóricos.	72
Quadro 2 – IR3 para o parâmetro Alumínio dissolvido – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).....	130
Quadro 3 – IR3 para o parâmetro Chumbo total – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	131
Quadro 4 – IR3 para o parâmetro Cobre dissolvido mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	132
Quadro 5 – IR3 para o parâmetro Ferro dissolvido mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	132
Quadro 6 – IR3 para o parâmetro Manganês total – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	133
Quadro 7 – IR3 para o parâmetro Mercúrio total – µg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	133
Quadro 8 – IR3 para o parâmetro Turbidez – NTU (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).	134
Quadro 9 – Resiliência anual dos parâmetros avaliados, de acordo com o IR1, IR2 e IR3...	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativo dos processos de outorga, autorizações de perfuração e usos insignificantes.....	87
Tabela 2 – Quantitativo dos processos de outorga e cadastros de usos insignificantes por modos de uso.	89
Tabela 3 – Principais finalidades de uso dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba.	90
Tabela 4 – Estações de monitoramento da qualidade que compõem o Plano de Monitoramento Emergencial pós rompimento.....	92
Tabela 5 – Estações Fluviométricas situadas no rio Paraopeba, com suas respectivas altitudes, áreas de drenagem e vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{95}	97
Tabela 6 – Vazões médias mensais (m^3/s) na calha do rio Paraopeba, no período de 1938 a 2018.	98
Tabela 7 – Unidades geológicas e suas respectivas litologias.....	100
Tabela 8 – Principais minerais essenciais formadores das litologias presentes nas unidades geológicas da bacia do rio Paraopeba e suas fórmulas químicas	110
Tabela 9 – Principais minerais acessórios formadores das litologias presentes nas unidades geológicas da bacia do rio Paraopeba e suas fórmulas químicas.	112
Tabela 10 – Número de cargas poluidoras declaradas por município com a respectiva porcentagem do total na bacia.....	115
Tabela 11 – Principais atividades geradoras das cargas poluidoras declaradas.	116
Tabela 12 – Destinação final dos RSU nos municípios da bacia hidrográfica do rio Paraopeba em 2018.....	119
Tabela 13 – Intervalo de variação dos valores da série histórica de 2000 a 2018 em cada estação e as extrapolações pré-rompimento em relação à DN COPAM/CERH-MG - 08/2022.	120
Tabela 14 – Valores médios da série histórica de 2000 a 2018 em cada estação e as extrapolações pré-rompimento em relação à DN COPAM/CERH-MG - 08/2022.....	121
Tabela 15 – Índice de resiliência obtido pelo Método 1 (IR1) para os parâmetros avaliados.	125
Tabela 16 – Índice de resiliência obtido pelo Método 2 (IR2) para os parâmetros avaliados.	128
Tabela 17 – Índice de Resiliência obtido pelo Método 3 (IR3), considerando-se a precipitação média mensal na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.....	134
Tabela 18 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR1.....	136

Tabela 19 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR1.....	137
Tabela 20 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR1.....	138
Tabela 21 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR1.....	139
Tabela 22 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR2.....	141
Tabela 23 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR2.....	142
Tabela 24 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR2.....	143
Tabela 25 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR2.....	144
Tabela 26 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR3.....	145
Tabela 27 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR3.....	146
Tabela 28 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR3.....	148
Tabela 29 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR3.....	149

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	122
Equação 2.....	122
Equação 3.....	126
Equação 4.....	129
Equação 5.....	129
Equação 6.....	129
Equação 7.....	129
Equação 8.....	130
Equação 9.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
ARSAP	Agência Reguladora dos Serviços de Água e Esgoto de Pará de Minas
AS	Aterro Sanitário
Aw	Clima tropical de savana com estação seca de inverno
BIF	<i>Banded Iron Formation</i>
B-I	Barragem I de rejeitos da Mina Córrego do Feijão
B-IV	Barragem IV de rejeitos da Mina Córrego do Feijão
B-VI	Barragem VI de rejeitos da Mina Córrego do Feijão
BH-0	Barreira Hidráulica 0
BH-1	Barreira Hidráulica 1
CBMMG	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMD	Central de Materiais Descartáveis
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
Conama	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Coefficiente de Precipitação
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Cwa	Clima temperado úmido com inverno seco e verão quente
Cwb	Clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente
DCP	Declaração de Carga Poluidora
DIR	Depósitos Intermediários de Resíduos
DN	Deliberação Normativa
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPLR	Diretoria de Planejamento e Regulação
DTR	Depósito Temporário de Rejeitos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETAF	Estação de Tratamento de Água Fluvial

FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Infraestrutura de Dados Espaciais
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IPEF	Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais
IR1	Índice de Resiliência obtido pelo Método 1
IR2	Índice de Resiliência obtido pelo Método 2
IR3	Índice de Resiliência obtido pelo Método 3
ITMS	Instalação de Tratamento de Minério a Seco
KR	Constante de Resiliência
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil
MG	Minas Gerais
MPMG	Ministério Público de Minas Gerais
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PDE	Pilha de Estéril
PGIRR	Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos Carregados pelo Rompimento da Barragem B-I
PMR	Plano de Manejo dos Rejeitos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PROFÁGUA	Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
RAPP	Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RPD	Recarga Potencial Direta
RPE	Reserva Potencial Explotável
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S.A.	Sociedade Anônima

SEI	Sistema de Informações do Estado
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SF3	Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba
SIAM	Sistema Integrado de Informação Ambiental
Sisema	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
TCF	Terminal de Carga Ferroviário
TCFA	Taxa de Controle de Fiscalização Ambiental
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UHE	Usina Hidrelétrica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
URGA	Unidade Regional de Gestão das Águas
UTC	Unidade de Triagem e Compostagem
UTM	Unidades de Tratamento de Minerais
VR	Valores de Referência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1 O surgimento da palavra “resiliência” e suas adaptações conceituais.....	21
3.2 Aplicação do conceito de resiliência em diferentes áreas relacionadas aos recursos hídricos	22
3.3 Acidentes na mineração com barragens em alteamento a montante	26
3.4 O rompimento da barragem de Brumadinho.....	29
3.5 Reparações realizadas na bacia hidrográfica do rio Paraopeba para contenção e remoção dos rejeitos da B-I	35
3.6 Especificidades dos parâmetros que compõem os Índices de Resiliência elaborados	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1 Métodos utilizados para a caracterização da área de estudo	54
4.1.1 Caracterização dos meios físico e biótico	54
4.1.2 Caracterização da gestão de recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba.....	56
4.2 Seleção das estações de monitoramento e dos parâmetros de qualidade da água.....	57
4.3 Análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica.....	58
4.4 Origem provável dos elementos químicos que compõem os Índices de Resiliência.....	59
4.5 Determinação dos Índices de Resiliência	59
4.6 Aplicação dos Índices de Resiliência.....	62
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	64
5.1 Municípios atingidos pela lama	65
5.2 Hidrografia	66
5.3 Biomas	67
5.4 Climas	68

5.5 Domínios Hidrogeológicos.....	69
5.6 Unidades Geológicas	70
5.7 Solos.....	72
5.8 Unidades Geomorfológicas	75
5.9 Uso e cobertura da terra.....	77
5.10 Caracterização da gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba...	81
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
6.1 Seleção das estações de monitoramento de qualidade da água.....	92
6.2 Análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica.....	93
6.3 Gênese provável dos elementos químicos selecionados como parâmetros que compõem os Índices de Resiliência.....	99
6.4 Análise da série histórica de 2000 a 2018 e determinação dos Índices de Resiliência	120
6.4.1 Comparação dos valores pré-rompimento com os limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022.....	120
6.4.2 Determinação dos Índices de Resiliência	121
6.5 Aplicação dos Índices de Resiliência determinados	135
6.5.1 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 1 – IR1	135
6.5.2 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 2 – IR2	140
6.5.3 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 3 – IR3	145
6.5.4 Aplicação anual dos três Índices de Resiliência elaborados	150
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	151
REFERÊNCIAS	154
ANEXO I	166
ANEXO II.....	169

1 INTRODUÇÃO

Em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da Barragem I de rejeitos da Mina Córrego do Feijão (B-I), pertencente à empresa Vale S.A., localizada no município de Brumadinho, Minas Gerais. A barragem possuía o método construtivo de alteamento a montante e o rejeito que se despreendeu acarretou no rompimento das barragens a jusante, denominadas B-IV e B-IV-A.

Segundo Carvalho (2019), a B-I estava inativa há aproximadamente 3 anos e comportava um volume aproximado de 12 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro; desse total, cerca de 2 milhões de m³ (16,67%) permaneceram na área da antiga B-I. Ainda de acordo com os autores, o ribeirão Ferro-Carvão, que corresponde à região diretamente a jusante do local de rompimento, teve sua calha preenchida por aproximadamente 7,8 milhões de m³ de rejeito (65% do volume total), entre o local do rompimento e sua confluência com rio Paraopeba. Os 2,2 milhões de m³ restantes (18,33% do volume total) atingiram a calha do rio Paraopeba, propagando-se até o remanso da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo, entre os municípios de Curvelo e Pompéu (CARVALHO, 2019).

De acordo com os resultados apresentados por Geoenviron (2019), a composição química dos rejeitos das barragens B-I, B-IV e B-IV-A conta com o predomínio de óxido de ferro e sílica. Segundo o autor, estes dois componentes, juntos, somam mais de 90% de toda composição do rejeito. Em menores proporções, o autor aponta os óxidos de alumínio, que somam cerca de 2,5% da composição do rejeito, seguida por óxidos de manganês, que somam em torno de 1%. Os demais elementos químicos com provável fonte nos rejeitos da B-I indicados por são: Manganês total, Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Arsênio total, Bário total, Chumbo total, Cobre dissolvido, Fósforo total, Mercúrio total, Níquel total, Zinco total.

O desastre acarretou em perdas humanas, danos ambientais ao patrimônio público e privado, além de graves prejuízos socioeconômicos diretos e indiretos sobre a biodiversidade e aos recursos hídricos. A lama destruiu casas da região e afetou gravemente os recursos hídricos ao longo dos vários quilômetros percorridos pelos rejeitos em diversos municípios (SOUSA e FREITAS, 2019).

O meio ambiente sofreu diversos impactos, dentre os quais, a alteração da qualidade e disponibilidade das águas, a perda de vegetação nativa e do solo natural, a alteração da morfologia dos cursos d'água e a mortandade da fauna terrestre e aquática (PEREIRA *et al.*, 2019). O fluxo geral de capital e as movimentações diversas do comércio e do setor hoteleiro,

que eram impulsionadas pelos empregos gerados pela mineradora, também foram fortemente prejudicadas pelo desastre (CUNHA *et al.*, 2020).

A população atingida tem encontrado inúmeras dificuldades para se reerguer economicamente e psicologicamente (CUNHA *et al.*, 2020). O número de mortes confirmadas por Vale (2022) é de 272, o que gerou um sentimento de tristeza e revolta entre os moradores. O nome das vítimas fatais está disponível no Anexo II deste trabalho, adaptado de Vale (2022), entre as quais encontram-se duas grávidas e quatro pessoas não encontradas até abril de 2023.

A chegada dos rejeitos ao rio Paraopeba representou um grande problema para os moradores dos municípios que compõe a bacia, uma vez que este era utilizado como fonte de abastecimento de água por diversos municípios, tendo sua captação interrompida em função da contaminação de suas águas pelos rejeitos da mineradora (CARVALHO, 2019).

O município de Pará de Minas é um exemplo onde o rio Paraopeba constituía a principal fonte de captação de água para abastecimento da população. Após o rompimento da barragem, a Agência Reguladora dos Serviços de Água e Esgoto de Pará de Minas (ARSAP) informou que o município seria capaz de suprir o fornecimento de água, no curto prazo, graças aos mananciais, Paraopebas, Paivas e Paciência (SOUSA e FREITAS, 2019).

Diante do acidente ocorrido, são feitos alguns questionamentos norteadores deste trabalho: seria possível que os recursos hídricos afetados pelos rejeitos da barragem, se recuperem e retornem às condições anteriores ao rompimento da barragem? Até que ponto os recursos hídricos são resilientes a estes desastres? Houveram alterações significativas nas vazões e no ciclo hidrológico na bacia do rio Paraopeba? Os elementos químicos encontrados pós-rompimento no rio Paraopeba possuem origem geogênica, associada ao rejeito da B-I, ou em outras fontes de contaminação por influência antrópica?

A qualidade das águas da bacia do rio Paraopeba é distinta em diferentes trechos pelos quais o rio tem seu curso, em função da distribuição espacial heterogênea dos rejeitos, resultante de aspectos geomorfológicos, profundidade dos canais, vazão de água em cada trecho, entre outros aspectos (PEREIRA *et al.*, 2019).

Neste contexto, este estudo pretende realizar a caracterização da bacia do rio Paraopeba em relação aos aspectos físicos, bióticos e de gestão dos recursos hídricos, seguida pela análise dos dados das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica, como etapas iniciais que contribuirão para o entendimento da resiliência dos recursos hídricos na bacia pós-rompimento.

Uma das hipóteses deste trabalho baseia-se na possibilidade de que os rejeitos da barragem depositados na calha deste rio continuem constituindo-se um risco potencial à

qualidade das águas e representem um dos principais agentes responsáveis pelo retardo da resiliência das áreas atingidas. Outra hipótese deste estudo é que o arcabouço geológico da bacia contribui para o retardo da resiliência, uma vez que elementos químicos são carreados para os cursos d'água a partir de sedimentos, especialmente quando ocorrem grandes volumes de chuva. A terceira e última hipótese baseia-se na possibilidade de que as cargas poluidoras, provenientes das várias atividades antrópicas nos municípios que compõem a bacia do rio Paraopeba, possam atingir os recursos hídricos e retardar o processo de resiliência.

Neste contexto, deve-se ressaltar que, mesmo diante das práticas de contenção e remoção dos rejeitos, sob metodologias diversas, da evidente queda nos valores de Turbidez e concentração de elementos químicos, pela decantação natural e/ou induzida, uma parcela dos rejeitos da B-I permanece inserida em ambiente impróprio e pode se encontrar novamente em suspensão nas águas, principalmente durante o período chuvoso, no qual as águas podem apresentar movimentos turbulentos mais elevados do que no período de estiagem, inviabilizando o retorno seguro da captação de águas na bacia do rio Paraopeba.

Assim, esta proposta de trabalho apresenta notória relevância em função do cenário regional e das proporções assumidas pelo desastre no contexto ambiental, social, econômico e político. Portanto, as justificativas para este estudo concentram-se na observância e mensuração de fatores ligados à recuperação dos recursos hídricos e suas adjacências ao longo da bacia. É notório o anseio da população acerca da confiabilidade em relação à água que utilizam, de forma direta ou indireta, sob condições similares às vigentes anteriormente ao rompimento da barragem.

Desta forma, este estudo foi elaborado no intuito de acompanhar o que tem sido feito para recuperar a região atingida pelos rejeitos da barragem e mensurar a resiliência dos recursos hídricos a partir de diversos parâmetros, frente aos esforços para contenção dos rejeitos, somados à capacidade de autodepuração por parte dos recursos hídricos. Além disso, o presente trabalho versa sobre a elaboração e aplicação de três índices de resiliência dos recursos hídricos a partir de sete parâmetros selecionados: Turbidez (NTU), Ferro dissolvido (mg/L), Manganês total (mg/L), Alumínio dissolvido (mg/L), Chumbo total (mg/L), Cobre dissolvido (mg/L) e Mercúrio total ($\mu\text{g/L}$).

Os resultados deste trabalho, portanto, podem fornecer subsídios que permitam avaliar a confiabilidade na utilização futura dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba para os usos consuntivos e não consuntivos, tais como o abastecimento residencial da população, dessedentação animal, atividades agropecuárias, pesca, recreação, entre outros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as condições de resiliência dos recursos hídricos pós-rompimento da B-I, a partir do diagnóstico dos parâmetros de qualidade das águas na bacia do rio Paraopeba, em especial nas regiões diretamente atingidas pelos rejeitos.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a bacia hidrográfica do rio Paraopeba em termos de seus aspectos físicos, bióticos e de gestão dos recursos hídricos.
- Confrontar os valores dos parâmetros de qualidade da água pré-rompimento aos valores orientadores da DN COPAM/CERH-MG - 08/2022, para posterior identificação da origem provável dos elementos químicos.
- Elaborar os Índices de Resiliência dos recursos hídricos no rio Paraopeba, a partir dos dados de monitoramento pré-rompimento, e aplicar os valores pós-rompimento aos índices elaborados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda o conceito de resiliência, desde o surgimento e etimologia da palavra até a sua aplicação em diversos nichos que se relacionam diretamente e indiretamente com os recursos hídricos. Será apresentada uma contextualização do método de construção de barragens denominado alteamento a montante, o qual foi utilizado para a construção da B-I, que se rompeu em Brumadinho em janeiro de 2019.

Em seguida serão abordados acidentes ocorridos com barragens, com ênfase no acidente ocorrido em Brumadinho em 25 de janeiro de 2019. Serão apresentados estudos realizados após o rompimento da barragem em Brumadinho e o diagnóstico até dezembro de 2022 dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba. Ao final deste capítulo serão abordados aspectos gerais dos elementos químicos que compõem os Índices de Resiliência propostos neste estudo, incluindo as principais formas de ocorrência, propriedades químicas, físicas, influência de sua incorporação nos organismos vivos, entre outros.

3.1 O surgimento da palavra “resiliência” e suas adaptações conceituais

A palavra resiliência vem do latim “*Resilire*”, que significa “voltar atrás”, e está associada à capacidade que certos indivíduos e ecossistemas, em geral, têm de comportar-se diante de perturbações e condições adversas às quais são submetidos, retornando às condições anteriores (HOLLING, 1996; BLANCO-LONDOÑO *et al.*, 2017). Este conceito surgiu no campo da ecologia na década de 1960, por meio de estudos de interações populacionais predador-presa e suas respostas funcionais relacionadas à teoria da estabilidade ecológica (BLANCO-LONDOÑO *et al.*, 2017).

Holling (1973) propôs que “a resiliência determina a persistência de relacionamentos dentro de um sistema e é uma medida da capacidade desses sistemas de absorver mudanças em variáveis de estado, condução e parâmetros, e serem capazes de persistir”.

Holling (1996) classifica a resiliência em “resiliência de engenharia” e “resiliência ecológica” para enfatizar as diferenças entre eficiência, estabilidade e previsibilidade, por um lado, e persistência, mudança e imprevisibilidade, por outro.

A resiliência de engenharia é caracterizada por analisar os períodos de retorno e eficiência focando na capacidade de recuperação de um sistema no contexto de um equilíbrio estável. A resiliência ecológica, por sua vez, enfatiza a instabilidade que pode direcionar um sistema para outro regime de comportamento (Holling, 1996).

Com base nesses conceitos, Holling (1996) definiu resiliência como “a magnitude da perturbação que pode ser absorvida antes que o sistema redefina sua estrutura funcional, alterando as variáveis e processos que controlam o comportamento”.

Portanto, resiliência é caracterizada como a capacidade de absorver mudanças, resistir a perturbações e manter funções com foco na persistência e robustez de um sistema no contexto de estabilidade global.

Após divergências e conflitos envolvendo o conceito de resiliência, Walker *et al.* (2004) acrescentaram uma terceira categoria: resiliência socioecológica, definida como “o potencial de um sistema para tolerar distúrbios, sem entrar em colapso, para um estado qualitativamente diferente, mantendo sua estrutura e função, o que envolve sua capacidade de se reorganizar, seguindo as mudanças impulsionadas pelos distúrbios”.

A resiliência socioecológica caracteriza-se por analisar as interações entre perturbações, reorganização, sustentabilidade e desenvolvimento num sistema e considera a capacidade de adaptação, transformação, aprendizagem e inovação num contexto de equilíbrio instável.

Esse conceito modificou as visões até então existentes que consideravam os sistemas estáveis, introduzindo uma nova perspectiva que considerava a capacidade dos sistemas de se adaptarem e mudarem, aumentando assim a probabilidade de desenvolvimento sustentável em ambientes em mudança onde o futuro é imprevisível (WALKER *et al.*, 2004).

3.2 Aplicação do conceito de resiliência em diferentes áreas relacionadas aos recursos hídricos

A seguir serão apresentados, em ordem cronológica, estudos de alguns autores a respeito do conceito de resiliência. Algumas aplicações do termo resiliência são recorrentes, como a resiliência de solos, por sua vez influente na infiltração e recarga de aquíferos, resiliência frente às mudanças climáticas e alguns bioindicadores da resiliência em bacias hidrográficas e em ecossistemas variados.

Pedro *et al.* (2006) discutiram as condições de resistência e resiliência de determinadas espécies de plantas a eventos extremos de cheias e secas no semiárido do Brasil. Rios e córregos intermitentes são afetados por distúrbios de intensidade, frequência e duração variáveis ao longo de seus ciclos hidrológicos. O estudo indicou alta resiliência das espécies de plantas analisadas, diante dos eventos de cheias e secas, com retorno satisfatório às condições anteriores às perturbações em curto período de tempo.

Little e Lara (2010) defenderam a importância da relação entre ecossistema e serviços ecossistêmicos e integraram esses conceitos à captação de água nas bacias hidrográficas em um

sistema resiliente e sustentável, capaz de propiciar o bem-estar humano. Estes autores apontaram que as bacias hidrográficas sofrem constantemente perturbações por atividades antrópicas, o que dificulta a capacidade de resiliência das mesmas.

Os estudos realizados por Henriques-Rezende *et al.* (2010), sobre duas sub-bacias hidrográficas no Estado de São Paulo, demonstraram que a bacia hidrográfica onde ocorre maior índice de cobertura vegetal se mostra mais resiliente aos impactos ocasionados por perturbações ao ecossistema aquático. Segundo os autores, a resiliência deve ser entendida considerando-se a preservação de vazões, transporte de sedimentos e manutenção do ciclo de vida de espécies animais e vegetais.

As zonas ripárias correspondem a áreas saturadas de água, permanentes ou temporárias, que são importantes para a proteção dos recursos hídricos em pequenas bacias hidrográficas. Neste contexto, Mira-Attanasio *et al.* (2012) discutiram a importância de práticas sustentáveis para o uso e cobertura da terra, considerando o cenário hidrológico, que inclui a delimitação e avaliação de áreas mais propensas a contribuir para a recarga de aquíferos. O planejamento do uso do solo, de acordo com os autores, diminui o risco de degradação hidrológica e aumenta o potencial de resiliência das bacias hidrográficas.

Trujillo-Narcía *et al.* (2012) abordaram a dificuldade de resiliência de solos expostos a derramamentos de petróleo e os riscos de contaminação dos recursos hídricos. Segundo os autores, os esforços realizados para a contenção de derramamentos adicionais muitas vezes não garantem o reestabelecimento das condições originais do solo, dadas as propriedades físico-químicas do petróleo.

Anelli (2015) confrontou a resiliência dos recursos hídricos com o processo de urbanização. O crescimento populacional e as alterações nas condições naturais do meio ambiente dificultam o reestabelecimento das condições anteriores às atividades antrópicas. A dificuldade de recuperação dos recursos hídricos é diretamente proporcional ao processo de urbanização. Assim, as mudanças climáticas dificultam a processo de resiliência dos recursos hídricos e de outras esferas do meio ambiente em relação às condições anteriores, dadas as alterações ocorridas no âmbito global, cujo controle foge à alçada dos gestores dos recursos hídricos (ANELLI, 2015).

Rodrigues *et al.* (2015) avaliaram, a partir do modelo hidrológico SWAT, a resiliência de bacias hidrográficas onde foram feitas revegetações a partir de florestas plantadas. Partiu-se da premissa que estas florestas aumentam significativamente o consumo de água nas bacias. Contudo, o diagnóstico obtido a partir desta modelagem revelou uma redução no consumo de

água, tanto nos cenários de mata nativa, quanto para as áreas de reflorestamento. A curva de permanência do comportamento hidrológico sugere a existência de grandes volumes de água subterrânea capazes de assegurar o alto grau de resiliência da bacia diante do cenário apresentado.

Blanco-Londoño *et al.* (2017) realizaram uma análise e avaliação para identificar os fatores, variáveis e indicadores de resiliência para a gestão sustentável. Segundo os autores, é necessário considerar a resiliência no planejamento, projeto e construção de infraestrutura urbana, conforme incorporado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) formulados pela Organização das Nações Unidas (ONU) para os anos de 2016 a 2030. De acordo Blanco-Londoño *et al.* (2017), os sistemas de gestão da água em geral e os sistemas de drenagem urbana devem garantir não só a prestação do serviço público, mas também a sua sustentabilidade e resiliência.

Fisher-Jeffes *et al.* (2017) apresentaram melhorias na segurança hídrica em áreas urbanas da África do Sul, utilizando-se a captação de águas pluviais para aumentar a resiliência diante de eventos extremos de seca. De acordo com estes autores, a dependência exclusivamente das águas captadas de forma convencional, em rios e demais fontes superficiais, deve ceder espaço a fontes alternativas de abastecimento. O crescimento populacional e a melhoria nos padrões de vida aumentam o consumo de água. A racionalização da água implica em maiores condições de resiliência diante de crises hídricas (FISHER-JEFFES *et al.* 2017).

Herbas-Baeny *et al.* (2017) avaliaram, entre outros, a vulnerabilidade socioambiental e a resiliência dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas. Os problemas ambientais, ligados aos fenômenos meteorológicos, colocam em risco a produtividade agropecuária e comprometem a disponibilidade de água captada. Este fato reduz substancialmente a produção de pastagens e dificulta a alimentação do gado.

Para Ochoa e Ojeda-Revah (2017), as mudanças impulsionadas pela ação antrópica na cobertura dos solos em grandes metrópoles aumentam os riscos de desastres naturais diante de eventos meteorológicos extremos e reduz a capacidade de resiliência do ecossistema exposto a estes eventos.

Por outro lado, Cobbing e Wit (2018) estudaram a interface entre a governança e a exploração das águas subterrâneas do aquífero de *Grootfontein*, na África do Sul. A superexploração de água no aquífero dificulta a interface “hidro-social”, que é o termo denominado pelos autores para se referir a capacidade de atender as necessidades hídricas da sociedade. O modelo de governança exercido, somado à má colaboração das partes interessadas

acarretam o desequilíbrio do sistema aquífero. O volume de água explorado tornou-se superior à sua capacidade de recarga, tornando-o cada vez menos resiliente às atividades antrópicas.

No campo da ecologia social, Andrade-Ayala *et al.* (2019) entendem a resiliência como a capacidade que os sistemas socioecológicos têm de resistir a perturbações. De acordo com estes autores, o conceito de resiliência começa a partir do reconhecimento das mudanças ocorridas em determinado sistema. Após esta identificação, segue-se com a gestão estratégica no intuito de identificar a capacidade que o ambiente socioecológico tem de enfrentar tais mudanças e adaptar-se naturalmente ou sob influência antrópica. São adotadas, então, medidas capazes de absorver, minimizar ou mesmo eliminar estas perturbações, reorganizar todo o cenário modificado e retornar às condições, funções e estruturas anteriores

Bolaños-Portilla *et al.* (2020) utilizaram mapas cognitivos difusos para análise da vulnerabilidade à variabilidade climática em microbacias rurais. Foram considerados os resultados da análise da dinâmica socioecológica previamente implementada no estudo de caso, e atribuídos pesos a cada fator de entrada em relação a um fator central em uma escala de tempo. O modelo evidenciou um alto grau de escassez hídrica e aumento da pressão sobre os ecossistemas associados, o que coloca em risco a resiliência do ecossistema para enfrentar a variabilidade climática.

Azcuña-Castro e Mejía-Vaca (2021) apresentaram análises do potencial de resiliência de um ecossistema frente a mudanças climáticas, sob uma ótica capaz de prever a resiliência diante de eventos extremos e criar ações preventivas. Estas ações, segundo os autores, reduzem em até 40% os danos que podem vir a ser causados por estes eventos, facilitando o processo de resiliência após ocorrência das perturbações previstas.

Elizalde-Castillo *et al.* (2021) mostraram a resiliência dos recursos hídricos em uma comunidade do México diante do vazamento de 40.000 metros cúbicos de material lixiviado de sulfato de cobre acidulado. Após o derramamento, foi registrado um aumento nas concentrações de ferro, alumínio, cobre, manganês, arsênio e chumbo nas águas superficiais da região. O estudo comprovou o dano ambiental e justificou a necessidade de implementação de um sistema de monitoramento para medir a evolução a longo prazo do impacto ambiental. Após o vazamento, aumentou-se a atenção a possíveis desastres futuros, culminando em práticas de capacitação de longo prazo, entendimento do conceito de resiliência e incentivo a melhores práticas de gestão preventiva.

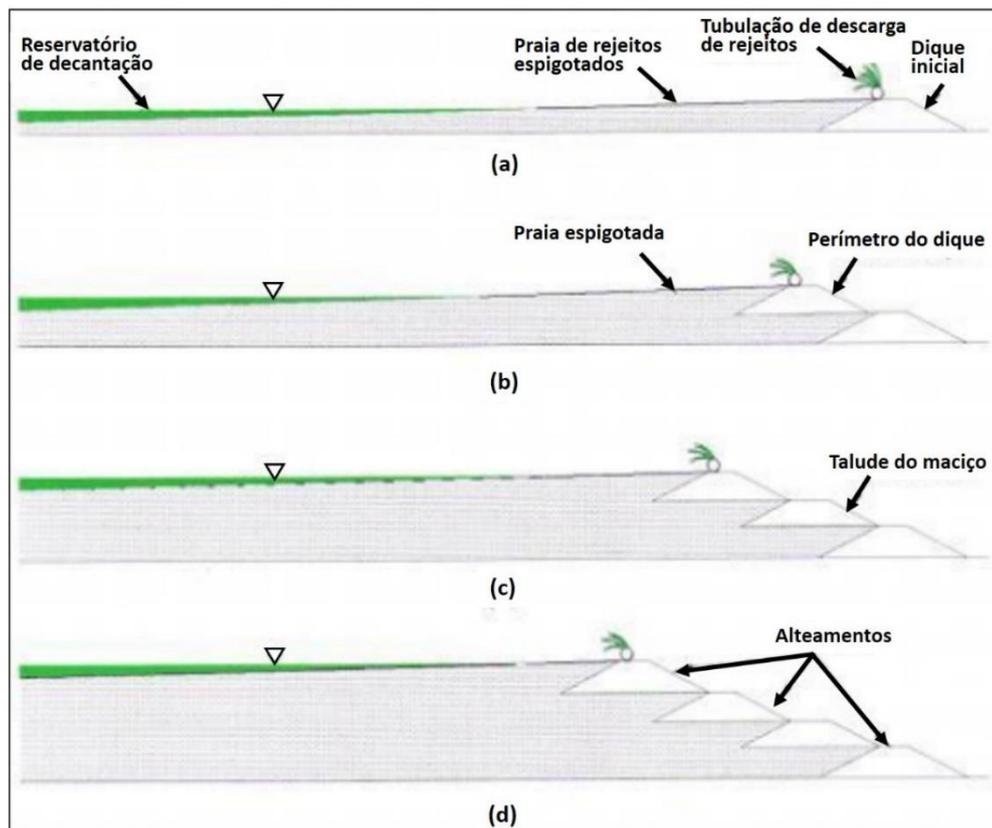
Seleguim (2021) seguiu uma linha de raciocínio rumo a uma resiliência observada em paralelo às mudanças climáticas. O desenvolvimento da resiliência se torna uma realidade

palpável, capaz de fornecer respostas antecipatórias e inclusivas para as comunidades. O estudo abrange o Brasil, Uruguai, Bangladesh, Moçambique e Ilhas Salomão, compreendendo, desta forma, todos os continentes do Hemisfério Sul. O fortalecimento do papel das comunidades e das coalizões multissetoriais se torna essencial para a redução das injustiças e desigualdades inerentes às mudanças climáticas impulsionadas pela ação antrópica, em face ao desmatamento, poluição das águas, instabilidades políticas e outros impactos econômicos.

3.3 Acidentes na mineração com barragens em alteamento a montante

De acordo com Soares (2015), o alteamento é um método construtivo de barragem de contenção de rejeitos. Segundo o autor, existem três principais tipos de alteamento: a montante, a jusante e por linha de centro, que eventualmente podem ser combinados. Estas denominações referem-se ao deslocamento que o eixo da barragem apresentará durante as etapas de alteamento. No alteamento a montante (Figura 1), a linha central da crista da barragem é deslocada em direção ao reservatório a partir de uma barragem inicial, chamada dique de partida. Construído o dique de partida, os rejeitos são depositados a montante da crista sobre os rejeitos dispostos anteriormente, formando novos diques na sequência (SOARES, 2015).

Figura 1 – Evolução esquemática do método de alteamento a montante.



Fonte: Adaptado de Soares (2015).

Durante este processo é formada uma praia de rejeitos para servir de base para construção do próximo alteamento. O dique subsequente será construído sobre o topo do dique anterior na praia de rejeitos; por isso, é dito que a construção de uma barragem de alteamento a montante é permanente (SEGUR, 2019).

A construção dos alteamentos deve observar, dentre outros fatores, a sedimentação dos rejeitos sobre os quais serão construídos, para redução dos riscos de acidentes. Entretanto, o aumento da produção de minério e, conseqüentemente, a maior geração de rejeitos levam à necessidade de construção de novos alteamentos, os quais são realizados, muitas vezes, sem a observância da sedimentação necessária para tal.

No caso de não ocorrência da sedimentação adequada, problemas de subpressão no reservatório poderão surgir devido a variação da percolação de água armazenada, e o excesso de subpressão afetará a fundação do barramento, o que poderá causar alterações nas condições geológico-geotécnicas consideradas para o projeto (CASTRO, 2008).

O método de alteamento a montante (Figura 1) é “o mais vulnerável à ocorrência de acidentes devido às forças da percolação da água, com maior susceptibilidade à instalação de processos erosivos internos de *piping* e liquefação, maiores responsáveis por acidentes já registrados” (CASTRO, 2008).

Este método de alteamento era o mais utilizado pelas mineradoras no Estado de Minas Gerais, anteriormente ao rompimento da barragem de Brumadinho, em 2019, pelo fato de ser o mais econômico, uma vez que a construção da barragem é realizada por etapas caracterizadas por alteamentos sucessivos, reduzindo-se o custo inicial da obra. Porém, como citado anteriormente, é o método que apresenta maior risco de acidentes estruturais e ambientais, devido à dificuldade de controle da superfície freática.

A segurança das barragens é prevista pelas Leis nº 12.334/2010 e 14.066/2020, que juntas estabelecem a Política Nacional de Segurança de Barragens. Estas leis abrangem condições a serem atendidas pelo empreendedor responsável pela barragem, entre as quais destacam-se a preservação da vida, da propriedade, da saúde e do meio ambiente, bem como a manutenção da integridade estrutural e operacional da barragem (ANM, 2022).

Existem quatro grupos responsáveis pela fiscalização da segurança das barragens, que tomam por base a finalidade da barragem (ANM, 2022). A fiscalização das barragens utilizadas para geração de energia fica a encargo da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), enquanto as barragens utilizadas para conter rejeitos da mineração encontram-se aptas à fiscalização por parte do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A fiscalização

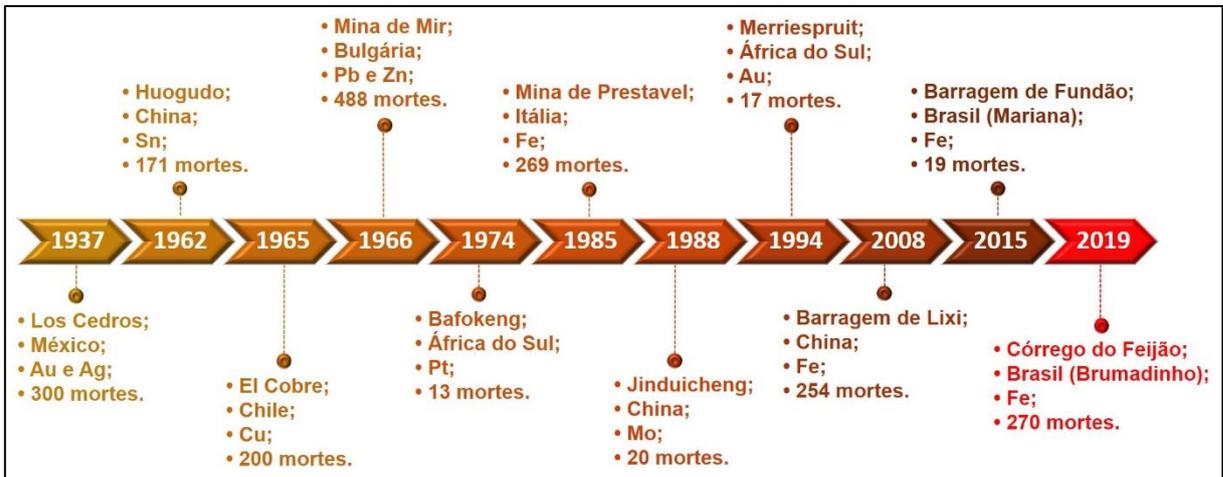
das barragens cuja finalidade é a contenção de rejeitos industriais, por sua vez, fica a encargo do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) ou, em determinadas situações, dos órgãos ambientais estaduais responsáveis pela emissão da Licença Ambiental. Por fim, as barragens caracterizadas com a finalidade de usos múltiplos são fiscalizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) ou pelos órgãos estaduais gestores dos recursos hídricos, como, por exemplo, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), em Minas Gerais (ANM, 2022).

A fiscalização da segurança das barragens não impossibilita outros órgãos de fiscalizarem por outras razões, como o licenciamento ambiental ou mesmo referente às outorgas de direito de uso dos recursos hídricos (ANM, 2022). Os empreendedores responsáveis por barragens de água, de retenção de resíduos ou de rejeitos devem, obrigatoriamente, apresentar ao órgão fiscalizador o Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP) e o Relatório Anual para Barragens, desde que o empreendimento possua no mínimo uma barragem e seja passível de arrecadação da Taxa de Controle de Fiscalização Ambiental (TCFA).

A proibição do método construtivo de alteamento a montante para barragens foi impulsionada, de acordo com ANM (2022), pelos grandes acidentes ocorridos na mineração, sobretudo pelo rompimento da barragem de Fundão em 2015, no município de Mariana-MG e pelo rompimento da B-I em 2019, em Brumadinho. Esta proibição se deu, inicialmente pela Resolução ANM n° 4/2019, posteriormente substituída pela Resolução ANM n° 13/2019. Além da proibição da construção de novas barragens utilizando-se o método a montante, foi exigido também o descomissionamento e a descaracterização das estruturas construídas por este método anteriormente à vigência da resolução supracitada (ANM, 2022).

Ao longo da história, foram registrados diversos acidentes ocorridos na mineração, muitos deles caracterizados pela utilização do método de alteamento a montante para a construção de suas barragens de rejeito (HALABI *et al.*, 2022). A linha do tempo apresentada na Figura 2 foi elaborada pelo autor deste trabalho, com base em Halabi *et al.* (2022) e exibe os maiores acidentes registrados em barragens construídas sob o método de alteamento a montante ao longo da história, sendo evidenciados os acidentes ocorridos entre os anos de 1937 a 2019, quando ocorreu o acidente de Brumadinho, objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 2 – Acidentes ocorridos com barragens da mineração em diversos países indicando, respectivamente, ano de ocorrência, nome da mina/barragem, país de ocorrência, bem mineral extraído e número de mortes.



Fonte: Autor (2023) com base em Halabi *et al.* (2022).

3.4 O rompimento da barragem de Brumadinho

Uma breve contextualização do início das atividades mineiras extrativas no município de Brumadinho foi apresentada por Bechler e Ribeiro (2019), que mostraram a evolução do cenário vigente até o rompimento da B-I (ilustrada por meio da Figura 3). Os autores enfatizaram o estado de dependência da população em relação à mineração para o giro da economia local, visto que 60% da arrecadação fiscal dependia diretamente das atividades da Vale S.A.

Figura 3 – Área da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, antes e depois do rompimento.



Fonte: VEJA (2019).

Diversos impactos socioambientais (Figura 4) decorridos deste desastre foram expostos por Lima *et al.* (2019), que defenderam a necessidade de construção de uma sociedade sustentável, tendo a responsabilidade ambiental como mecanismo essencial para prevenção de catástrofes. Os autores questionaram as responsabilidades jurídicas, e questões referentes a

punições, no intuito de diminuir a negligência e a morosidade em casos de caráter similar ao ocorrido em Brumadinho.

Figura 4 – Rejeitos da B-I pós-rompimento, inseridos no ribeirão Ferro-Carvão, Brumadinho – MG.



Fonte: Fotografia por Vinícius Mendonça, IBAMA (2022).

Almeida *et al.* (2019a) retrataram o quão desafiador é a tarefa de análise em profundidade desse tipo de ocorrência, bem como os aspectos apontados como potencialmente relacionados às origens do desastre e do desenvolvimento de seus impactos imediatos, de longa duração e de instalação tardia. Esta complexidade exige a associação de técnicas e métodos adequados para recuperação das áreas atingidas.

Diversas áreas do município de Brumadinho, onde se instalavam atividades agrícolas, foram totalmente destruídas e geraram prejuízos imensuráveis. Araújo *et al.* (2019) realizaram estudos de impactos ambientais decorrentes do rompimento por meio de índices de vegetação. Pereira *et al.* (2019) apresentaram evidências dos impactos ao meio ambiente, evidenciando a perda de peixes (Figura 5a), aves silvestres atingidas (Figura 5b), danos a culturas agrícolas (Figura 5c) e animais soterrados (Figura 5d).

Figura 5 – Impactos do rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão à ictiofauna (a), à avifauna (b), à agricultura (c) e à bovinocultura (d).



Fonte: Pereira *et al.* (2019).

Os recursos hídricos da região de estudo tornaram-se fortemente vulneráveis e sua utilização para múltiplos usos foi interrompida, diante de um cenário precário, como relatado por Carvalho (2019) e Romão *et al.* (2019). Souza *et al.* (2021) indicaram um aumento de arboviroses por meio do estudo epidemiológico de regiões atingidas pelos rejeitos da mineradora.

Terajima e Neto (2018) discutiram as responsabilidades do Estado de Minas Gerais diante do incidente ocorrido, ao passo que Almeida *et al.* (2019b) abordaram o caráter organizacional da Vale S.A. e a possível negligência frente às condições da barragem anteriores ao desastre e também em relação ao posicionamento da empresa em situações posteriores ao rompimento, envolvendo vítimas da tragédia. Faria e Souza (2019) deram ênfase a uma “omissão fiscalizatória” por parte do Estado que, segundo os autores, constitui um aspecto de grande importância no contexto geral do rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão.

O rompimento da barragem trouxe sérios impactos econômicos, dentre os quais pode-se destacar a perda de capital por parte da Vale S.A., responsável pela barragem da Mina Córrego do Feijão (COSTA e PINTO, 2019). A empresa perdeu mais de setenta bilhões de reais em menos de uma semana. Esta perda foi a maior registrada na história do mercado de ações

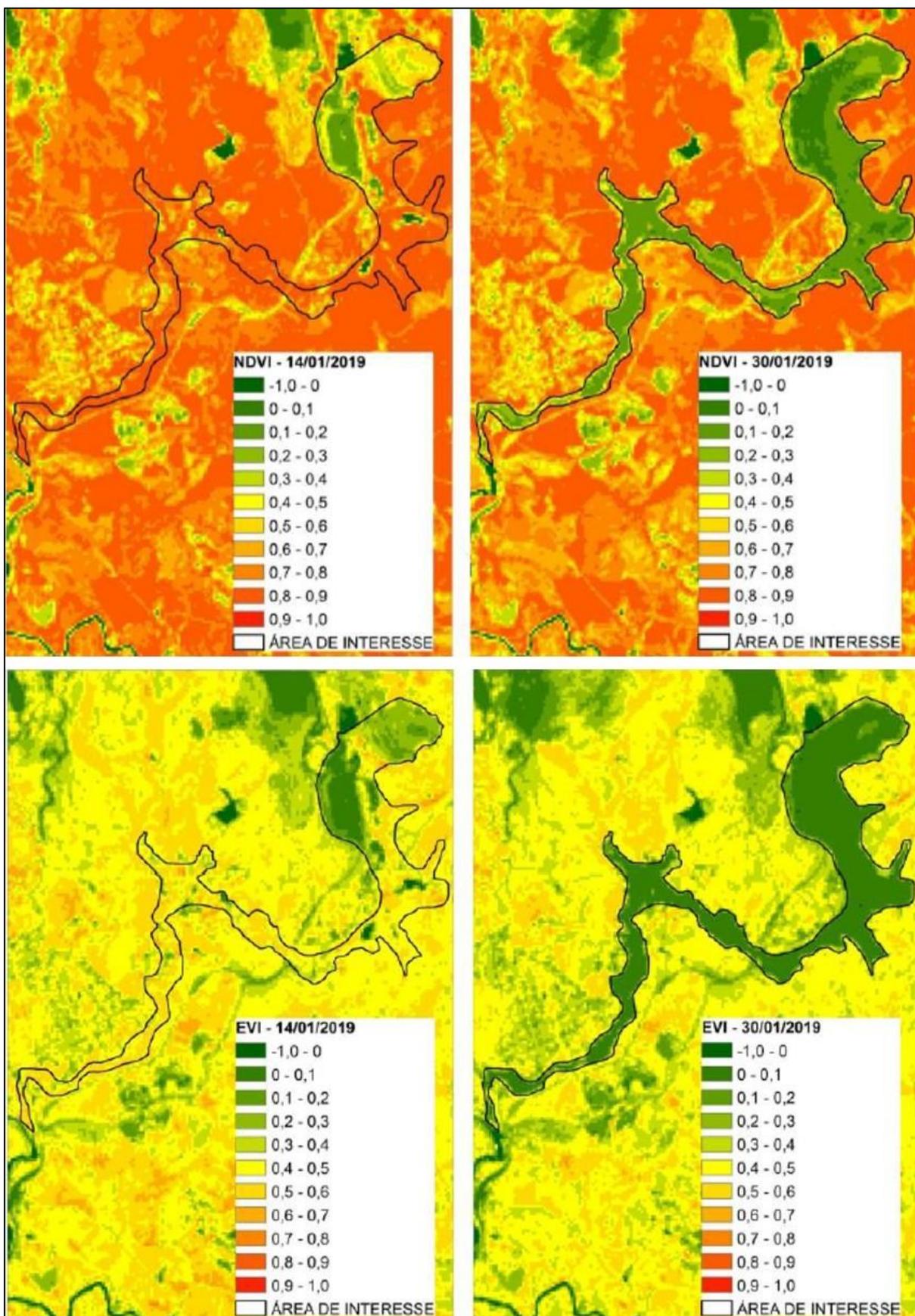
brasileiro neste período de tempo e superou, assim, as perdas da Petrobrás em 2018. Domingues *et al.* (2020) descreveram impactos econômicos decorrentes da paralização de parte da produção mineral em função do desastre em questão.

Os bloqueios judiciais e as multas aplicadas à Vale S.A. impactaram o setor de investimento em mineração no Brasil inteiro. Em fevereiro de 2020 a Vale S.A. divulgou os resultados financeiros de 2019, que indicaram uma queda de 20% no lucro líquido da companhia (Costa e Pinto, 2019), em função dos problemas gerados pelo rompimento da barragem.

Entre estes problemas, pode-se destacar a paralização de operações importantes por ordem judicial. Frente aos acontecimentos, poucos dias após o rompimento, foi anunciado pelo presidente da Vale S.A. que a companhia desativaria estruturas similares às da barragem de Brumadinho em dez de suas instalações ao longo do território brasileiro, mesmo diante do risco de redução de 40 milhões de toneladas na produção anual de minério de ferro da empresa.

Ferramentas de geotecnologias foram utilizadas por Araújo *et al.* (2019) para identificar a mancha causada pelos rejeitos da mineradora (Figura 6). Foram utilizados os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), traduzido como Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), traduzido como Índice de Vegetação Melhorado. De acordo com os autores, o EVI é “uma modificação do NDVI, aprimorado para reduzir o ruído de fundo, o ruído atmosférico e a saturação na maioria dos casos”. Estes índices são utilizados para estimar a quantidade de biomassa foliar fotossinteticamente ativa, a qual foi drasticamente modificada após o rompimento na calha do ribeirão Ferro-Carvão.

Figura 6 – Índices NDVI e EVI aplicados à região do ribeirão Ferro-Carvão.



Fonte: Araújo *et al.* (2019).

Na Figura 7 é apresentado um modelo matriz adaptado de Polignano e Lemos (2020) para os danos socioambientais do rompimento da barragem da Vale S.A. em Brumadinho, demonstrando que os danos são sistêmicos, sinérgicos e dinâmicos.

Figura 7 – Matriz de danos socioambientais pós-rompimento da B-I.



Fonte: Adaptado de Polignano e Lemos (2020).

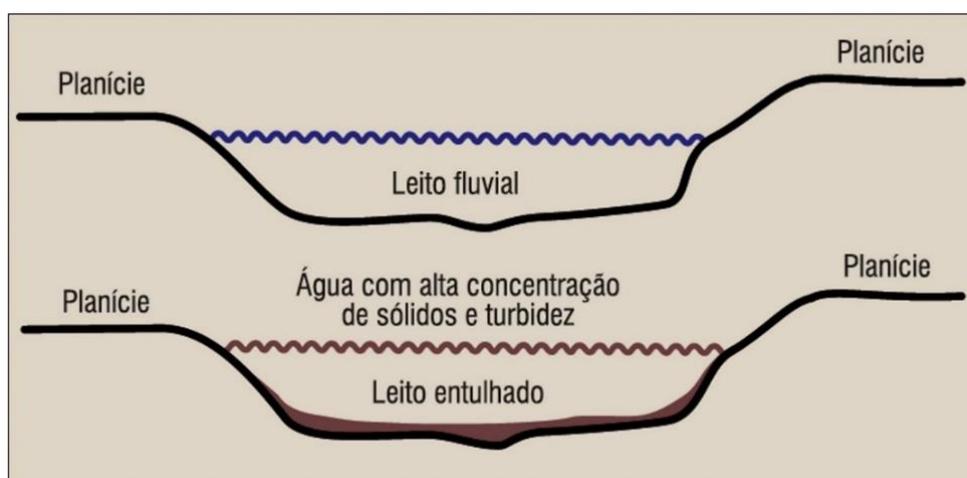
Desde o rompimento, o Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema) e seus órgãos vinculados - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), IGAM, Instituto Estadual de Florestas (IEF) e a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) - trabalham de forma integrada, focados nas principais demandas das comunidades atingidas e na recuperação ambiental.

O Sisema determinou no dia 26/01/2019, um dia após o rompimento da B-I, a suspensão de todas as operações da Vale S.A. na Mina Córrego do Feijão. Atualmente, as operações da Vale S.A. realizadas na área estão focadas nas obras emergenciais de engenharia e meio ambiente para mitigação dos impactos decorrentes do rompimento.

Gomes *et al.* (2020) analisaram os impactos ambientais do desastre de Brumadinho pela proposição de valores de referência, utilizando-se a análise da qualidade das águas do rio Paraopeba a partir da série histórica 2008 a 2018. Os autores apresentaram dados de análises de água no primeiro ano de monitoramento das águas do rio Paraopeba realizadas pelo IGAM, pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e o Serviço Geológico do Brasil (SGB), os quais encontram-se disponíveis em IGAM (2020). Foram utilizados dados de quatro estações de monitoramento e analisados três dentre os vários parâmetros monitorados.

Os resultados obtidos por Gomes *et al.* (2020) são inconclusivos em relação à expectativa de qualidade da água em medições futuras, visto que um grande volume de rejeitos da barragem permanece ainda alocado nas calhas do rio Paraopeba (Figura 8). Assim, os autores deixam claro nas considerações finais do seu trabalho a necessidade de mais estudos nesta área, dotados de maior volume de informações e que compreendam um período mais extenso de monitoramento.

Figura 8 – Perfil esquemático do entulhamento da calha de um rio em função da inserção de rejeitos.



Fonte: Polignano e Lemos (2020).

O monitoramento da qualidade das águas do rio Paraopeba já era feito anteriormente ao desastre pelo IGAM, pela COPASA e pela parceria entre o SGB e a ANA. Entre estes, destaca-se o IGAM, que conta com uma série histórica de monitoramento da qualidade das águas da bacia e publicou um informativo especial sobre a avaliação da série histórica entre 2000 e 2018, trazendo parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na B-I no complexo da Mina Córrego do Feijão no município de Brumadinho.

Além disso, o IGAM intensificou o monitoramento da qualidade das águas do rio Paraopeba após o rompimento da barragem, estabelecendo-se o Plano de Monitoramento Emergencial, que buscou estabelecer os parâmetros ideais a serem monitorados, bem como a periodicidade ideal para coleta e análise de amostras de água e sedimentos alocados na calha do rio Paraopeba.

3.5 Reparações realizadas na bacia hidrográfica do rio Paraopeba para contenção e remoção dos rejeitos da B-I

Desde o rompimento da B-I no município de Brumadinho, diversas medidas foram tomadas no intuito de remover os sedimentos depositados, em especial no ribeirão Ferro-Carvão e no rio Paraopeba, que receberam enormes volumes de lama, conforme supracitado. Os

procedimentos estão sendo realizados com o objetivo de conter e remover os rejeitos dos locais atingidos, no intuito de evitar seu avanço para regiões a jusante.

Foi construída, principalmente pela Vale S.A., uma série de estruturas integradas, com a finalidade de reduzir o carreamento de sedimentos para o curso do rio Paraopeba, reduzindo significativamente a Turbidez e a consequente perda de qualidade da água. De acordo com a Vale (2019), as estruturas construídas cumpriram as suas devidas funções previstas de contenção dos rejeitos. Mesmo para o período chuvoso, onde há uma tendência de aumento da Turbidez, em função do transporte de sedimentos e rejeitos das regiões adjacentes aos cursos d'água para o seu leito, os resultados observados foram bastante positivos.

O Marco Zero representa a área piloto para a recuperação da bacia do ribeirão Ferro-Carvão e foi utilizada para realização de ações norteadoras para as demais áreas onde foram instaladas as principais estruturas da bacia. A SEMAD, o IEF, a FEAM e o IGAM realizaram vistorias para garantir as ações de reconformação do canal do ribeirão Ferro-Carvão, com a verificação da vegetação que se desenvolve no entorno do canal e na estrutura denominada Green Wall, que reveste trechos do canal (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

No decorrer da utilização do Marco Zero como área piloto, foram observados pontos insatisfatórios, sobretudo nos trechos aos quais foram atribuídas características artificiais, como por exemplo, a implantação de substrato uniformemente pedregoso, a uniformização longitudinal da profundidade do leito, o aclave instaurado, altura e bordas abruptas das paredes do canal, a supressão da planície de inundação e de meandros e a redução da capacidade de infiltração a partir do leito do canal (FEAM/IEF/IGAM, 2022). Diante destas inconformidades observadas, optou-se por não expandir o projeto de reconformação executado no Marco Zero para o restante da bacia do ribeirão Ferro-Carvão e, assim, as obras futuras devem reestabelecer as feições geomorfológicas, hidrológicas e biológicas naturais do canal, a fim de garantir a preservação das funções ecológicas do ribeirão e sua planície de inundação (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Além das estruturas de contenção, as intervenções realizadas pela Vale S.A. também incluíram a remoção deste rejeito da calha do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba, e a destinação destes para locais adequados (VALE, 2019).

Os rejeitos provenientes do rompimento da B-I chegaram a ocupar uma área aproximada de 303 ha do ribeirão Ferro-Carvão. O Sisema determinou, como premissa para a reparação ambiental, a retirada total deste material intra e extra calha. À medida que as buscas pelos corpos das vítimas foi evoluindo, sob liberação das áreas pelo Corpo de Bombeiros Militar de

Minas Gerais (CBMMG), essa premissa foi sendo cumprida (FEAM/IEF/IGAM, 2022). A FEAM solicitou à Vale S.A. um Plano de Manejo dos Rejeitos (PMR), o qual foi entregue em 2021 e contemplou as etapas das ações de intervenção para o manejo dos rejeitos, entre outras diretrizes previstas. O PMR inclui ainda o descomissionamento das estruturas de contenção executadas.

De acordo com FEAM/IEF/IGAM (2022), a Vale S.A. apresenta mensalmente relatórios unificados com os volumes estocados nos Depósitos Temporários de Rejeitos (DTRs), na Pilha de Estéril (PDE) Menezes III, no Terminal de Carga Ferroviário (TCF), indicado na Figura 9, e na Instalação de Tratamento de Minério a Seco (ITMS). São apresentados ainda os volumes de rejeitos com destinação final concluída na Cava da Mina Córrego do Feijão e o saldo de rejeitos a serem retirados da Zona Quente em relação ao rejeito extracalha. Este material corresponde ao remanescente da B-I nas áreas do ribeirão Ferro-Carvão. Os relatórios contemplam as condições de assoreamento e o volume útil disponível das estruturas de contenção, de modo a identificar-se o momento apropriado para realização do descomissionamento destas estruturas (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Figura 9 – Terminal de Carregamento Ferroviário (TCF).

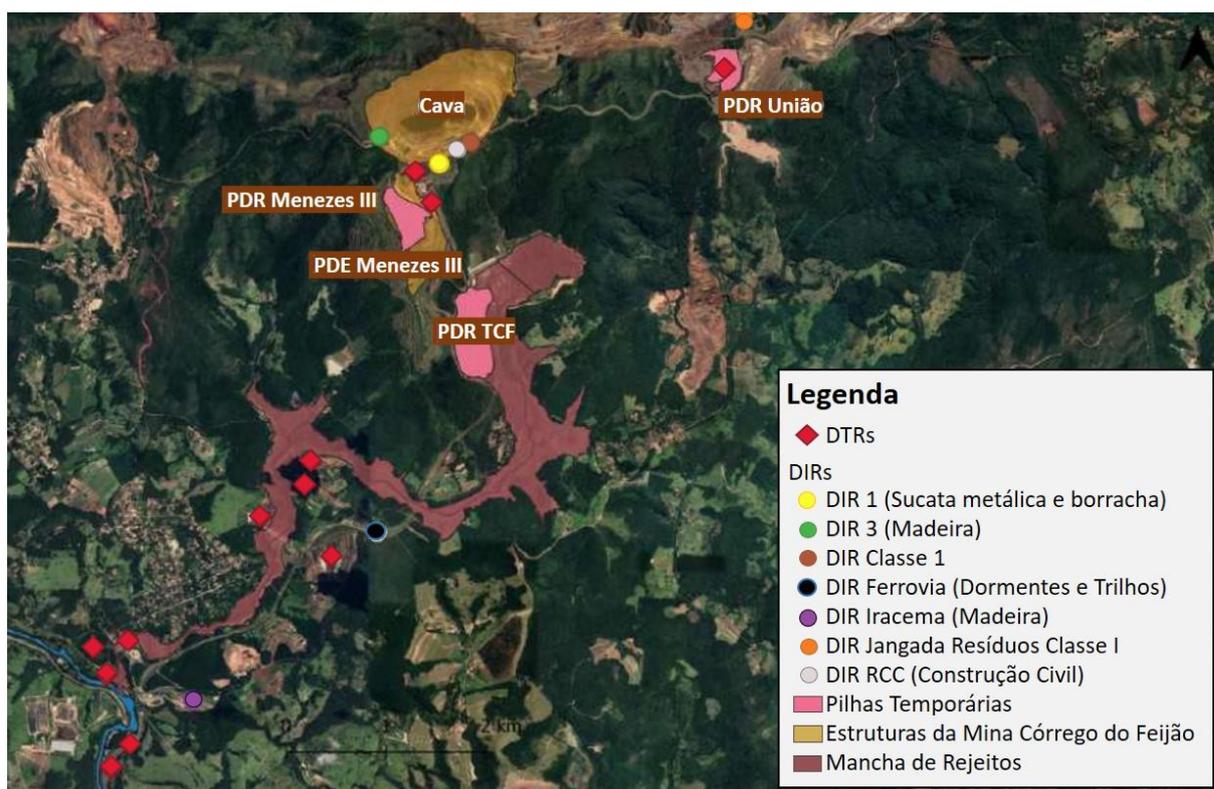


Fonte: FEAM/IEF/IGAM (2022).

Um dos principais meios de acompanhamento por parte da FEAM sobre as ações de gestão de resíduos realizadas é por meio do “Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos Carregados pelo Rompimento da Barragem B-I” (PGIRR). Este plano contempla, entre outros, a caracterização dos rejeitos e sedimentos removidos do ribeirão Ferro-Carvão, bem como, a remoção, transporte, armazenamento, triagem e destinação dos rejeitos e resíduos, considerando-se as definições e liberação das áreas pelo CBMMG (FEAM/IEF/IGAM, 2022). Os DTRs, como o próprio nome sugere, são utilizados para armazenamento temporário dos rejeitos. Em seguida, os rejeitos passam por processo de peneiramento no TCF e são direcionados para os locais de disposição final.

Os Depósitos Intermediários de Resíduos (DIR), por sua vez, são reservados para o armazenamento temporário dos resíduos encontrados na mancha de rejeitos (Figura 10). Em seguida, realiza-se a triagem no pátio da Central de Materiais Descartáveis (CMD), para posterior destinação, de acordo com a tipologia e classificação dos rejeitos (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Figura 10 – Espacialização de estruturas previstas pelo Plano de Manejo de Rejeitos e Plano Integrado de Gerenciamento de Rejeitos e Resíduos.



Fonte: FEAM/IEF/IGAM (2022).

Os rejeitos removidos intra e extra calha do ribeirão Ferro-Carvão vêm sendo dispostos, desde 2020, em duas pilhas de propriedade da Vale S.A., sendo uma delas a PDE de Menezes III e a outra a PDE União. Diante da limitação da capacidade destas pilhas, optou-se pela disposição definitiva, ainda em 2020, na Cava de Feijão; porém, em função da interdição desta cava em dezembro de 2020, os rejeitos passaram a ser direcionados aos DTRs. Diante do cumprimento, por parte da Vale S.A., das ações requeridas para desinterdição da atividade de disposição de rejeitos na Cava do Feijão, em 2021, a ANM e a FEAM autorizaram o retorno da disposição de rejeitos na Cava do Feijão sob período de teste. Por solicitação da FEAM, o plano vem sendo atualizado de acordo com as alterações realizadas no escopo dos trabalhos de campo e o acompanhamento da execução é realizado através de informes trimestrais (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Foram construídas três grandes estruturas de contenção de rejeitos, sendo um dique, denominado Dique 2 (Figura 11a) e duas barreiras hidráulicas, denominadas BH-0 e BH-1 (Figuras 11b e 11c), entre a B-I, na Mina Córrego do Feijão, e a confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba (VALE, 2019). Outras 25 pequenas barreiras estabilizantes também foram construídas como suporte às estruturas mais robustas, tanto para contenção dos sedimentos quanto para redução das vazões e consequente redução da Turbidez (VALE, 2019).

Outra importante estrutura instalada foi uma cortina de estacas metálicas (Figura 11d), próximo à confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, que viabilizou a limpeza do trecho do rio que recebeu os maiores volumes de sedimentos e cessou, em maio de 2019, o carreamento de sólidos para o mesmo (VALE, 2019).

Figura 11 – Estruturas construídas no ribeirão Ferro-Carvão. a) Dique 2; b) BH-0; c) BH-1; d) Cortina Metálica em Estaca-Prancha.



Fonte: Adaptado de FEAM/IEF/IGAM (2022) & FEAM/IEF/IGAM (2023).

Cabe esclarecer que todas as estruturas de contenção foram dimensionadas para dissipar a energia e a velocidade da água, de maneira que permita a passagem da água e a retenção dos sedimentos (VALE, 2019). Desta forma, as estruturas atuam de forma integrada, sob considerável redução da capacidade de carreamento de sólidos pela água, cujo vertimento vem sendo monitorado, considerando-se diversos parâmetros, dentre eles a Turbidez (VALE, 2019).

A implantação das Estações de Tratamento de Água Fluvial (ETAFs), também próximas ao local de confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, constitui outra importante medida tomada pela Vale S.A. para contribuir para o processo de resiliência dos

recursos hídricos atingidos pelos rejeitos da B-I. De acordo com Vale (2019), esta ETAF, denominada ETAF Iracema, retornou ao rio Paraopeba um volume aproximado de 3 bilhões de litros de água tratada, com Turbidez inferior ao limite de 100 NTUs, estabelecido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), com a retirada de metais pesados, e outros elementos, principalmente o ferro e o manganês.

A ETAF 1 (Figura 12a) é utilizada para o tratamento das águas do ribeirão Ferro-Carvão e seu efluente é direcionado ao ribeirão Casa Branca, que desagua no rio Paraopeba. Este efluente apresentou em 2021 uma Turbidez média de 6,4 NTU, considerada adequada, de acordo com o limite de 100 NTU estabelecido pelo Conama. A ETAF 2 (Figura 12b), por sua vez, foi construída com o objetivo de tratar diretamente as águas do rejeito dragado no Rio Paraopeba (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Figura 12 – Estações de Tratamento de Água Fluvial ETAF 1 (a) e ETAF 2 (b).



Fonte: adaptado de FEAM/IEF/IGAM (2022).

O processo de dragagem (Figura 13) foi iniciado, segundo a Vale (2019), somente nas regiões onde as buscas pelas vítimas fatais (ANEXO II) já haviam sido encerradas. A dragagem conta com a remoção do rejeito acumulado na região assoreada do rio, o que implica no aprofundamento do leito do rio e aumento do volume de água que este pode comportar. Este procedimento reduz o risco de transbordo da água nas planícies de inundação durante o período chuvoso.

Até setembro de 2021, o material removido durante o processo de dragagem era armazenado e desidratado em grandes bolsas geotêxteis. Em seguida, realizava-se o dreno desta água contida nos bolsas, com posterior bombeamento para uma estação de tratamento de água e retorno sob condições adequadas, de acordo com os padrões estabelecidos pelo Conama, ao rio Paraopeba (VALE, 2019).

Figura 13 – Principais locais de operação da dragagem no rio Paraopeba.



Fonte: Adaptado de FEAM/IEF/IGAM (2022).

Em outubro de 2021 foi apresentada a proposta, junto ao órgão ambiental, de um estudo teste para disposição dos rejeitos removidos do rio Paraopeba em *sumps* (Figura 14), ao invés dos *geobags* (FEAM/IEF/IGAM, 2023). Após avaliação deste estudo, o material dragado passou a ser direcionado aos *Sump* 1 e 2 do ribeirão Ferro-Carvão, sendo posteriormente destinados à ETAF-1 e não mais para os *geobags* da ETAF-2. Desta forma, o rejeito dragado passou a ser inicialmente bombeado para o *Sump* 1, com a formação de praias de rejeitos. Em seguida, a água e o material fino transbordam pelo extravasor para o *Sump* 2, onde ocorre o amortecimento e sedimentação dos sólidos em suspensão. Com auxílio de escavadeiras, o material decantado no *Sump* 1 é removido e transportado por caminhões ao DTR-10 (FEAM/IEF/IGAM, 2023).

Figura 14 – Vista aérea dos *Sumps* 1 e 2.



Fonte: FEAM/IEF/IGAM (2023).

As Barragens de Menezes I e Menezes II tem como finalidade a retenção de sedimentos finos provenientes do Canal Oeste e Leste, respectivamente, localizados na PDE Menezes III. No canal de fundo da Barragem Menezes II encontra-se implantado um medidor de vazão denominado de Calha Parshall, por sua vez associado a um Transmissor de Nível Ultrassônico. A Calha Parshall corresponde a um medidor de vazão em canais abertos, cujo escoamento se dá por meio da ação gravitacional em trecho retilíneo. O acréscimo do Transmissor de Nível Ultrassônico junto à Calha Parshall permite que sejam realizadas medidas de vazão de alta precisão e indicam variações abruptas no regime hídrico do canal de drenagem (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

Em meados de 2022 ocorreu a intensificação do aporte de sedimentos para o reservatório da Barragem de Menezes II, devido à ruptura do Canal Leste e à ocorrência de processos erosivos intensificados no mesmo local. Diante do ocorrido, a Vale S.A. instalou instrumentos complementares, com vistas ao maior detalhamento da segurança da estrutura de Menezes II. De acordo com relatório geotécnico apresentado em novembro de 2022, a barragem é considerada estável e possui elevado fator de segurança (FEAM/IEF/IGAM, 2023).

As estruturas construídas são descomissionáveis, o que permite que sejam retiradas a partir do momento em que não se façam mais necessárias para estabilização das áreas afetadas (VALE, 2019). Foram mobilizadas, para a execução das obras supracitadas, 45 empresas, 584 equipamentos e 2,8 mil trabalhadores, sendo que cerca de 50% são moradores de Brumadinho

e região. Com vistas à garantia da eficiência do conjunto de estruturas construídas, a Vale S.A. implantou o Plano de Monitoramento da Eficiência das Estruturas. Este plano conta com um monitoramento de 24 horas por dia de dados pluviométricos, fluviométricos e de Turbidez da água, cujos dados são disponibilizados diariamente de forma online para os órgãos competentes (VALE, 2019).

A Vale S.A. também realizou uma investigação geotécnica, que contou, entre outros, com a execução de sondagens para investigação do arcabouço geológico, hidrogeológico e estrutural do material remanescente em subsuperfície e em maiores profundidades. Foram executados, nas regiões a montante das estruturas, desvios estratégicos e drenagem de talwegues naturais, no intuito de evitar o carreamento de sedimentos para o ribeirão Ferro-Carvão, principalmente por águas pluviais (VALE, 2023). Na Barragem 6 (B-VI), foi realizada a limpeza do dreno de fundo, recomposição da drenagem superficial e drenagem da água. As obras foram acompanhadas por auditorias técnicas designadas pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG).

O planejamento e a execução do trabalho de remoção dos rejeitos têm sido realizados em ação conjunta entre o CBMMG e a Vale S.A. A disposição final tem sido feita em áreas previamente autorizadas pelos órgãos competentes, dentro da Mina Córrego do Feijão. Segundo a Vale (2023), todas as ações supracitadas foram previamente comunicadas aos órgãos ambientais e à ANM.

No dia 04 de fevereiro de 2021 foi firmado o Acordo Judicial para reparação integral dos danos do rompimento, a partir do qual foram definidas as obrigações da Vale S.A., como compromissária, visando a reparação integral dos danos, prejuízos socioambientais, socioeconômicos e demais impactos negativos ocorridos em detrimento do rompimento da B-I em Brumadinho (FEAM/IEF/IGAM, 2022). O acordo prevê que um montante de R\$ 37,66 bilhões seja desembolsado por parte da compromissária para realizar as ações previstas, principalmente nas áreas de segurança hídrica, mobilidade, reparação socioambiental integral, melhoria dos serviços públicos, investimentos socioeconômicos, demandas específicas dos atingidos, entre outras (FEAM/IEF/IGAM, 2022).

3.6 Especificidades dos parâmetros que compõem os Índices de Resiliência elaborados

Diversos autores descrevem as características químicas e físicas dos elementos químicos, bem como sua forma de ocorrência na natureza e sua manifestação quando absorvido pelo corpo humano. O SGB publicou em 2018 um Atlas Geoquímico (VIGLIO e CUNHA, 2018) da porção mineira da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. A seguir serão

apresentadas informações deste estudo e de outros autores, pertinentes às discussões do presente trabalho, em especial sobre os elementos que compõem os Índices de Resiliência propostos no presente trabalho.

Alumínio (Al)

O alumínio é um elemento químico pertencente ao grupo dos metais, caracterizado pela coloração prateada. Trata-se de um elemento litófilo, amplamente encontrado na composição química de diversos minerais (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, este é um metal leve, maleável, dúctil, com baixo ponto de fusão, bom condutor de eletricidade e é altamente resistente à corrosão. Ocupa a primeira posição entre os metais mais abundantes na crosta terrestre e a terceira posição dentre os elementos mais abundantes na crosta, atrás somente do oxigênio e do silício (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Sua principal ocorrência na natureza é junto aos minerais silicatados, comumente associado ao ferro, metais alcalinos e alcalinos-terrosos (MINEROPAR, 2005). Vale ressaltar que o alumínio não ocorre de forma livre na natureza, como é o caso, por exemplo, dos elementos nativos, como ouro e prata. O Alumínio dissolvido sofre o processo de enriquecimento nas argilas neoformadas, implicando em um aumento de sua concentração em sedimentos argilosos, em rochas pelíticas, e em rochas cuja gênese se associa aos argilominerais, como ocorre nos filitos e micaxitos (Mineropar, 2005; Koljonen *et al.*, 1992).

A bauxita é o principal mineral-minério fonte de alumínio e é caracterizada por uma mistura de óxidos, alumina (Al_2O_3), hidróxidos, gibbsita e algumas impurezas (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, sua utilização se expande desde a fabricação de ligas metálicas a utensílios e maquinários em diversos setores industriais. Este elemento não constitui um nutriente essencial à saúde humana e quando incorporado à alimentação de forma excessiva se torna tóxico e prejudicial à saúde. O Estado do Pará detém as maiores reservas brasileiras de bauxita (VIGLIO e CUNHA, 2018).

De acordo com Viglio e Cunha (2018), na porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco, o Alumínio dissolvido apresenta valores elevados nas amostras de água coletadas, principalmente na cabeceira da bacia, incluindo a bacia hidrográfica do Rio Paraopeba. Segundo os autores, a principal ocorrência de valores anômalos é observada a oeste da represa de Três Marias, seguida por cursos d'água situados nos municípios de São Joaquim de Bicas e Conselheiro Lafaiete.

Chumbo (Pb)

O chumbo, cujo nome deriva do latim, “*plumbum*”, pertence ao grupo dos metais pesados, apresenta coloração branco azulada, é maleável, dúctil, altamente resistente à corrosão e apresenta baixa capacidade de condução de eletricidade (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Uma fração considerável do chumbo encontrado na natureza provém do decaimento radioativo do urânio e do tório (MINEROPAR, 2005; KOLJONEN, *et al.*, 1992). Os principais minerais de chumbo são a galena (PbS), a anglesita (PbSO₄) e a cerusita (PbCO₃).

Sua maior utilização é em ligas metálicas, fusíveis, baterias automotivas, revestimentos de cabos elétricos, revestimentos protetores de raios-X e pigmentos de tintas. Não constitui um elemento essencial à alimentação humana e não faz parte do metabolismo humano (MINEROPAR, 2005). Torna-se perigoso quando encontrado em grandes quantidades no meio ambiente e está susceptível a acumular-se na porção mais superior do solo (KOLJONEN *et al.*, 1992; KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992). Quando absorvido, o chumbo pode acumular-se nos ossos, rins e fígado, cujos tecidos são ricos em cálcio (MINEROPAR, 2005).

O chumbo pode causar danos irreversíveis ao cérebro, com o chamado saturnismo, independente da forma em que a contaminação tenha ocorrido, seja por ingestão, inalação ou contato dermal. A Mina Morro Agudo, situada em Paracatu-MG, detém a maior produção de concentrado de chumbo do Brasil (DNPM, 2010).

Segundo Viglio e Cunha (2018), o chumbo ocorre em todas as amostras de solo da porção mineira da bacia do rio São Francisco, com teores de até 80,4 partes por milhão (ppm), em anomalias evidentes nas regiões de Pains, Doresópolis, Itatiaiuçu, alto rio Juquitaí, alto rio Paracatu e foz do rio Peruaçu. Em seu estudo, os autores constataram a presença de chumbo em todas as amostras de sedimentos, com valores máximos de 354 ppm, sendo 37 ppm o limite máximo permitido pela legislação para este elemento. As anomalias foram verificadas ainda na cabeceira do rio Pará e nos municípios de Bambuí, Belo Horizonte, Bom despacho, Curvelo, Montes Claros, Paracatu e Vazante (VIGLIO e CUNHA, 2018).

O cátion chumbo foi detectado por Viglio e Cunha (2018) em diversas amostras de águas superficiais, cujos valores, de até 0,383 mg/L, excederam em diversas amostras os limites estabelecidos pela legislação. Estes valores foram encontrados principalmente na região a oeste da represa de Três Marias, no rio dos Tiros e no rio Paraopeba. Segundo os autores, foi detectada a presença do cátion chumbo em 32% das amostras de água de abastecimento, podendo-se destacar a ocorrência nos municípios de Gameleiras, Guarda-Mor, Montes Claros, Paracatu, São João da Lagoa e Varzelândia.

Cobre (Cu)

O cobre, cujo nome deriva do latim “*cuprum*”, corresponde a um metal de transição, de coloração avermelhada, maleável, dúctil, com alta condutividade térmica e elétrica (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, o cobre apresenta forte afinidade com o enxofre, presente na composição química de diversos minerais sulfetados, originados sob condições redutoras. Em processos de enriquecimento supergênico, em condições oxidantes, origina carbonatos e hidróxidos (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Os principais minerais que apresentam o cobre em sua composição são a calcopirita (CuFeS_2), a bornita (Cu_5FeS_4), a calcocita (Cu_2S), a cuprita (Cu_2O), a tetraedrita (Cu_3SbS_3), a malaquita [$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})$], a azurita [$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$] e o cobre nativo (VIGLIO e CUNHA, 2018).

O cobre é de grande importância no processo de fotossíntese vegetal e essencial à boa saúde humana, mas seu excesso nos organismos pode causar irritações nas vias respiratórias, vertigens, náuseas e diarreias (MINEROPAR, 2005). Este elemento é essencial à vida em geral, com importante participação no processo de fixação do ferro na hemoglobina do sangue em diversos organismos (KOLJONEN *et al.*, 1992).

O Estado do Pará detém os principais depósitos de cobre do Brasil, em Carajás, seguido por depósitos também muito importantes nos Estados da Bahia e Goiás (BIONDI, 2003).

Os estudos de Viglio e Cunha (2018) apontam que o cobre ocorre preferencialmente nos bordos da bacia do rio São Francisco, com valores anômalos pontuais. Segundo os autores, a região com maior ocorrência de valores anômalos, por vezes superiores aos limites estabelecidos pela legislação, é a cabeceira do rio das Velhas, onde os valores chegam a 114 ppm. Nas amostras de sedimentos, os valores mais elevados encontram-se no bordo norte do Quadrilátero Ferrífero, entre os municípios de Belo Horizonte e Caeté, além das cabeceiras do rio São Lamberto, em Claro dos Poções, onde os valores chegam a 668 ppm (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Aproximadamente 40% das amostras de águas analisadas por Viglio e Cunha (2018) apontam a presença do cobre, sobretudo na margem esquerda do rio São Francisco, a partir do rio Paracatu e na porção nordeste da bacia do rio Verde Grande. Cerca de 40% das amostras de água de abastecimento indicaram a presença do elemento cobre, em especial na margem esquerda do rio São Francisco e na bacia do Verde Grande. Contudo, não foram detectados pelos autores teores acima do máximo permitido pela legislação (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Ferro (Fe)

O ferro constitui um metal de transição, caracterizado pela coloração branco-prateada, dúctil, maleável, com alto magnetismo, alta susceptibilidade à corrosão, bom condutor de calor e eletricidade (VIGLIO e CUNHA, 2018). De acordo com os autores, corresponde a um dos maiores constituintes da litosfera, com presença na fórmula química de minerais de diversas classes, incluindo os silicatos, óxidos, hidróxidos, sulfetos e carbonatos.

Segundo Mineropar (2005), sua ocorrência majoritária é nas rochas ígneas máficas e seus principais minerais são a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4), a siderita (FeCO_3), a limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), a ilmenita (FeTiO_3), a pirita (FeS_2), e a pirrotita (FeS).

Diante de inúmeras utilidades, seu emprego majoritário é na manufatura de aço e outras ligas, realizadas a partir de *blend* com outros elementos na siderurgia (MINEROPAR, 2005). Constitui elemento essencial à manutenção dos processos fisiológicos de todos os seres vivos, com importante função no metabolismo de algumas enzimas e como componente da hemoglobina, cuja deficiência implica no aumento do risco à anemia (KOLJONEN *et al.* 1992).

Os maiores depósitos de minério de ferro no Brasil encontram-se no Pará, na Mina de Carajás, em Minas Gerais, no Quadrilátero Ferrífero e, por fim, no Mato Grosso do Sul (VIGLIO e CUNHA, 2018). De acordo com os autores, toda a região do Quadrilátero Ferrífero apresentou amostras de solo com concentrações acima de 20%, com maior ocorrência nos bordos da bacia do rio São Francisco, em especial na porção Sul, sobre a Faixa Brasília e a Serra do Espinhaço.

De acordo com Viglio e Cunha (2018), o resultado das análises das amostras de sedimentos permite delinear perfeitamente o Quadrilátero Ferrífero, em função dos elevados valores de ferro encontrados. Regiões anômalas são observadas a oeste da represa de Três Marias, no rio Formoso, em regiões da Faixa Brasília e na cabeceira do rio Verde Grande (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Nas amostragens realizadas em águas superficiais, Viglio e Cunha (2018) detectaram o cátion ferro em aproximadamente 90% das amostras, com valores máximos de 8,39 mg/L, bastante superiores ao limite máximo de 0,3 mg/L permitido pela legislação. O cátion ferro foi detectado em 75% das amostras de água de abastecimento, com valor máximo de 4,31 mg/L encontrado no município de Glaucilândia (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Manganês (Mn)

O manganês pertence ao grupo dos metais de transição, possui abundância moderada na crosta terrestre, não é encontrado livre na natureza, de coloração branco-acinzentada, baixa

tenacidade, refratário e apresenta facilidade de oxidação. Há registro de nódulos oceânicos com um teor aproximado de 24% de manganês (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Possui a capacidade de remobilização durante atividades hidrotermais regionais. Quando exposto aos agentes do intemperismo, os compostos de manganês sofrem oxidação, liberação e reprecipitação, com a conseqüente formação de minerais secundários, em função das condições favoráveis de pH (MINEROPAR, 2005). Os principais minerais de manganês são a pirolusita (MnO_2), rodocrosita ($MnCO_3$) psilomelano $[(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}]$, criptomelana (KMn_8O_{16}), manganita $[MnO(OH)]$ e a haussmannita (Mn_2O_4).

A principal utilização do manganês é na produção de ligas de aço, em função de sua capacidade de endurecer o aço mantendo sua rigidez. Além disso, este elemento é amplamente utilizado na produção de pilhas e na pigmentação de materiais refratários (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Este metal apresenta ainda importante função nos processos de fotossíntese, com atuação na produção de O_2 (LOPES JR., 2007). O manganês é considerado um oligoelemento não tóxico para todas as formas de vida, atua em funções estruturais e enzimáticas, além de auxiliar na fixação da vitamina B1 (MINEROPAR, 2005). A inalação deste elemento em quantidades elevadas pode ocasionar danos neurológicos irreversíveis (KOLJONEN *et al.*, 1992).

De acordo com o DNPM (2010), os maiores depósitos de manganês do Brasil são conhecidos como Depósitos de Azul e encontram-se em Carajás, no Estado do Pará. De acordo com o autor, outros depósitos com alto teor e volume de manganês são encontrados em Corumbá-MS, em Mariana-MG, em Conselheiro Lafaiete-MG e em Caitité-BA.

O manganês apresenta valores bastante elevados nos solos do alto São Francisco, estudado por Viglio e Cunha (2018), com concentrações máximas de 6312 ppm, registradas em especial nas porções do alto São Francisco, nas cabeceiras dos rios Paracatu e Paraopeba, na margem direita do rio das Velhas e nas sub-bacias do Verde Grande e Poções, em Montalvânia.

Grande parte das zonas consideradas anômalas apresentaram, nos estudos de Viglio e Cunha (2018), valores superiores aos de prevenção para solos. No decorrer de seu estudo, os autores coletaram amostras de sedimento com teores acima de 1057 ppm de manganês nas cabeceiras do rio das Velhas e do rio Paraopeba, na região localizada a oeste da represa de Três Marias, em Riachinho, Lontra, Morro das Garças e Corinto. Diversas amostras de sedimento apresentaram resultados superiores a 10.000 ppm, considerado o limite máximo de detecção. A região abrangida pelas cabeceiras do rio das Velhas e rio Paraopeba apresentou, na grande

maioria das amostras, valores superiores aos limites permitidos pela legislação (VIGLIO e CUNHA, 2018).

O cátion manganês foi encontrado em aproximadamente 50% das amostras de águas superficiais coletadas, com 132 extrapolações ao valor máximo permitido pela legislação, de 0,1mg/L, com registro de valores de até 4,44 mg/L (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, aproximadamente 50% das amostras de água destinadas ao abastecimento apontaram a presença do manganês, com 13 registros de valores superiores ao máximo permitido. A maior extrapolação ao valor permitido pela legislação no referido estudo foi registrada no município de Pequi, onde o valor máximo encontrado foi de 0,546 mg/L.

Mercurio (Hg)

O mercúrio, cujo nome deriva do latim “*hydrargyrum*”, pertence ao grupo dos metais de transição, apresenta densidade e volatilidade elevadas e não é considerado um bom condutor de calor e eletricidade (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, sua ocorrência livre na natureza é rara e quando submetido a condições de temperatura ambiente costuma apresentar-se no estado líquido, com coloração prateada. O principal mineral fonte de mercúrio é o cinábrio (HgS).

As características físico-químicas do mercúrio facilitam a formação de ligas denominadas amálgamas com diversos metais, podendo-se destacar o ouro, a prata e o estanho. A sua utilização para amalgamar o ouro tornou-se popular e amplamente utilizada em garimpos e minerações (VIGLIO e CUNHA, 2018). Segundo os autores, outra importante utilização deste elemento é em instrumentos laboratoriais, como em termômetros e barômetros. A versatilidade de emprego deste elemento abrange também sua utilização na fabricação de lâmpadas de vapor de mercúrio, relés, eletrodos, baterias, pesticidas e pigmentos (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Não existe, até o momento, conhecimento sobre possíveis funções biológicas do mercúrio, ao passo que este elemento é considerado intrinsecamente tóxico (MINEROPAR, 2005). Segundo o autor, o metilmercúrio e o dimetilmercúrio são formas orgânicas deste elemento, altamente tóxicas, rapidamente absorvidas pelos tratos respiratório, gastrointestinal e epidérmico. O mercúrio é considerado bioacumulativo e pode ser biomagnificado na natureza, de acordo com a inserção que este pode vir a ter na cadeia trófica. Suas características toxicológicas são capazes de ocasionar doenças neurológicas, teratogênese e mutagênese (MINEROPAR, 2005).

Os sais de mercúrio também são altamente tóxicos, entre os quais se destacam o fulminato [Hg(CNO)₂], utilizado em detonações; o cloreto de mercúrio (Hg₂Cl₂), já utilizado

industrialmente na fabricação de purgantes, diuréticos, anti-helmíntico, desinfetante e em remédio contra sífilis (MINEROPAR, 2005). De acordo com o autor, entre as principais fontes pontuais de contaminação por mercúrio estão as indústrias de soda-cloro, cujos efluentes podem conter elevados teores deste elemento, seguidas pelas usinas termoelétricas que utilizam carvão mineral.

De acordo com Viglio e Cunha (2018), o mercúrio não é explorado comercialmente no Brasil. Sua ocorrência nas amostras de solo aponta anomalias isoladas. Aproximadamente 15% da área estudada pelos autores apresentam valores elevados, especialmente nos bordos leste do alto São Francisco e próximo aos municípios de Corinto, Medeiros, Onça de Pitangui, Pains, Paracatu e Várzea da Palma. Os valores encontrados pelos autores nas amostras de sedimentos chegaram a 1,22 ppm, sendo o limite máximo permitido pela legislação de 0,17 ppm .

Os núcleos anômalos são mais restritos nas regiões das cabeceiras do rio São Francisco, rio Paraopeba, Quadrilátero Ferrífero, confluência dos rios Verde Grande e Pequeno e nos municípios de Buritizeiro, Montes Claros, Pai Pedro, Paracatu e Riacho dos Machados (VIGLIO e CUNHA, 2018). Quase todas as amostras analisadas pelos autores levaram em consideração o cátion mercúrio e foram encontrados 21 resultados acima do limite de detecção do método. Foram identificadas apenas duas amostras com a presença do cátion mercúrio nas amostras de águas para abastecimento público, nos municípios de Guarda-Mor e Paracatu, ambas dentro dos limites permitidos pela legislação (VIGLIO e CUNHA, 2018).

Materiais particulados e a Turbidez (NTU)

O conceito de Turbidez pode ser entendido como o grau de atenuação da intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar determinada porção de água, mediante espalhamento ou absorção de comprimentos de onda distintos (WEINBERG, 2013). Segundo o autor, esta redução na intensidade advém da presença de sólidos em suspensão, normalmente caracterizados pela presença de partículas orgânicas, tais como algas e outros microrganismos, como também por partículas inorgânicas, comumente provenientes de sedimentos nas frações argila, silte e areia, gerados pela ação do intemperismo em rochas adjacentes aos corpos d'água.

A Turbidez também pode ter sua origem ou intensificação acelerada pela ação antrópica, uma vez que o despejo de efluentes domésticos, industriais e atividades de mineração podem contribuir significativamente com o aumento de sólidos em suspensão nos corpos d'água, sejam de origem orgânica ou inorgânica, por vezes caracterizados por material particulado tóxico e/ou patogênico (WEINBERG, 2013). O processo de erosão nas margens de rios ou próximo a elas, muitas vezes impulsionado pelo manejo inadequado dos solos em áreas antropizadas, pode

gerar grandes volumes de sedimentos. Estes tendem a ser carregados, principalmente no período chuvoso, para os cursos d'água mais próximos, que recebem este aporte de sedimentos e aumentam, conseqüentemente, os sólidos em suspensão e os valores de Turbidez (WEINBERG, 2013).

Níveis elevados de Turbidez em mananciais o tornam esteticamente desagradáveis e prejudicam o processo de fotossíntese da vegetação que se encontra total ou parcialmente submersa (CETESB, 2010). Este retardo no desenvolvimento da flora aquática muitas vezes influencia na redução da proliferação de peixes, prejudica diversas comunidades aquáticas e pode causar um desequilíbrio nos processos biológicos e nas condições de qualidade das águas (CETESB, 2010).

Outra possibilidade de chegada de material particulado em corpos d'água é por suspensão na atmosfera, onde partículas finas são transportadas e levadas aos mananciais, elevando sua Turbidez (ALAMDARI *et al.*, 2018). Segundo os autores, nas áreas fortemente antropizadas, cujo manejo do solo ocorre de forma inapropriada, a geração de particulado pode tornar-se um grande problema e gerar considerável volume de materiais diretamente assentados sobre os corpos d'água, ou em suas adjacências. Todo material fino depositado sobre o solo tende a convergir para os cursos d'água principais, de acordo com a configuração espacial das bacias de contribuição (ALAMDARI *et al.*, 2018).

Segundo Yoon (2010), a remoção de materiais particulados e outros poluentes da atmosfera depende, entre outros fatores meteorológicos, das condições de precipitação pluviométrica local. Para os autores, as chuvas intensas, de grande duração, tendem a reduzir substancialmente o volume de material particulado em suspensão, levando-os na grande maioria dos casos aos cursos d'água principais de uma bacia hidrográfica a partir de seus principais afluentes. Os eventos de seca, por sua vez, quando prolongados, permitem um fluxo aéreo de sedimentos finos que podem vir a extrapolar os limites de suas bacias de contribuição, precipitar a quilômetros de distância do local onde os sedimentos foram gerados e podem causar desequilíbrios no ciclo hidrológico (YOON, 2010).

Lee *et al.* (2004) reforçam a ideia de que períodos hidrológicos secos e úmidos possuem a capacidade de alterar significativamente as concentrações de poluentes orgânicos e inorgânicos durante a descarga de águas pluviais. De acordo com os autores, os poluentes inorgânicos apresentam origem principalmente geogênica, a partir do intemperismo das rochas, que pode ser acelerada pela ação antrópica.

Segundo Gunawardana *et al.* (2012), em locais onde há predomínio de climas secos, aumenta-se a criticidade do processo de geração de sedimentos. De acordo com estes autores, quando ocorrem chuvas torrenciais, o volume de sedimentos carregados para os corpos d'água é bastante elevado e aumenta consideravelmente a Turbidez destes mananciais. Mimura *et al.* (2016) reforçam a influência das características meteorológicas regionais, como pressão e umidade na geração de materiais particulados que podem vir a configurar um cenário de poluição de corpos hídricos. Nakada e Moruzzi (2014) demonstraram a proporcionalidade entre a quantidade de material particulado depositado nas superfícies em função dos períodos de estiagem.

Diversos fatores influenciam no transporte e na deposição de sedimentos finos durante o escoamento, podendo-se destacar as condições meteorológicas, o tipo de solo e rochas locais, a altitude e as condições de infiltração da água (FLUES, 2003). As características da superfície receptora dos sedimentos gerados naturalmente ou por influência antrópica, favorecem ou dificultam a aderência e mobilização de seus constituintes nos solos (MENDEZ *et al.*, 2011. De acordo com Torres *et al.* (2013), estes sedimentos podem ser carregados para regiões distantes do local onde foram gerados ou ser incorporados aos solos adjacentes. No caso de lançamento de efluentes residenciais e industriais em solos de maneira inapropriada, é possível que seus constituintes sejam lixiviados e incorporados ao solo ou carregados para corpos hídricos situados nas proximidades do local de lançamento (ZHANG *et al.*, 2014).

A Turbidez relaciona-se, segundo Rocha (2009), com o número de dias secos consecutivos, antecedentes ao evento pluviométrico, em detrimento do acúmulo de poluentes nas superfícies que receberão as chuvas, posteriores ao período de estiagem. De acordo com Von Sperling (2014), os sólidos totais dissolvidos (STD) nos recursos hídricos são constituídos por sais inorgânicos, matéria orgânica, micropoluentes orgânicos, entre outros contaminantes.

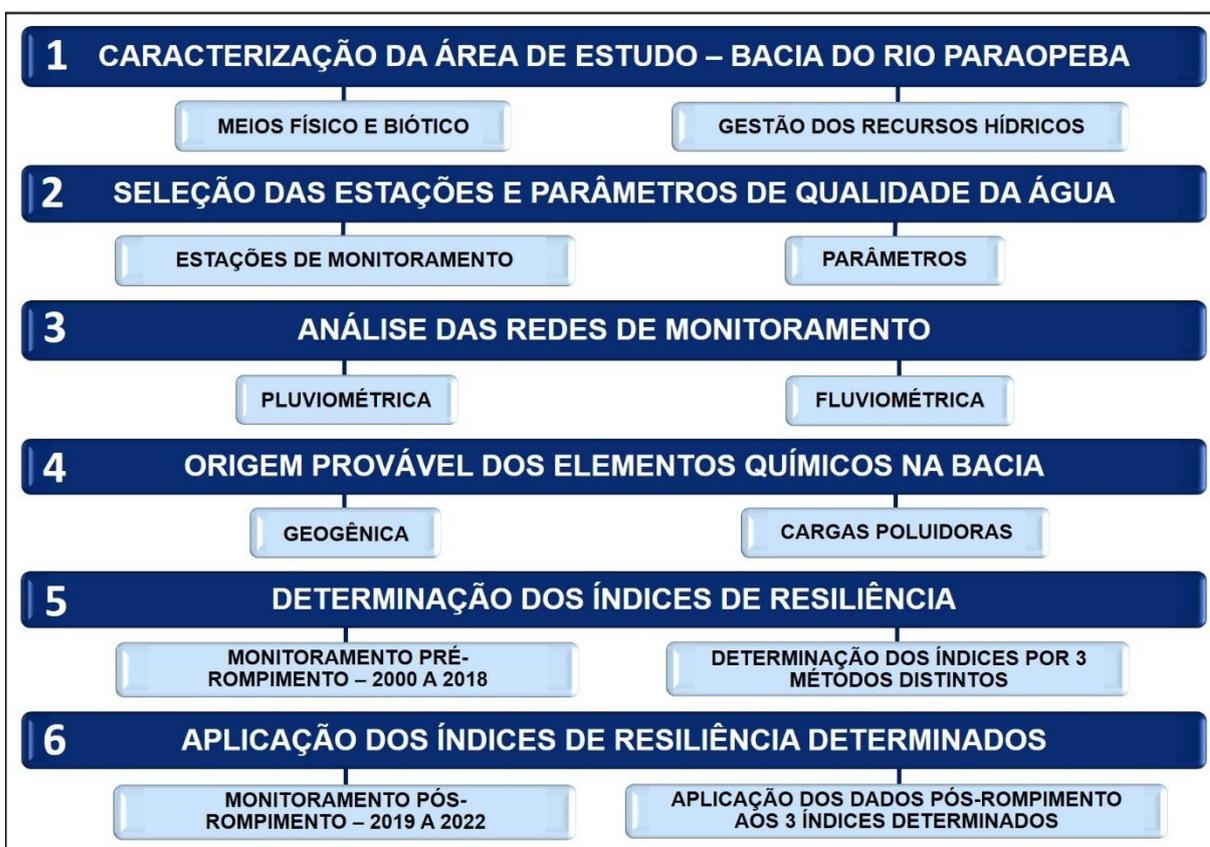
Estudos revelam que os níveis de poluentes em amostras de águas pluviais inviabilizam a sua utilização para fins diversos (NOVAK *et al.*, 2014; KUS *et al.*, 2010). A parcela inicial do volume de chuva escoado, denominada *first flush*, é caracterizada por apresentar a fração majoritária do material particulado em comparação ao volume posterior do escoamento, o que costumeiramente influencia na qualidade da água que escoar para os cursos d'água (GIKAS & TSIHRINTZIS, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho foi dividida em seis etapas principais (Figura 15), que foram trabalhadas no intuito de atingir o objetivo geral, que é a criação dos Índices de Resiliência dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba pós-rompimento B-I no município de Brumadinho, Minas Gerais.

A primeira etapa consistiu na caracterização da área de estudo, que corresponde à bacia hidrográfica do rio Paraopeba, onde ocorreu o rompimento da B-I. A segunda foi a seleção das estações de monitoramento e parâmetros de qualidade da água que foram avaliados. A terceira etapa abrangeu uma breve análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica na bacia objeto de estudo. Na quarta etapa foi realizada uma investigação sobre a provável origem dos elementos químicos na bacia. A quinta etapa abrangeu a análise da série histórica de monitoramento da qualidade da água pré-rompimento e a determinação dos Índices de Resiliência. A sexta etapa consistiu na aplicação dos dados de monitoramento pós-rompimento aos Índices de Resiliência propostos na etapa anterior.

Figura 15 – Metodologia de trabalho.



Fonte: Autor (2023).

4.1 Métodos utilizados para a caracterização da área de estudo

De acordo com a introdução e referencial teórico apresentados, a área selecionada para a realização do estudo foi a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, que abrange o local do rompimento da barragem, o ribeirão Ferro-Carvão e toda extensão do rio Paraopeba. Esta delimitação contempla a região a jusante do local de rompimento, que recebeu diretamente os rejeitos da mineradora e também a região a montante, dotada de forte influência nas vazões, áreas de recarga das águas superficiais e subterrâneas e no balanço hídrico da referida bacia.

4.1.1 Caracterização dos meios físico e biótico

A caracterização dos meios físico e biótico da área de estudo foi realizada com auxílio de mapas temáticos para a bacia do rio Paraopeba. Esta caracterização permitiu uma visão holística do cenário atual da bacia, possibilitando a compreensão das condições de resiliência dos recursos hídricos. Os mapas foram confeccionados a partir de bancos de dados da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), obtidos em seu sítio eletrônico (IDE-SISEMA, 2023).

A plataforma IDE-Sisema constitui uma ferramenta prevista pela Resolução SEMAD/FEAM/IEF/IGAM nº 3.147/2022 e tem por objetivo promover a organização dos processos de geração, armazenamento, acesso, compartilhamento, disseminação e uso dos dados geoespaciais oriundos das atividades, programas e projetos ambientais e de recursos hídricos desenvolvidos pelo Sisema. Trata-se de um modelo de gestão corporativa e compartilhada dos dados, padrões e tecnologias geoespaciais de seus órgãos componentes, tendo sido implementado pelo Comitê Gestor, composto por setores técnicos especializados da SEMAD, FEAM, IEF e IGAM.

Assim, a grande maioria das camadas necessárias para a elaboração dos mapas temáticos foi obtida a partir da plataforma IDE-Sisema, as quais foram trabalhadas, inicialmente, no software QGIS, versão 3.16 Hannover e posteriormente na versão 3.24.3 Tisler, lançada em 13 de maio de 2022. São apresentados, a seguir, os caminhos utilizados para obtenção das camadas que subsidiaram a confecção dos mapas.

Mapa de localização

A camada de contorno do Brasil foi obtida do Portal de Geotecnologias Forest GIS, sendo designada como Limites_v2017.zip (Forest GIS 2021). Esta camada não foi adquirida pela plataforma IDE-Sisema pelo fato desta se condicionar ao limite do Estado de Minas Gerais.

As demais camadas, a seguir, foram extraídas da plataforma IDE-Sisema.

- Limite de Minas Gerais;
- Limites > Municípios (IEDE-MG) > Municípios de Minas Gerais;
- Hidrografia > Bacia hidrográfica ottocodificada (ANA/IGAM) > Ottobacia do Rio São Francisco.

Mapa hidrográfico

Camadas extraídas da plataforma IDE-Sisema:

- Hidrografia > Hidrografia ottocodificada (ANA/IGAM) > Ottotrechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco;

Mapa geomorfológico

Camada extraída da plataforma IDE-Sisema:

- Relevo > Mapeamento geomorfológico em escala 1:250.000 (IBGE) > Mapeamento geomorfológico de Minas Gerais.

Mapa pedológico

Camada extraída da plataforma IDE-Sisema:

- Solos > Mapeamento de solos (FEAM & UFV) > Mapa de Solos de Minas Gerais.

Mapa climático

Foram trabalhados dados disponibilizados pelo Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF 2021), que lançou uma edição especial para o mapa de classificação climática de Köppen detalhado de todo o território brasileiro.

Mapa hidrogeológico

Camada extraída da plataforma IDE-Sisema:

- Geologia e Recursos Minerais > Domínios hidrogeológicos (CPRM) > Domínios hidrogeológicos.

Mapa geológico

Camadas extraídas da plataforma IDE-Sisema:

- Geologia e Recursos Minerais > Mapeamento geológico (CODEMIG/CPRM) > Mapeamento geológico;
- Geologia e Recursos Minerais > Estruturas (CPRM) > Estruturas.

Mapa de uso e cobertura da terra

Foram utilizados dados do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil – MapBiomass, que abrange uma rede colaborativa, formada por ONGs, universidades e startups de tecnologia, que revela as transformações do território brasileiro, por meio da ciência, tornando acessível o conhecimento sobre o uso do solo (MAPBIOMASS, 2020).

Mapa dos biomas

Camada extraída da plataforma IDE-Sisema:

- Vegetação > Biomas (IBGE) > Limite dos biomas - Mapa IBGE 2019.

4.1.2 Caracterização da gestão de recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é realizada com auxílio de cinco instrumentos delineados pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que preveem ações de planejamento, regulação, fiscalização e divulgação de informações referentes aos recursos hídricos. Estes instrumentos encontram-se inter-relacionados e, em alguns casos, a implementação de um deles está condicionada à implementação de outro. O primeiro instrumento previsto pela PNRH é o Plano de recursos hídricos, o segundo é o Enquadramento dos corpos d'água em classes segundo os usos preponderantes, o terceiro é a Outorga de direito de uso dos recursos hídricos, o quarto é a Cobrança pelo uso dos recursos hídricos e o quinto é o Sistema de informações sobre os recursos hídricos.

No presente trabalho foi apresentada uma visão geral sobre a implementação destes cinco instrumentos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, assim como o atual cenário, principalmente sobre o instrumento de outorga, possibilitando a compreensão da efetividade destes instrumentos na bacia. A seguir, apresenta-se a forma como cada um dos instrumentos foram abordados no presente trabalho.

Plano de recursos hídricos

Foi elaborada uma breve descrição da importância deste instrumento de gestão dos recursos hídricos e foram caracterizadas as principais etapas da implementação do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (PDRH Paraopeba), com base em seu Resumo Executivo, disponível em COBRAPE (2020).

Enquadramento dos corpos d'água em classes segundo os usos preponderantes

Inicialmente foi dado um panorama geral deste instrumento, com base no Decreto nº 41.578/2001. Em seguida foi elaborado o mapa de enquadramento da bacia, a partir de dados

disponíveis na plataforma IDE-Sisema. A camada extraída da plataforma IDE-Sisema foi a seguinte:

- Restrição Ambiental > Enquadramentos de Corpos D'água (IGAM) > Enquadramentos da circunscrição hidrográfica do Rio Paraopeba.

Outorga de direito de uso dos recursos hídricos e usos insignificantes

Apesar da plataforma IDE-Sisema possuir dados de outorgas e usos insignificantes em seus bancos de dados, em função dos dados não serem constantemente atualizados, optou-se por trabalhar com a planilha bruta de outorgas disponibilizada pela Diretoria de Planejamento e Regulação (DPLR) do IGAM. Esta planilha apresenta dados de outorgas até 24 de janeiro de 2023 e foi devidamente consistida, buscando-se preencher as falhas a partir de consultas realizadas diretamente no sítio eletrônico do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM).

A partir dos dados da planilha supracitada foram confeccionados mapas de espacialização das outorgas e usos insignificantes superficiais e subterrâneos na bacia, além da elaboração de gráficos e planilhas pertinentes às discussões acerca da aplicação deste instrumento de gestão na bacia do rio Paraopeba.

Cobrança pelo uso dos recursos hídricos

Foi elaborada uma descrição deste instrumento com uma visão geral de sua importância, junto aos demais instrumentos de gestão de recursos hídricos, sendo contextualizada sua aprovação e implementação na bacia do rio Paraopeba.

Sistema de informações sobre os recursos hídricos

Um panorama geral sobre este instrumento na bacia do rio Paraopeba foi elaborado, bem como as diretrizes propostas a partir do PDRH Paraopeba para aperfeiçoamento deste instrumento na bacia.

4.2 Seleção das estações de monitoramento e dos parâmetros de qualidade da água

Esta etapa consistiu em verificar quais os dados de entrada que trariam os melhores resultados ao estudo proposto. Foram avaliadas as estações de monitoramento existentes na área da bacia e os parâmetros de qualidade da água mais susceptíveis à variação diante do rompimento da barragem, no intuito de identificar os Valores de Referência (VR) que compuseram os Índices de Resiliência.

Definição das estações de monitoramento para compor o estudo

Desde 26 de janeiro de 2019, o Plano de Monitoramento Emergencial utiliza 15 estações para medição de diversos parâmetros de qualidade das águas do rio Paraopeba, sendo todas alocadas no curso do rio Paraopeba. Uma delas encontra-se a montante do ponto de confluência entre o ribeirão Ferro-Carvão e o rio Paraopeba e as demais estão situadas a jusante deste ponto de confluência.

A escolha das estações utilizadas no presente estudo se deu a partir da verificação das estações existentes anteriormente ao rompimento, a partir das quais foram analisados os dados da série histórica de monitoramento da qualidade das águas do rio Paraopeba e elaborados os três índices de resiliência.

Definição dos parâmetros para compor os Índices de Resiliência

O monitoramento da qualidade das águas do rio Paraopeba é realizado desde 1997 e conta com mais de 50 parâmetros. Após o rompimento da barragem de Brumadinho, o Sisema publicou uma série de cadernos e informativos especiais sobre o monitoramento das águas do rio Paraopeba.

Em 2019, o IGAM (2019a) trouxe uma avaliação da série histórica de monitoramento da qualidade das águas entre os anos de 2000 e 2018. Este informativo evidenciou 14 parâmetros de maior interesse de monitoramento diante do acidente ocorrido na Mina Córrego do Feijão. Dentre estes 14 parâmetros foram identificados aqueles com suficiência de dados referentes ao monitoramento pós-rompimento, para que os dados deste monitoramento fossem aplicados aos índices de Resiliência determinados no presente trabalho.

A FEAM publicou entre julho de 2019 e dezembro de 2022 um total de 43 boletins informativos aos cidadãos (FEAM, 2023b), para manter a interface com a população a respeito do monitoramento realizado. Nestes boletins constam os valores obtidos pós-rompimento para os parâmetros que compõem este estudo, os quais foram aplicados aos índices de Resiliência determinados, de acordo com a metodologia proposta neste trabalho.

4.3 Análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica

A terceira etapa consistiu na análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica, a partir de dados secundários obtidos do Resumo Executivo do PDRH do Paraopeba, publicado no ano de 2020 (COBRAPE, 2020); pelo estudo realizado pela Arcadis (2022); e por consultas ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb), vinculado ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2023).

Sabendo-se que a rede pluviométrica é responsável por monitorar as informações de chuva em milímetros (mm), foi considerado, neste estudo, a caracterização pluviométrica da bacia apresentada por COBRAPE (2020). A caracterização foi realizada com ênfase nas precipitações médias mensais, as quais forneceram subsídios para a determinação dos Índices de Resiliência.

4.4 Origem provável dos elementos químicos que compõem os Índices de Resiliência

Na quarta etapa (Figura 15) foi realizada uma abordagem acerca da origem provável de alguns elementos químicos identificados nas águas do rio Paraopeba, destacando-se as possíveis contribuições geogênicas e antrópicas para a ocorrência destes elementos.

Origem geogênica

A provável origem geogênica foi apresentada a partir da análise do mapa geológico confeccionado, buscando-se analisar as unidades geológicas presentes na bacia, suas principais rochas, os principais minerais constituintes destas rochas e a fórmula química destes minerais.

Origem associada a ações antrópicas

Esta associação dos elementos químicos às ações antrópicas foi realizada tomando-se por base três parâmetros distintos:

- I) análise do mapa de uso e cobertura da terra elaborado;
- II) análise das outorgas e usos insignificantes na bacia, os quais permitiram entender parte da demanda pelo uso dos recursos hídricos na bacia, permitindo identificar-se atividades com potencial de geração de cargas poluidoras e/ou sedimentos;
- III) análise das cargas poluidoras declaradas pelos usuários junto ao IGAM a partir da Declaração de Carga Poluidora (DCP);
- IV) análise da disposição de resíduos sólidos na bacia do rio Paraopeba, a partir dos dados disponibilizados por FEAM (2018).

4.5 Determinação dos Índices de Resiliência

Nesta etapa foram elaborados três Índices de Resiliência, pelo autor deste trabalho, utilizando-se dados de qualidade das águas superficiais, obtidos a partir das estações de monitoramento do IGAM, instaladas no curso do rio Paraopeba, anteriores ao rompimento. Foram considerados dados da série histórica de monitoramento da qualidade da água entre os anos de 2000 a 2018, disponibilizada pelo IGAM (2019a).

Análise da série histórica de monitoramento da qualidade da água do rio Paraopeba

Os valores tomados como referência do estado da qualidade das águas do rio Paraopeba pré-rompimento foram obtidos a partir do Anexo I, onde constam valores extraídos do “Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na B-I no complexo da Mina Córrego do Feijão da Mineradora Vale S.A. no município de Brumadinho Minas Gerais” (IGAM, 2019a). O Anexo I apresenta diversos parâmetros avaliados estatisticamente, incluindo o número de amostras válidas (N), mediana, valores mínimos, médios e máximos, desvio padrão e percentis 10, 25, 75 e 90.

Os valores anteriores ao rompimento foram comparados aos limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022, no intuito de identificar as extrapolações anteriores ao rompimento da B-I. Para a elaboração dos Índices de Resiliência dos recursos hídricos nas áreas atingidas pelo rompimento da B-I em Brumadinho, foram utilizados três métodos (os quais serão descritos a seguir), sendo que os valores mínimos e máximos foram considerados para o Método 1, valores médios para o Método 2, e mínimos, médios e máximos para o Método 3.

Determinação dos Índices de Resiliência

Existem diversas maneiras de trabalhar com parâmetros de qualidade das águas, sejam físicos, químicos ou bióticos, com vistas à obtenção de valores de referência para determinada região, em um período específico de tempo. A escolha de uma medida depende da possibilidade de calculá-la, da facilidade com que é calculada e de sua adequação ao processo em que for utilizada, de maneira que seja possível obter resultados com uma confiança estatística definida. Um índice ou indicador deve ser capaz, portanto, de mensurar, satisfatoriamente, os elementos de interesse, com base em variáveis que permitam a obtenção de resultados fidedignos à realidade ou o mais próximo possível dela (VAITSMAN *et al.* 2003).

O conceito de resiliência aplicado aos recursos hídricos das áreas atingidas pelos rejeitos da B-I no ribeirão Ferro-Carvão e no rio Paraopeba convergem para o estabelecimento dos padrões de qualidade da água anteriores ao rompimento. As perturbações e perda de qualidade da água às quais o ribeirão Ferro-Carvão e o rio Paraopeba foram submetidos, caracterizam um ambiente aberto, exposto a uma série de fatores naturais e de influência antrópica. Levando-se em consideração os sete parâmetros escolhidos para compor os Índices de Resiliência, observou-se que estes oscilam no decorrer dos anos e variam entre as estações de monitoramento de qualidade da água. Neste contexto, foram propostos três métodos de determinação dos Índices de Resiliência, com vistas à máxima aproximação das condições anteriores ao rompimento:

Método 1

O Índice de Resiliência elaborado pelo Método 1 (IR1), levou em consideração o intervalo entre a média dos valores mínimos e a média dos valores máximos para as oito estações objeto de estudo, no período de 2000 a 2018. A proposição deste método é que sejam considerados resilientes os valores, pós-rompimento, que se encontrem dentro deste intervalo. Entre os três métodos propostos, este corresponde ao de menor restrição à resiliência, sendo o menos criterioso.

Método 2

O Índice de Resiliência elaborado pelo Método 2 (IR2), por sua vez, tomou por base a média entre os valores médios encontradas em cada uma das estações avaliadas neste estudo, referentes à série histórica de 2000 a 2018. De acordo com este método são considerados resilientes os valores, pós-rompimento, inferiores ou iguais a estas médias para cada parâmetro. Entre os três métodos propostos, este corresponde ao de maior restrição à resiliência e exige melhorias significativas nos valores pós-rompimento.

Método 3

O Índice de Resiliência elaborado pelo Método 3 (IR3), por outro lado, tomou por base as precipitações médias mensais para a bacia do rio Paraopeba, os valores mínimos e máximos obtidos pelo Método 1 e os valores médios obtidos pelo Método 2. Foram apresentadas, na seção de Resultados e Discussões, equações formuladas pelo autor deste trabalho, obtidas a partir do método conhecido como Modelagem Matemática. De acordo com Niss e Blum (2020), a Modelagem Matemática se refere à obtenção de uma solução para um problema identificado em uma situação da realidade. Segundo estes autores, os modelos matemáticos podem corresponder a equações, cujas variáveis se encontram no domínio da realidade, a partir das quais são utilizados elementos do domínio da Matemática para solução de problemas diversos (NISS e BLUM, 2020).

A aplicação da Modelagem Matemática para elaboração das equações propostas no Método 3 levou em consideração a obtenção de valores mais próximos às reais condições físico-químicas de qualidade da água na área de estudo anteriormente ao rompimento. Estas expressões foram elaboradas no intuito de conferir menor restrição aos valores considerados resilientes para os meses do período chuvoso e maior restrição para os meses do período seco. Esta proposição leva em consideração a maior variabilidade dos parâmetros analisados durante o período chuvoso, no qual os valores se tornam naturalmente mais elevados. A elaboração do

Coeficiente de Precipitação (CP) foi feita utilizando-se a Modelagem Matemática, tomando-se como premissas a atribuição dos valores máximos de resiliência ao mês de maior índice pluviométrico, valores próximos à média para os meses de menor índice pluviométrico e valores intermediários aos demais meses, seguindo-se uma proporcionalidade entre resiliência e precipitação. O CP foi incorporado às equações para calibrar e ajustar os valores de acordo com as premissas supracitadas.

4.6 Aplicação dos Índices de Resiliência

Os dados pós-rompimento foram avaliados a partir das informações sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba disponibilizadas após o rompimento, em especial a partir do Plano de Monitoramento Emergencial Rio Paraopeba - Rompimento Barragem Córrego Feijão em Brumadinho (IGAM, 2019b) e dos Boletins Informativos do Cidadão, 1ª a 43ª edição, disponibilizados pela FEAM (2023b). Nesta etapa, os valores pós-rompimento foram analisados e aplicados, de modo a se estabelecer a resiliência mensal e anual dos parâmetros avaliados, de acordo com os três Índices elaborados, para os anos de 2019 a 2022.

Monitoramento pós-rompimento

O Plano de Monitoramento Emergencial da qualidade das águas do rio Paraopeba pós-rompimento da B-I, gerido pelo IGAM, teve início um dia após o desastre, em 26/01/19. A partir das análises iniciais foi possível identificar os parâmetros que, de fato, possuem relação com o rompimento da B-I, os quais foram monitorados nos dias posteriores. A periodicidade do monitoramento variou em função dos parâmetros analisados, tendo sido caracterizada por análises diárias, semanais e mensais, de acordo com a demanda necessária.

Dentre os parâmetros analisados pelo IGAM (2019b), podem-se destacar: pH, condutividade elétrica, Oxigênio dissolvido, Turbidez, cor verdadeira, demanda bioquímica de oxigênio, óleos e graxas, sólidos em suspensão totais, sólidos dissolvidos totais, sólidos totais, Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Ferro total, Manganês total, Arsênio total, Cádmio total, Chumbo total, Cobre dissolvido, Cromo total, Mercúrio total, Níquel total, Zinco total, Boro total, Vanádio total, Bário total, cianeto livre e fenóis totais.

Assim, neste trabalho, analisou-se a variação de alguns destes parâmetros após o rompimento, para que fosse determinado o tempo de depuração dos recursos hídricos, que vem sendo acelerado pela ação antrópica, devido a adoção de técnicas para contenção e remoção dos rejeitos da B-I da área atingida.

Foram considerados também, para a análise pós-rompimento, informações obtidas a partir dos primeiros 43 Boletins Informativos do Cidadão (FEAM, 2023b), os quais trazem informações mensais sobre monitoramento, com valores da concentração dos principais elementos químicos e também a variação da Turbidez. Estes dados foram essenciais para a elaboração das tabelas confeccionadas, que retratam a qualidade das águas pós-rompimento e as extrapolações mensais aos três Índices de Resiliência. Foram considerados como extrapolações, os valores superiores aos limites estabelecidos pelos índices elaborados.

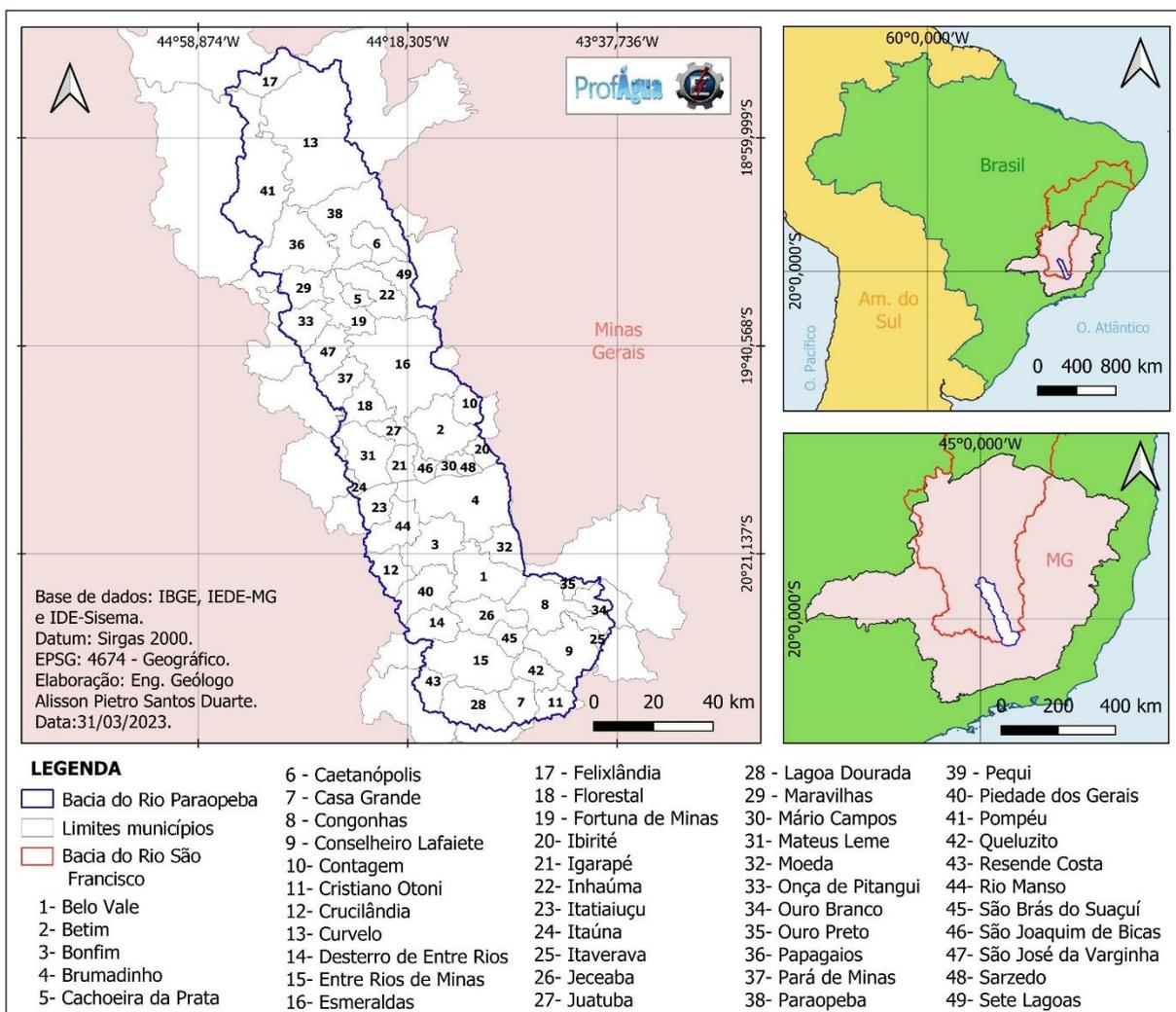
Após determinação dos três Índices de Resiliência, os valores obtidos pós-rompimento, para o período compreendido entre janeiro de 2019 a dezembro de 2022, foram aplicados a cada um dos Índices de Resiliência. A comparação dos valores dos Índices de Resiliência e dos valores pós-rompimento possibilitou a identificação dos parâmetros que extrapolaram os valores necessários para que fosse considerada a resiliência em cada mês. Por fim, foram considerados resilientes, para cada um dos métodos propostos, somente os parâmetros que não extrapolaram os limites dos Índices de resiliência durante todo o ano de 2022.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Paraopeba está situada no Alto São Francisco e representa 2,3% da área do Estado de Minas Gerais, possuindo aproximadamente 13.642 km² de área de drenagem (PEREIRA, 2004).

O principal rio da bacia é o Paraopeba, que nasce no município de Cristiano Ottoni, com foz entre os municípios de Felixlândia e Pompéu, onde deságua na represa de Três Marias. A bacia é composta por 49 municípios (Figura 16), dos quais 35 possuem suas sedes municipais dentro da Bacia, 22 estão localizados parcialmente na mesma e 14 fazem parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (FEAM, 2011).

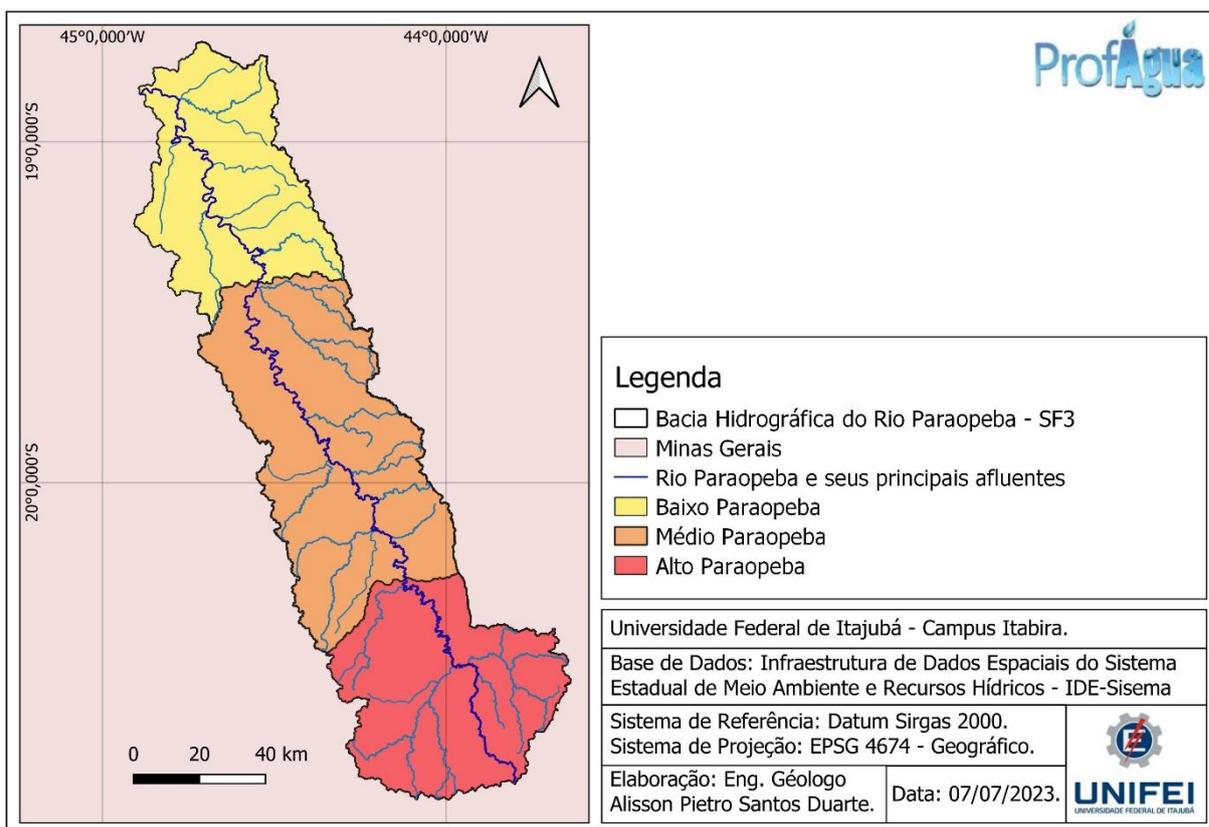
Figura 16 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no Estado de Minas Gerais, e seus municípios.



Fonte: Autor (2023).

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba subdivide-se ainda em Alto, Médio e Baixo Paraopeba, de acordo com COBRAPE (2020), conforme indicado na Figura 17. Esta subdivisão subsidiou algumas análises dos mapas de caracterização da área de estudo, com vistas à compreensão da espacialização de algumas classes presentes nos mapas confeccionados.

Figura 17 – Subdivisões da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



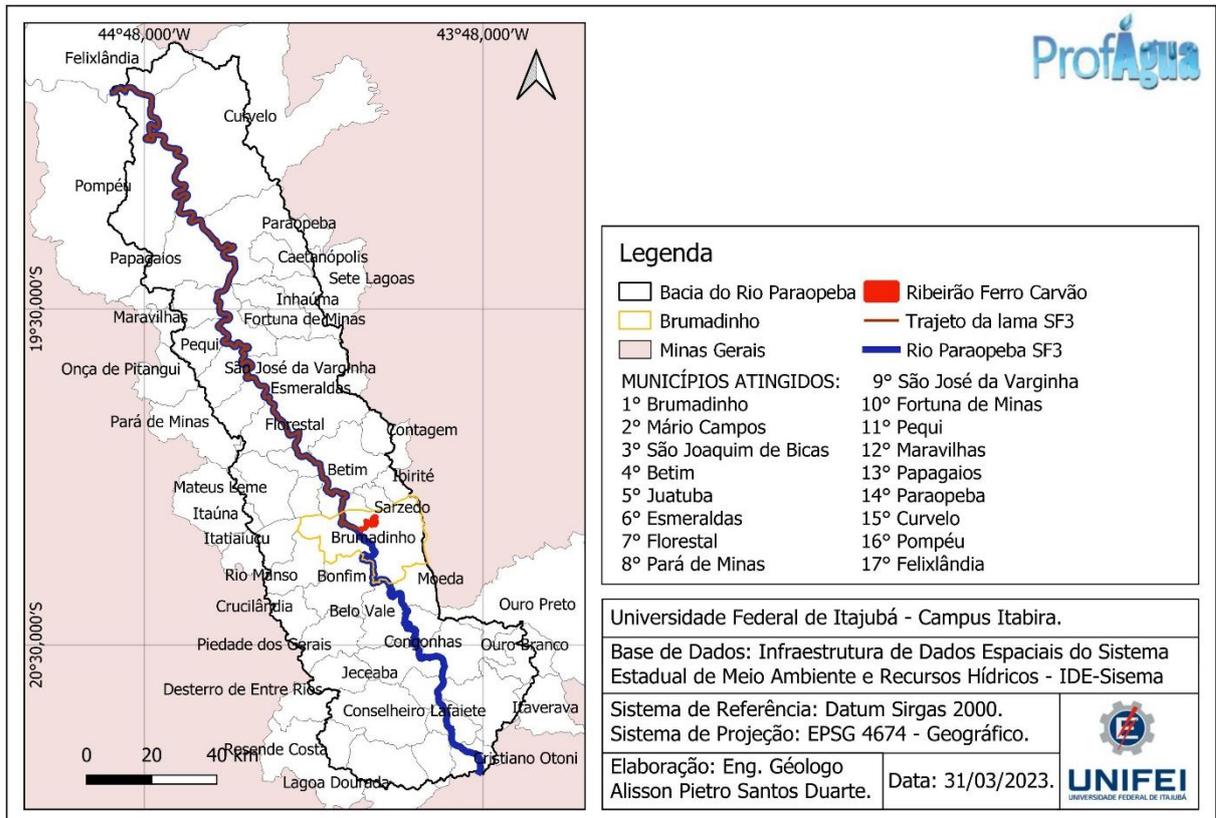
Fonte: Autor (2023).

5.1 Municípios atingidos pela lama

O rompimento da Barragem I ocorreu no município de Brumadinho, delimitado na Figura 18 pela coloração amarela. Cerca de 2 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro percorreram o ribeirão Ferro-Carvão até atingirem o rio Paraopeba, ao passo que 7,8 milhões de metros cúbicos de rejeitos ficaram alocados no referido ribeirão.

Em seu trajeto pelo rio Paraopeba, os rejeitos atingiram, respectivamente, os municípios de Brumadinho, Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Betim, Juatuba, Esmeraldas, Florestal, Pará de Minas, São José da Varginha, Fortuna de Minas, Pequi, Maravilhas, Papagaios, Paraopeba, Curvelo e Pompéu (Figura 18).

Figura 18 – Trajeto percorrido pelos rejeitos da Barragem I, da Mina Córrego do Feijão, e municípios atingidos, em ordem cronológica do avanço da lama.



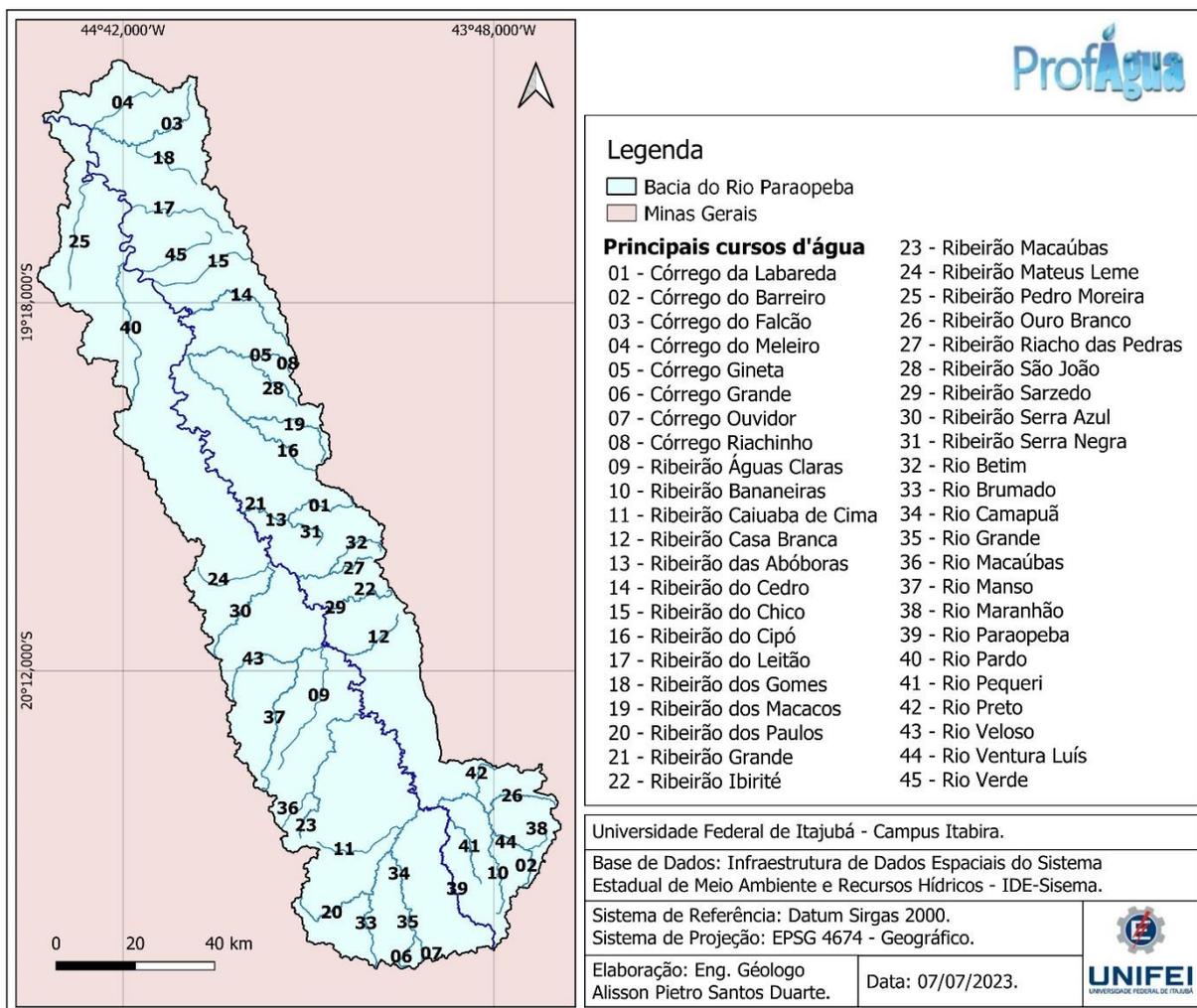
Fonte: Autor (2023).

5.2 Hidrografia

O rio Paraopeba constitui o principal rio da bacia, com aproximadamente 510 km de comprimento e corresponde a um dos maiores tributários do rio São Francisco (ALVES, 2007). A amplitude topográfica da bacia abrange o intervalo de cotas entre 572 a 1572 metros, de acordo com informações obtidas junto aos metadados da plataforma IDE-Sisema. Os principais afluentes do Paraopeba são o 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 na margem esquerda (IGAM, 2013).

A Figura 19 mostra os principais cursos d'água que compõem a bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Vale ressaltar que as águas do rio Paraopeba foram enquadradas, de acordo com os usos preponderantes, como classe 2 em todo o trecho diretamente atingido e como classe 1 em um trecho a montante, o qual não foi diretamente atingido pelos rejeitos da mineradora.

Figura 19 – Hidrografia principal da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



Fonte: Autor (2023).

5.3 Biomas

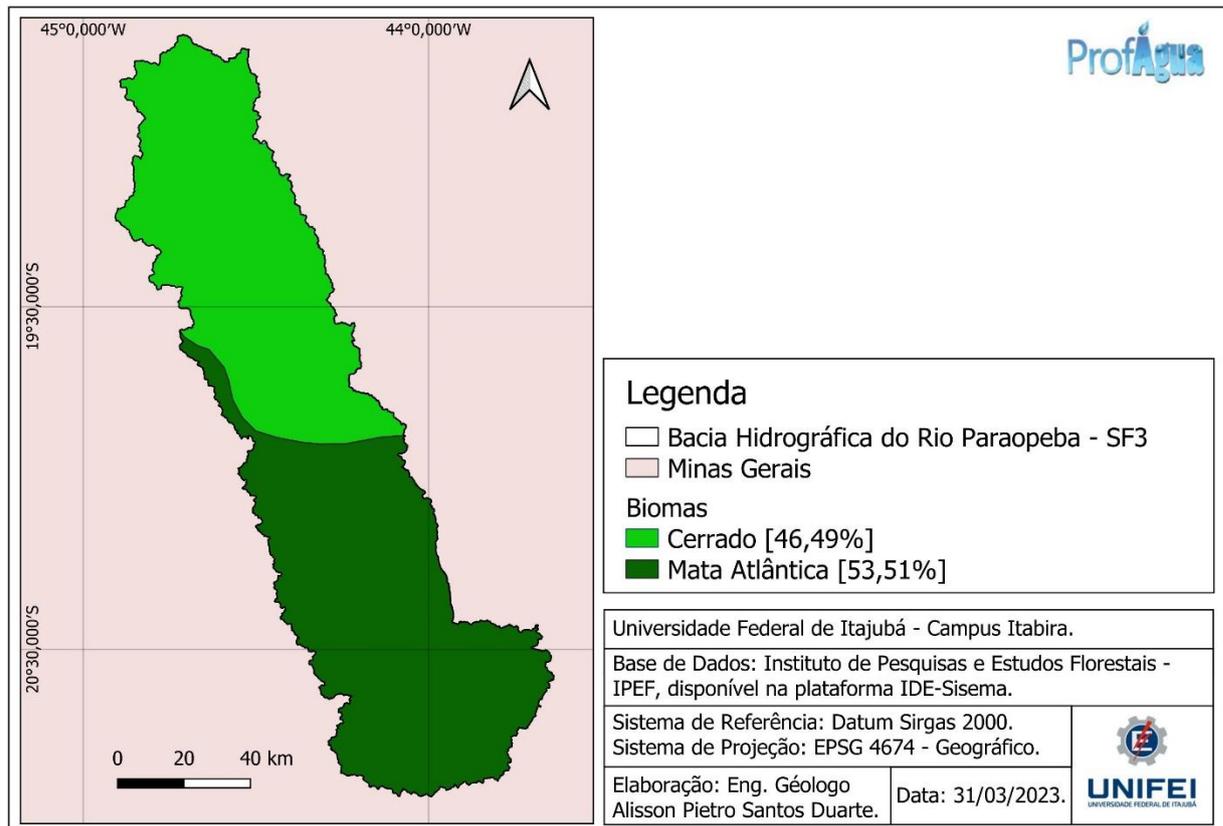
A bacia hidrográfica do rio Paraopeba encontra-se na área de transição dos Biomas Cerrado e Mata Atlântica; no entanto, o bioma predominante é a Mata Atlântica, que corresponde a 53,51% da superfície total da bacia (Figura 20). A região do Alto Paraopeba caracteriza-se pelo domínio total do bioma Mata Atlântica, o Médio Paraopeba exhibe a transição entre Mata Atlântica e Cerrado, enquanto o Baixo Paraopeba é caracterizado pela presença apenas do bioma Cerrado (Figura 20).

O Cerrado é característico de regiões de clima semiúmido, formado pela presença marcante de árvores com galhos tortuosos e de pequeno porte, cascas grossas e raízes profundas. Constata-se nesse bioma a presença de gramíneas e vegetação espaçada (Pilon *et al.*, 2017).

A Mata Atlântica é formada por um conjunto de formações florestais e ecossistemas associados, como as restingas, manguezais e campos de altitude (Tabarelli e Mantovani 1999). As principais características desse bioma são: árvores de médio e grande porte, formando uma

floresta fechada e densa; a grande biodiversidade, com presença de diversas espécies animais e vegetais; árvores de grande porte responsáveis pela formação de um microclima na mata, e uma fauna rica, composta por diversas espécies de mamíferos, anfíbios, aves, insetos, peixes e répteis (Tabarelli *et al.*, 2005).

Figura 20 – Principais biomas encontrados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



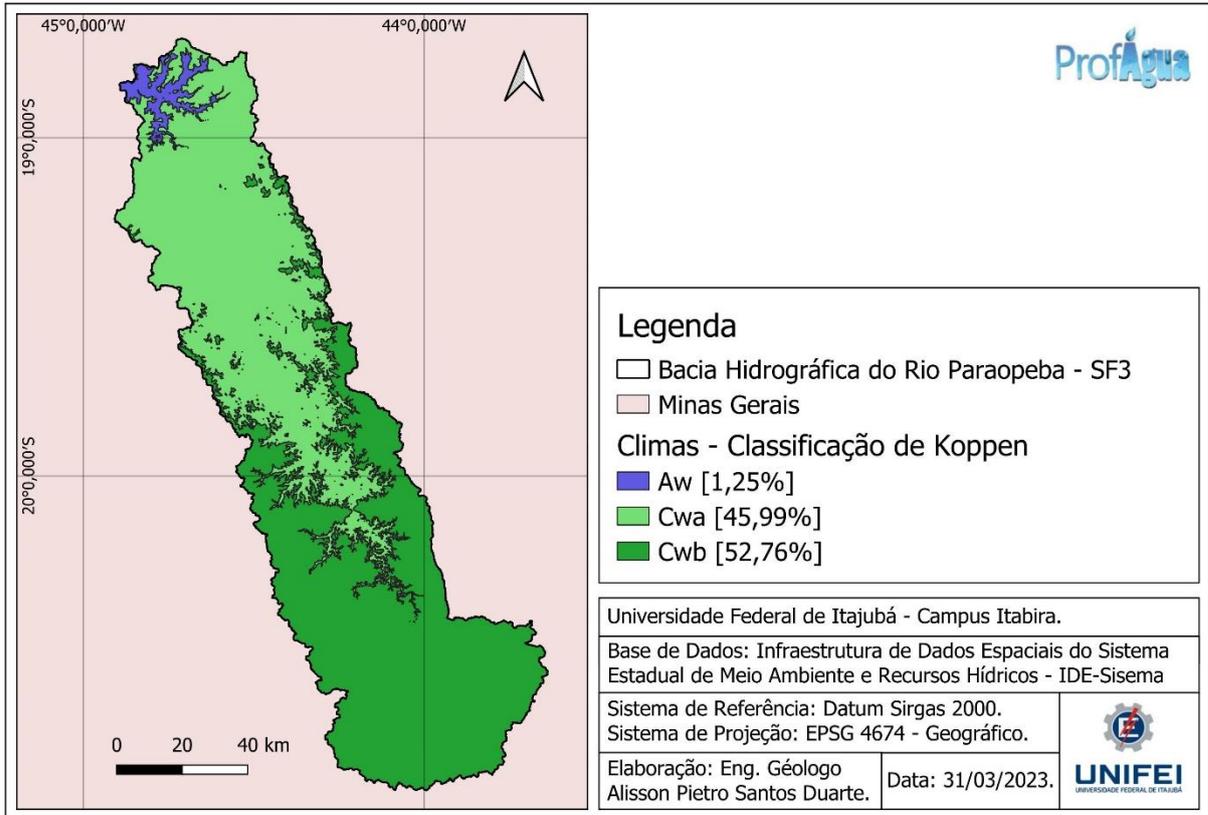
Fonte: Autor (2023).

5.4 Climas

A área de estudo encontra-se em três subtipos climáticos, conforme a classificação de Köppen: Aw, Cwa e Cwb (Figura 21). Alvares *et al.* (2013) descreveram os climas Cwa e Cwb na bacia, ambos correspondendo ao clima temperado úmido com inverno seco, porém diferenciados quanto ao verão quente e temperado, respectivamente. Próximo à foz encontra-se a área de domínio do clima Aw, identificada com as maiores temperaturas, acima de 18° C durante todo ano.

Na porção central da Bacia a temperatura média fica entre 15° e 18° C, sendo então denominada de zona subquente. Tais áreas corresponderiam, aproximadamente, às regiões de clima Cwa, segundo Köppen; na região das nascentes a temperatura média fica entre 10° e 15° C, sendo classificada, portanto, como zona mesotérmica branda e coincidente com o subtipo Cwb (COBRAPE, 2020).

Figura 21 – Principais climas descritos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, de acordo com a classificação climática de Köppen.



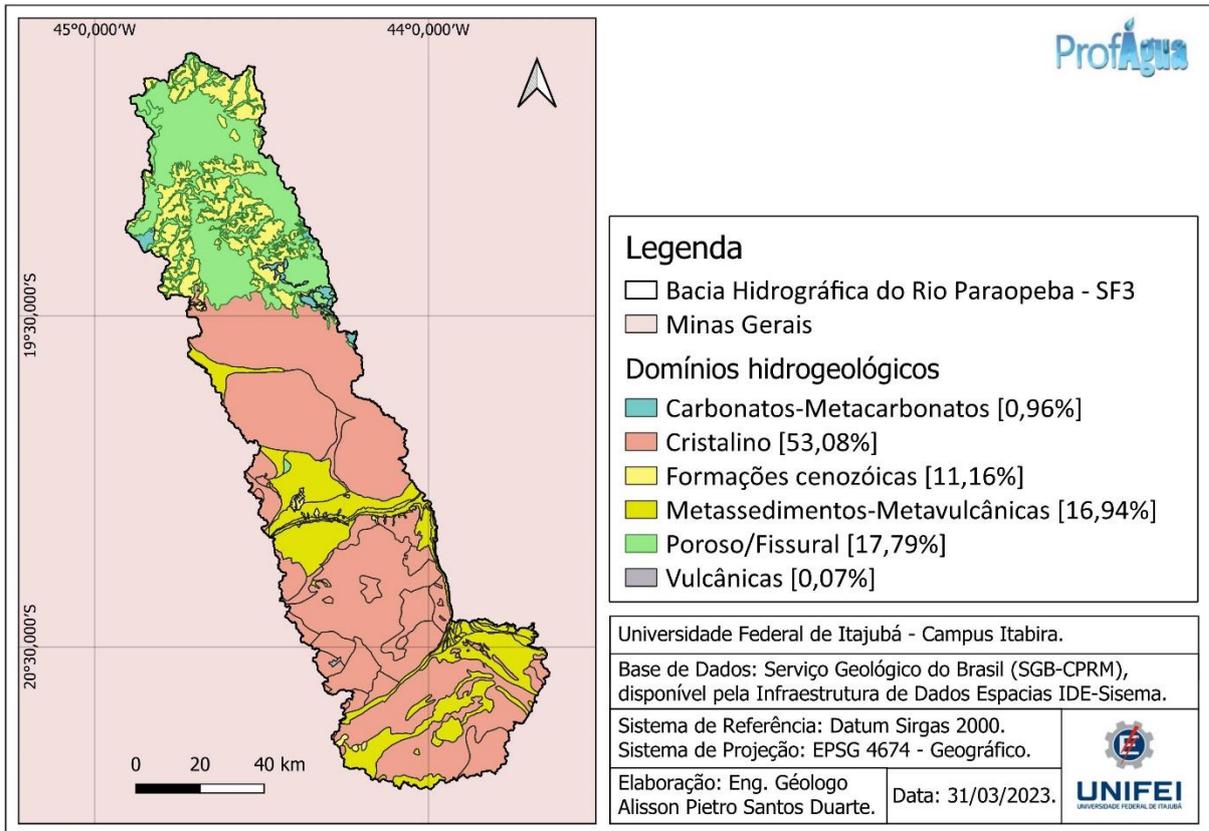
Fonte: Autor (2023).

5.5 Domínios Hidrogeológicos

A hidrogeologia local abrange seis domínios hidrogeológicos, sendo eles: Sistema Aquífero Embasamento Cristalino; Sistema Aquífero Poroso/Fissural; Sistema Aquífero Cárstico (carbonatos/Metacarbonatos); Sistema Aquífero Formações Cenozóicas; Sistema Aquífero Metassedimentos/metavulcânicas; Sistema Aquífero Vulcânicas (Figura 22).

Em termos da disponibilidade hídrica subterrânea dos sistemas aquíferos, deve-se abordar a estimativa da parcela da chuva que se infiltra no solo, denominada RPD (Recarga Potencial Direta), e sua parcela que pode ser utilizada de forma a não interferir nas vazões mínimas ecológicas e de referência para outorga, denominada como RPE (Reserva Potencial Explotável) (CRPM, 2018).

Figura 22 – Principais domínios hidrogeológicos encontrados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



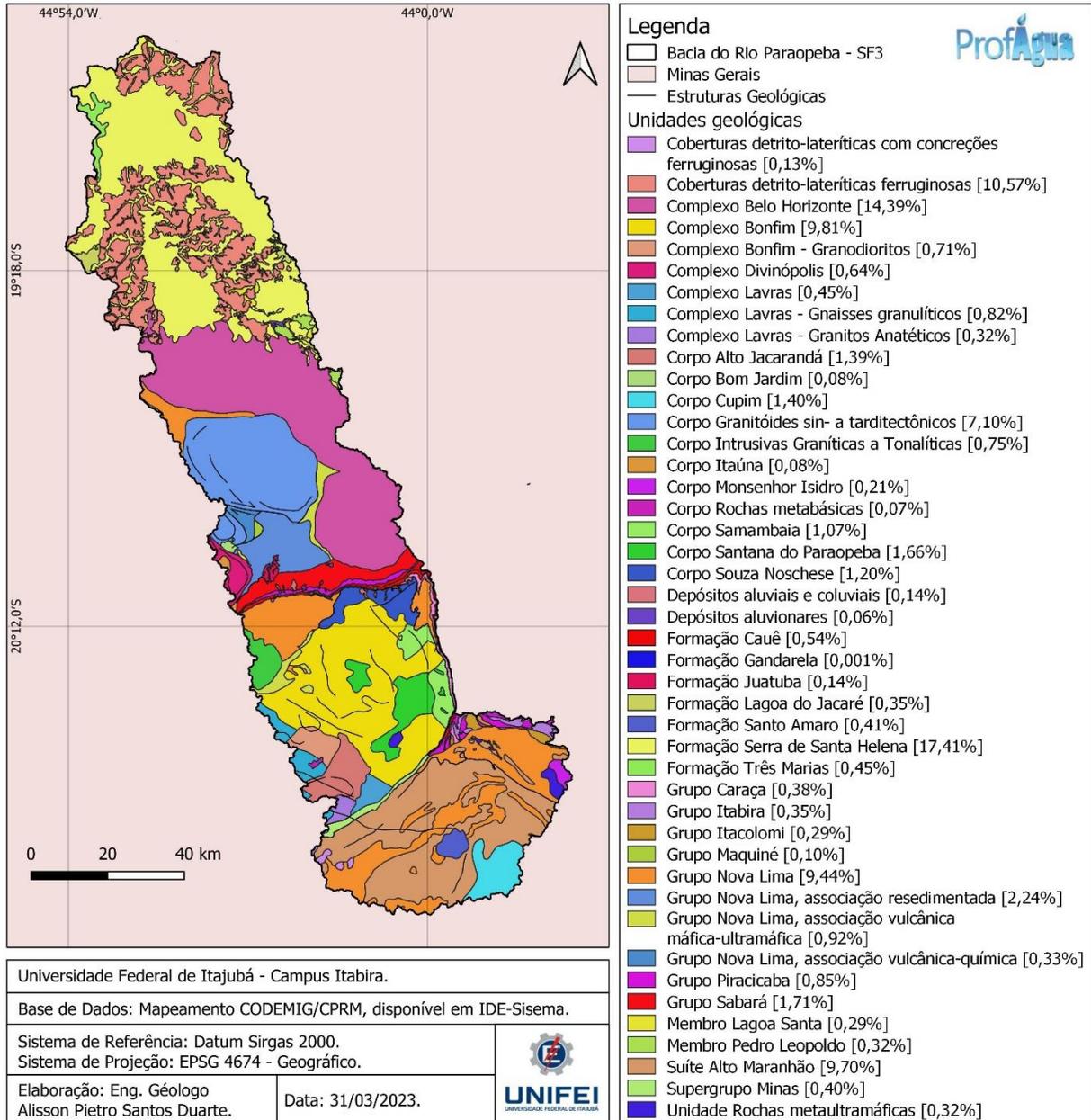
Fonte: Autor (2023).

5.6 Unidades Geológicas

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba encontra-se inserida, segundo Carvalho (2014) na porção meridional do Cráton do São Francisco. Suas unidades geológicas aflorantes são compostas por diferentes litologias, as quais se associam a três principais compartimentações geológicas: Embasamento Cristalino, Quadrilátero Ferrífero e Bacia Intracratônica do São Francisco – Grupo Bambuí (CODEMIG, 2019).

Foram identificadas 44 unidades geológicas na área de estudo (Figura 23), as quais serão analisadas no intuito de identificar quais as principais rochas aflorantes, por sua responsáveis pela geração de sedimentos e evolução dos solos a partir dos agentes do intemperismo e dos processos pedogenéticos. Os elementos deste mapa serão abordados com maior riqueza de detalhes, incluindo os locais de ocorrência de cada unidade geológica, no capítulo de Resultados e Discussões, onde será apresentada e discutida a origem geogênica dos elementos químicos ocorrentes na área de estudo.

Figura 23 – Principais unidades geológicas e estruturas identificadas na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



Fonte: Autor (2023).

Este estudo será acrescido da análise da composição mineralógica destas rochas, seguida pela identificação da composição química dos minerais constituintes (pela fórmula química indicada na literatura), para que se possa estabelecer a influência da geologia local da bacia na composição química de suas águas.

Alguns elementos químicos como o manganês e o alumínio registraram concentrações superiores ao limite estabelecido pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022, de acordo com as séries históricas de monitoramento da qualidade das águas realizado pelo IGAM. Estas concentrações podem ter influência tanto da geologia local, quanto pela ação antrópica na bacia.

5.7 Solos

Os tipos de solo foram mapeados e os resultados encontram-se na Figura 24, a partir da qual pode-se identificar a porcentagem individual de cada tipo de solo, de acordo com a simbologia recebida, e também a soma das porcentagens entre os solos com gênese e classificação similar. A gênese dos solos evidenciados na área de estudo está associada às unidades geológicas (Figura 23) que compõem a região da bacia hidrográfica, a partir das quais ocorrem os processos pedogenéticos que dão origem aos solos.

A elevada concentração de alumínio nos Latossolos pode ser tóxica para determinadas espécies de plantas na agricultura (EMBRAPA, 2004; IBGE, 2017). Os Cambissolos são solos mal a moderadamente drenados, poucos profundos com materiais na fração granulométrica cascalho, que dificultam a agricultura, somado à baixa fertilidade e a ocorrência de relevos mais acidentados (IBGE, 2017). Outra classe de ocorrência expressiva são os Argissolos, caracterizados, de acordo com IBGE (2017), por solos profundos a pouco profundos, bem a moderadamente drenados.

Algumas explicações se fazem necessárias para compreender-se a simbologia e classificações atribuídas aos solos encontrados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba. O caráter eutrófico dos solos representa a alta saturação em bases, sendo esta superior a 50%, enquanto o caráter distrófico caracteriza a baixa saturação em bases, inferior a 50%. A simbologia Tb, por sua vez, faz alusão às argilas de baixa atividade e mobilidade (EMBRAPA, 2018).

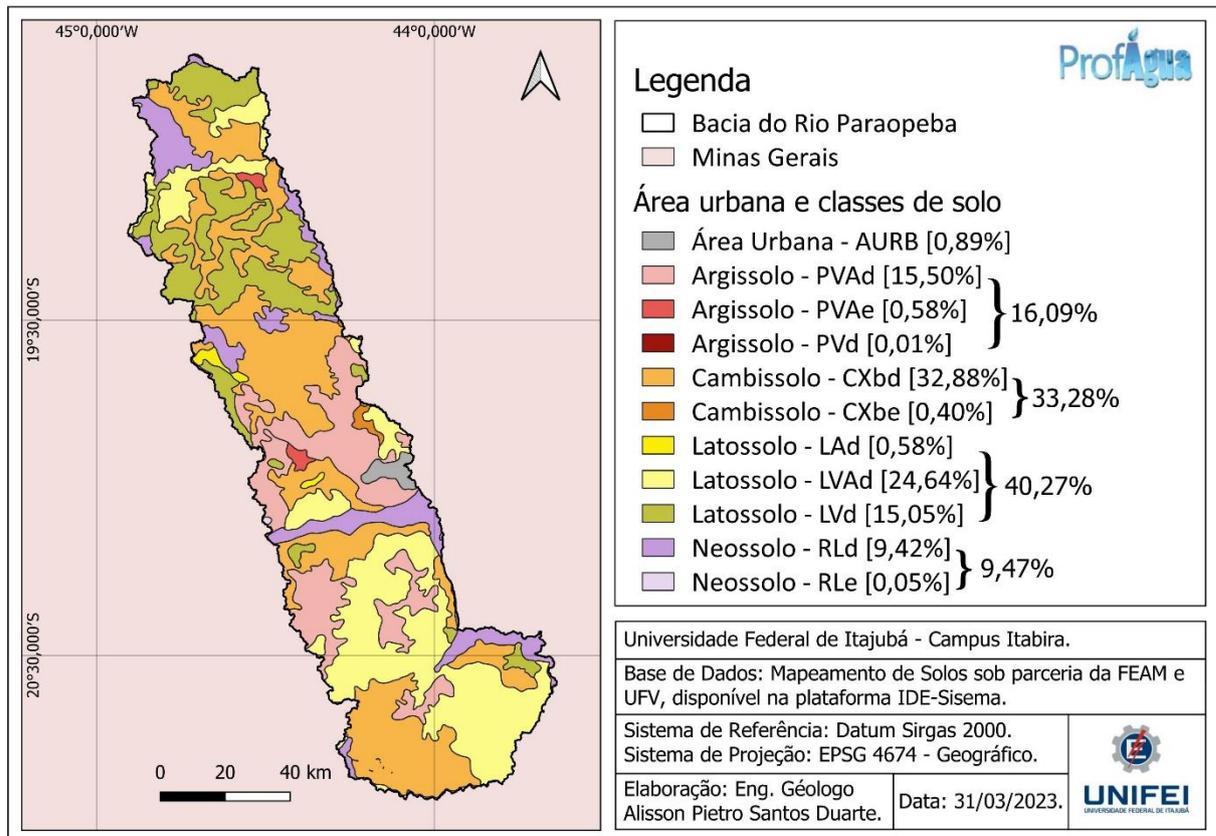
A classificação dos solos, de acordo com Embrapa (2018), leva em consideração algumas simbologias de três níveis distintos, no intuito de especificar características de cada tipo de solo. O Quadro 1 apresenta a simbologia atribuída aos tipos de solo ocorrentes na bacia do rio Paraopeba.

Quadro 1 – Símbolos para as classes de solos no 1º, 2º e 3º níveis categóricos.

1º Nível	2º Nível	3º Nível
C - Cambissolo	A – Amarelo	b – Argila atividade baixa
L - Latossolo	L – Litólico	d – Distrófico
P - Argissolo	V – Vermelho	e – Eutrófico
R - Neossolo	X – Háptico	

Fonte: Autor (2023) com base em Embrapa (2018).

Figura 24 – Principais tipos de solos identificados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, de acordo com o mapeamento realizado pela FEAM e Universidade Federal de Viçosa (UFV).



Fonte: Autor (2023).

Área urbana [0,89%]

Entre as classes apresentadas no mapeamento de solos da FEAM, em parceria com a UFV, observa-se a presença da classe denominada área urbana, a qual não possui solos naturais devido ao processo de urbanização. A partir do mapa de solos confeccionado para a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Figura 24, observa-se que esta classe ocupa um total de 107,33 km², que correspondem a 0,89% das classes mapeadas na bacia. Há registro desta classe somente no Médio Paraopeba, mais especificamente nos municípios de Betim, Contagem e Ibirité.

Argissolos [16,09%]

O nome dos argissolos deriva do latim “*argilla*”, que significa argila. Este tipo de solo é caracterizado pelo processo de acúmulo de argila, com a presença de um horizonte B textural, presença de argila normalmente de baixa atividade ou de alta atividade nos casos em que se encontra saturada por bases ou alto teor de alumínio. Este solo apresenta avançado grau de evolução, com atuação incompleta de processo de ferralitização, com gênese caulínica-oxídica, puramente caulínica, vermiculítica com hidróxi-Al. A mobilização da argila ocorre

nos horizontes mais superficiais do solo, com acúmulo nos horizontes de subsuperfície. Um dos aspectos diagnósticos do argissolo é o desenvolvimento do horizonte B textural (EMBRAPA, 2018).

A bacia do rio Paraopeba apresenta 15,50% de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos (PVAd), que ocorrem em maior quantidade no Médio Paraopeba, com presença subordinada no alto Paraopeba. Os Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos (PVAe), por sua vez, ocorrem na bacia na fração de 0,58%, em apenas dois pontos isolados, sendo um deles no Médio Paraopeba, nos municípios de Juatuba e Florestal e outro no Baixo Paraopeba, em Curvelo. Por fim, os Argissolos Vermelhos distróficos (PVD) ocorrem na quantidade ínfima de 0,01%, no Alto Paraopeba, nos municípios de Itaverava e Ouro Branco, nas bordas da bacia.

Cambissolos [33,28%]

Este solo deriva do latim “*cambiare*”, que significa trocar, dado o seu caráter de transformação. O Horizonte B ocorre apenas de forma incipiente, sob grupamento de outros solos pouco desenvolvidos. Diante do baixo desenvolvimento pedogênico, a estrutura deste solo se desenvolve com alteração do material de origem, com perda quase total da estrutura da rocha originária. Apresenta-se comumente com matizes avermelhados e com quantidade de argila superior à de seus horizontes subjacentes. Sobreposto aos cambissolos, é possível encontrar horizontes superficiais de qualquer natureza (EMBRAPA, 2018).

A bacia do rio Paraopeba apresenta 32,88% de Cambissolos Háplicos Tb distróficos (CXbd), cuja distribuição se dá ao longo de toda a bacia, incluindo o Alto, Médio e Baixo Paraopeba. O Cambissolo Háplico Tb eutrófico (CXbe), por sua vez, ocupa apenas 0,40% da área mapeada da bacia, ocorrendo em pontos isolados do Médio Paraopeba, nos municípios de Esmeraldas, Betim, Contagem e Sete Lagoas.

Latosolos [40,27%]

O nome deste tipo de solo deriva do latim “*lat*”, que significa tijolo, em função de seu caráter altamente intemperizado e do aspecto visual de tijolo que assume. O horizonte B latossólico, formado pelo grupamento de outros solos, constitui uma das suas principais características. Este solo apresenta elevado grau de evolução, com expressiva atuação do processo denominado latolização, ou ferralitização. Este processo favorece a intensa ação do intemperismo, que atua fortemente sobre os minerais primários e secundários das rochas originárias, o que resulta em uma grande concentração de argilominerais resistentes ao

intemperismo, assim como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com baixa migração ou mobilização da argila (EMBRAPA, 2018).

A bacia do rio Paraopeba apresenta 24,64% de Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos (LVAd), que se distribuem pelo Alto, Médio e baixo Paraopeba em áreas relativamente extensas. Os Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) ocorrem em 15,05% da área da bacia, distribuídos entre o Alto, Médio e Baixo Paraopeba, com ocorrência expressivamente maior no Baixo Paraopeba. Os Latossolos Amarelos distróficos (LAd), por sua vez, ocorrem em pequenas quantidades (0,58%), apenas no Médio Paraopeba, nos municípios de Onça de Pitangui, São José da Varginha, Juatuba e Mateus Leme.

Neossolos [9,47%]

O nome deste tipo de solo deriva do grego “neo”, que significa novo, devido à sua característica de baixo grau de desenvolvimento pedogenético. Representam um grupamento de solos pouco desenvolvidos, sem a presença de um horizonte B diagnóstico. Este tipo de solo encontra-se em processo de formação, normalmente devido às características das rochas originárias ou mesmo pela atuação pouco expressiva dos processos pedogenéticos e das ações do intemperismo. Para os neossolos é comum que não haja diferenciação bem definida dos horizontes, podendo ocorrer a passagem do horizonte A diretamente para o horizonte C ou mesmo para o regolito. O regolito corresponde à transição de solo para rocha, no qual há perda da coesão característica de seus constituintes, porém ocorre a preservação das estruturas geológicas inerentes à rocha originária (EMBRAPA, 2018).

A bacia do rio Paraopeba apresenta 9,42% de Neossolos Litólicos distróficos (RLd), distribuídos pelo Alto, Médio e Baixo Paraopeba, com destaque à ocorrência na porção do Quadrilátero Ferrífero pertencente a esta bacia. O Neossolo Litólico eutrófico (RLe) foi registrado em 0,05% da área de estudo, somente no município de Itaúna, pertencente ao Médio Paraopeba.

5.8 Unidades Geomorfológicas

A compartimentação das unidades geomorfológicas da bacia do rio Paraopeba (Figura 25) encontra-se condicionada aos conjuntos litomorfoestruturais presentes na área de estudo. Esta compartimentação relaciona-se à ação de fatores climáticos pretéritos e atuais, capazes de conferir características genéticas comuns a determinadas feições (IBGE, 2009).

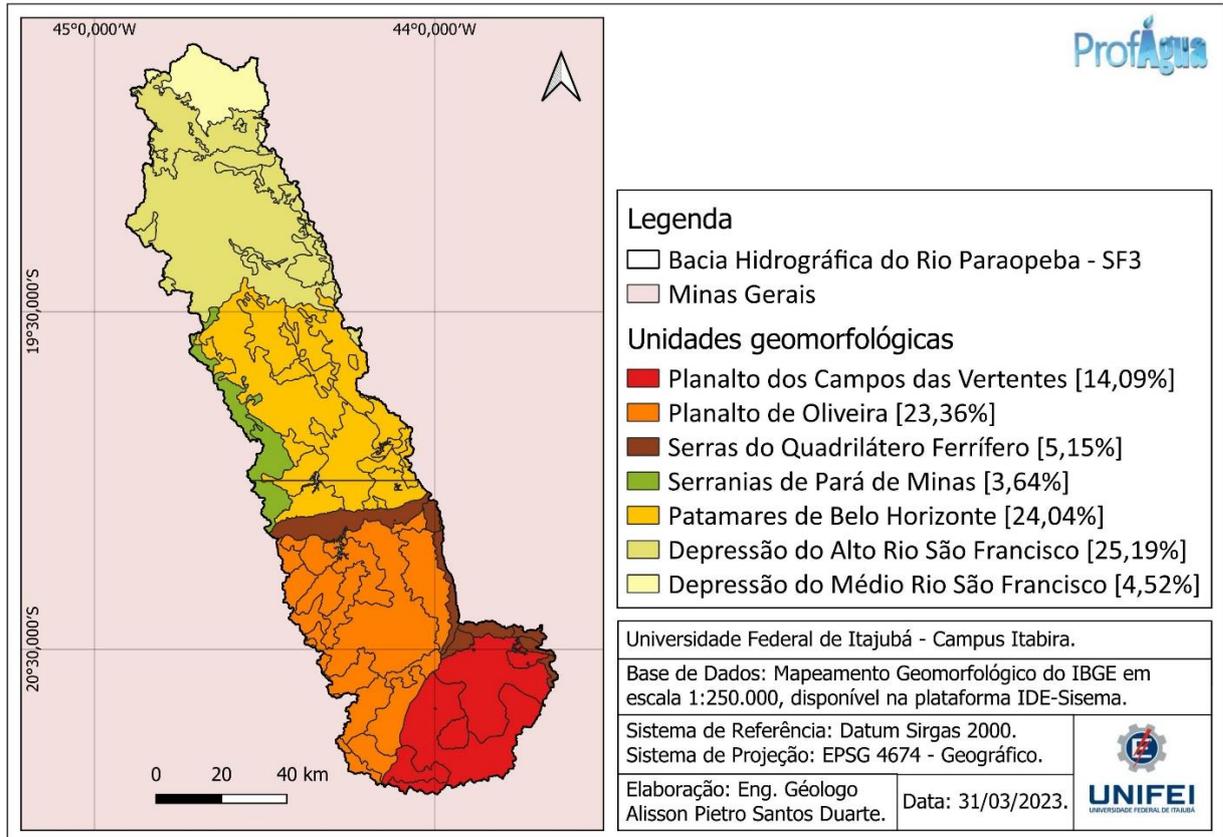
As principais regiões geomorfológicas presentes na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, demonstradas na Figura 25 são: Planaltos do Leste de Minas, representado na área de estudo

pelo Planalto dos Campos das Vertentes; Planalto Centro-Sul Mineiro, subdividido em Planalto de Oliveira e Patamares de Belo Horizonte; Quadrilátero Ferrífero, caracterizado pelas Serras do Quadrilátero Ferrífero e Serranias de Pará de Minas; Depressão do São Francisco, subdividida em Depressão do Alto e Depressão do Médio São Francisco.

De acordo com o mapa de compartimentação das unidades geomorfológicas elaborado (Figura 25), o Planalto dos Campos das Vertentes ocupa a região mais elevada da bacia, no Alto Paraopeba. O Planalto de Oliveira se estende do Alto ao Médio Paraopeba, enquanto os Patamares de Belo Horizonte ocupam a porção majoritária do Médio Paraopeba. As Serras do Quadrilátero Ferrífero ocorrem na borda leste do Alto Paraopeba e se estendem a porções do Médio Paraopeba, enquanto as Serranias de Pará de Minas ocorrem na porção oeste do Médio Paraopeba. A Depressão do Alto São Francisco ocupa uma pequena fração do Médio Paraopeba e a fração majoritária do Baixo Paraopeba, enquanto a Depressão do Médio São Francisco ocorre apenas no Baixo Paraopeba, próximo à foz da bacia.

A região do Quadrilátero Ferrífero abriga as principais jazidas minerais ocorrentes na bacia do rio Paraopeba, entre as quais podem-se citar os depósitos de ferro (Fe), manganês (Mn), ouro (Au), bauxita (fonte de Al), calcários, rochas fosfáticas e gemas, como a esmeralda e o topázio (ROESER e ROESER, 2013). Estas jazidas de ferro eram exploradas no município de Brumadinho, na Mina Córrego do Feijão, onde ocorreu o rompimento da B-I, previamente contextualizado. Há ocorrência simultânea do ferro e do manganês em diversas jazidas ao longo do Quadrilátero Ferrífero, em função da similaridade entre as condições de formação de alguns de seus minerais, entre eles a hematita (Fe_2O_3) e a pirolusita (MnO_2).

Figura 25 – Compartimentação das unidades geomorfológicas que compõem a bacia hidrográfica do rio Paraopeba.



Fonte: Autor (2023).

5.9 Uso e cobertura da terra

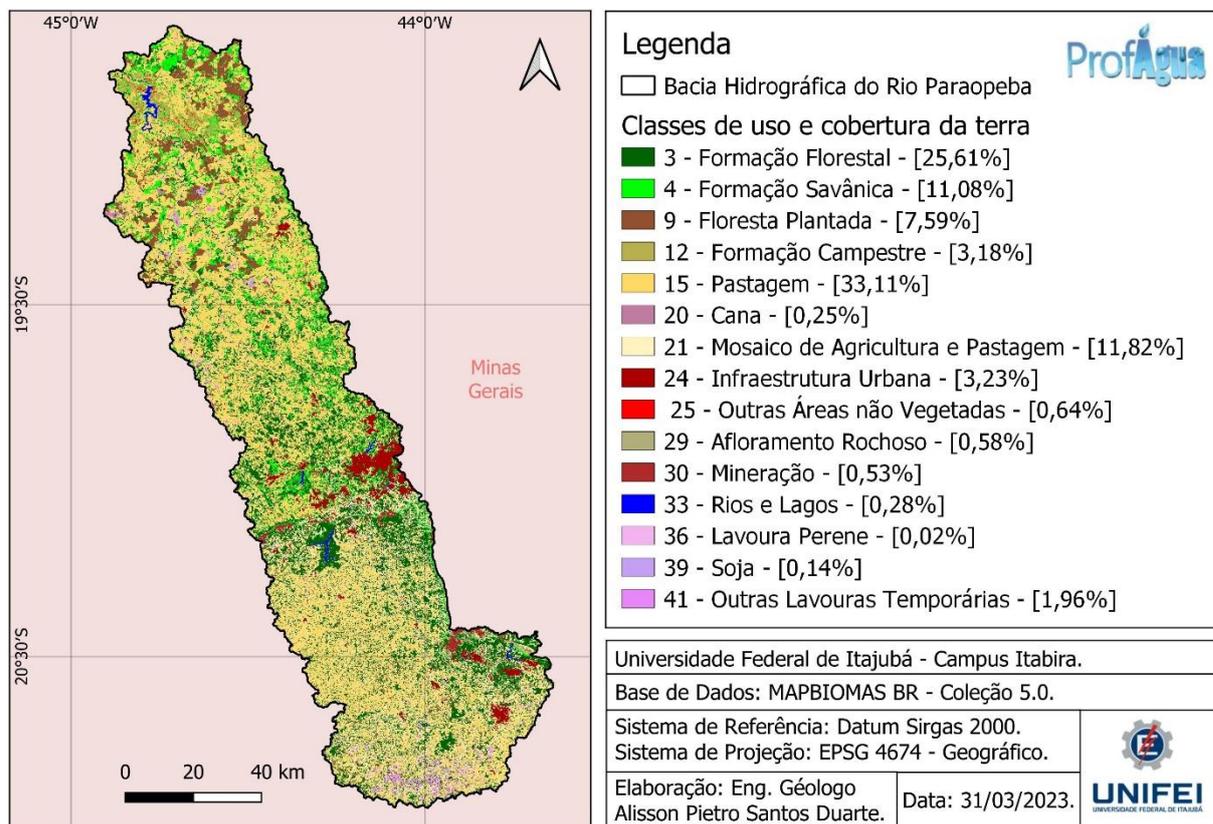
A avaliação e compreensão do processo de uso e cobertura da terra em determinadas regiões, permite identificar-se regiões com maior criticidade em relação à qualidade da água, correlacionados a ações antrópicas, com destaque à urbanização e ao desenvolvimento de atividades industriais e agrícolas (MENEZES *et al.*, 2016). De acordo com Diamantini *et al.* (2018), a consideração do uso do solo na avaliação da qualidade das águas permite identificar-se potenciais fontes de contaminação aos corpos d'água superficiais e subterrâneos.

A quantificação dos temas para o uso e cobertura da terra, a partir do MapBiomass, permitiu identificar-se as classes predominantes na bacia, conforme observado na Figura 26.

A pastagem ocorre majoritariamente, ocupando aproximadamente 33,11% da área da bacia, seguida pela formação florestal, que soma 25,61%. Sequencialmente tem-se um mosaico de agricultura e pastagem, que ocupa aproximadamente 11,82% da área da bacia. A formação savânica, correspondente ao cerrado brasileiro, é observada em aproximadamente 11,08% da área de estudo, seguida pela floresta plantada, que engloba 7,59% da área.

Outras classes de uso e cobertura da terra ocorrem em menor proporção, podendo-se citar a formação campestre, infraestrutura urbana, plantações de cana e soja, afloramentos rochosos, áreas de mineração, rios e lagos, lavouras perenes e temporárias.

Figura 26 – Categorização dos usos e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, a partir dos dados do MapBiomas.



Fonte: Autor (2023).

Formação Florestal

A classe Formação Florestal ocorre em 25,61% da área de estudo, sob influência dos biomas cerrado e mata atlântica. Na porção dominada pelo cerrado, ocorre predomínio de espécies arbóreas e ocorrência subordinada de mata ciliar, mata seca, mata de galeria, cerradão e florestas estacionais (MAPBIOMAS, 2020). Por outro lado, na porção caracterizada pelo domínio de mata atlântica, ocorrem florestas ombrófilas densas, abertas e mistas, florestas estacionais e formações arbóreas pioneiras (MAPBIOMAS, 2020).

Formação Savânica

A classe Formação Savânica apresenta-se em 11,08% da área de estudo, com diferentes domínios de acordo com o predomínio do cerrado ou da mata atlântica. Na porção de domínio do cerrado, ocorrem formações savânicas com estratos arbóreos e arbustivos-herbáceos distintos, denominados cerrado típico, cerrado denso, cerrado rupestre e cerrado ralo

(MAPBIOMAS, 2020). A porção de domínio da mata atlântica, por sua vez, exibe a presença de savanas, savanas-estépicas arborizadas e florestadas (MAPBIOMAS, 2020).

Floresta Plantada

Esta classe ocupa 7,59% da área de estudo, e, segundo MapBiomias (2020), engloba espécies arbóreas plantadas para fins comerciais, entre as quais se destacam o eucalipto, a araucária e o pinheiro.

Formação Campestre

A Formação Campestre ocupa 3,18% da área de estudo e também exibe uma tendência de formações de acordo com o domínio do cerrado ou da mata atlântica. Na porção de domínio do cerrado há predomínio de estratos herbáceos, entre eles o campo limpo, campo sujo e campo rupestre, e, em menor proporção, formações savânicas, com destaque ao cerrado rupestre (MAPBIOMAS, 2020). A região de domínio da mata atlântica é caracterizada pela presença de savanas, savanas-estépicas dos tipos parque e gramíneo-lenhosas, estepe e pioneiras arbustivas e herbáceas (MAPBIOMAS, 2020).

Pastagem

A área classificada como Pastagem ocupa a maior fração da área de estudo, com 33,11% da bacia do rio Paraopeba. Esta classe é caracterizada por áreas de pastagem, predominantemente plantadas, direcionadas a atividades dos setores agrícola e pecuário (MAPBIOMAS, 2020). A ocorrência natural das pastagens costuma configurar a classificação de Formação Campestre, ao passo que estas podem ser pastejadas ou não (MAPBIOMAS, 2020).

Cana

Esta classe ocupa 0,25% da área de estudo e, de acordo com MapBiomias (2020), caracteriza-se pelo cultivo exclusivo da cana-de-açúcar.

Mosaico de Agricultura e Pastagem

Esta classe ocupa 11,82% da área de estudo e, segundo Mapbiomas (2020), caracteriza-se por regiões de uso agropecuário, de difícil distinção entre pastagem e agricultura.

Infraestrutura Urbana

A classe definida como Infraestrutura Urbana ocupa 3,23% da área de estudo e, de acordo com MapBiomias (2020), apresenta alta densidade de edificações, vias, construções e outras espécimes de infraestruturas.

Outras Áreas Não Vegetadas

Esta classe ocupa 0,64% da área de estudo e, segundo MapBiomias (2020), corresponde a áreas de baixa ou nenhuma permeabilidade. Podem-se destacar, entre estas áreas, as regiões de expansão urbana, áreas de mineração e regiões caracterizadas pela presença de infraestruturas, cujo mapeamento como outra classe não foi reconhecido pelo método utilizado na elaboração do mapa de uso e cobertura da terra (MAPBIOMAS, 2020).

Afloramento Rochoso

Com um total de 0,58% de ocorrência na área de estudo, esta classe é caracterizada, segundo MapBiomias (2020), pela exposição natural de rochas na superfície terrestre, sem cobertura de solo, com vegetação ausente ou pouco expressiva. Esta classe ocorre comumente em locais de alta declividade, muitas vezes caracterizadas pela presença de paredões rochosos aflorantes na superfície terrestre. A ocorrência de vegetação junto aos afloramentos rochosos é baixa, com possível presença de vegetações ruprestres características do cerrado ou de vegetação rupícola nos domínios de mata atlântica (MAPBIOMAS, 2020).

Mineração

A classe mineração é observada em apenas 0,53% da bacia do rio Paraopeba, em áreas, segundo MapBiomias (2020), caracterizadas por grandes atividades de extração mineral, de porte industrial, ou por atividades de pequeno porte, como é o caso de alguns garimpos. Estas atividades resultam em uma exposição do solo devido à ação antrópica. As áreas expostas favorecem a geração de sedimentos tanto pela ação antrópica direta, como também pela ação do intemperismo. Estes sedimentos podem ser carregados para os cursos d'água mais próximos e elevar os níveis de Turbidez, sólidos em suspensão, sólidos totais dissolvidos, entre outros parâmetros físicos e químicos das águas fluviais.

Rios e Lagos

Esta classe soma um total de 0,28% da área de estudo e, de acordo com MapBiomias (2020), é representada por corpos d'água em geral, entre eles rios, lagos, represas e reservatórios de água.

Lavoura Perene

Com apenas 0,02% de representatividade na área de estudo, esta classe é caracterizada, segundo MapBiomias (2020), por lavouras de café, citrus e outras lavouras perenes. Estas culturas agrícolas apresentam ciclo vegetativo superior a um ano, considerado longo, e permitem colheitas sucessivas, sem a necessidade de novo plantio (MAPBIOMAS, 2020).

Soja

Com um total de 0,14%, esta área é caracterizada, segundo MapBiomias (2020), pelo cultivo exclusivo da soja.

Outras Lavouras Temporárias

Esta classe ocupa 1,96% da área de estudo e corresponde, de acordo com MapBiomias (2020), a áreas de cultivos agrícolas de curta e média duração, normalmente com ciclo vegetativo inferior a um ano. Após a colheita, estas culturas necessitam de remoção e novo plantio para que possam produzir novamente (MAPBIOMAS, 2020).

5.10 Caracterização da gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba

Plano de recursos hídricos

O PDRH Paraopeba, publicado em 2020, foi elaborado em 6 etapas (COBRAPE, 2020). A primeira referiu-se ao Plano de Trabalho, onde foram apresentadas as bases metodológicas para o desenvolvimento do PDRH. Nesta etapa foi conduzida a reunião inicial, realizou-se a mobilização social e foram planejadas as coletas de dados, com vistas à elaboração do PDRH. A segunda etapa envolveu o Diagnóstico, que estabeleceu a “fotografia atual” da Bacia. Esta atualização do diagnóstico da bacia contou com a caracterização propriamente dita da bacia, com ênfase nos recursos hídricos. Foram realizadas mobilizações sociais e foi dado início às consultas públicas

A partir da terceira etapa, o Prognóstico, foram desenvolvidos os cenários do PDRH para o horizonte de planejamento de 20 anos. Foram tratadas as projeções populacionais e propostos cenários tendenciais e alternativos. A partir destes cenários, foram avaliadas as demandas e disponibilidades hídricas na bacia. Esta etapa contou também com a identificação das áreas de restrição de uso dos recursos hídricos. Análogo à etapa anterior, foram realizadas mobilizações sociais e consultas públicas.

A quarta etapa caracterizou-se pela elaboração do Plano de Ações, a partir do qual foram traçadas as estratégias e diretrizes do PDRH, com vistas à sustentabilidade dos recursos hídricos

na bacia. Foram propostas ações por eixos temáticos, o que possibilitou a seleção das áreas prioritárias. Foram estabelecidas recomendações e o cronograma físico financeiro, como subsídio à implementação do plano. Nesta etapa foi elaborada a proposta organizacional para o gerenciamento dos recursos hídricos na bacia.

A quinta etapa envolveu a consolidação das informações desenvolvidas ao longo do trabalho, com recorrência à mobilização social e às consultas públicas. A sexta etapa teve como foco a elaboração dos produtos e relatórios finais, entre eles o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba – SF3, seu Resumo Executivo e seu Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Enquadramento dos corpos d'água em classes segundo os usos preponderantes

A partir do Decreto 41.578/2001, em conformidade com a regulamentação da Política Estadual de Recursos Hídricos, o CERH-MG e o COPAM estabeleceram a DN COPAM/CERH 08/2022, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais de domínio de Minas Gerais. De acordo com esta DN conjunta, os usos preponderantes para as classes de enquadramento são:

Classe especial - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;*
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e*
- c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.*

Classe 1 - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;*
- b) à proteção das comunidades aquáticas;*
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução Conama n° 274, de 2000;*
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e*
- e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.*

Classe 2 - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;*
- b) à proteção das comunidades aquáticas;*
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho;*

- d) 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
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Classe 3 - Águas que podem ser destinadas:

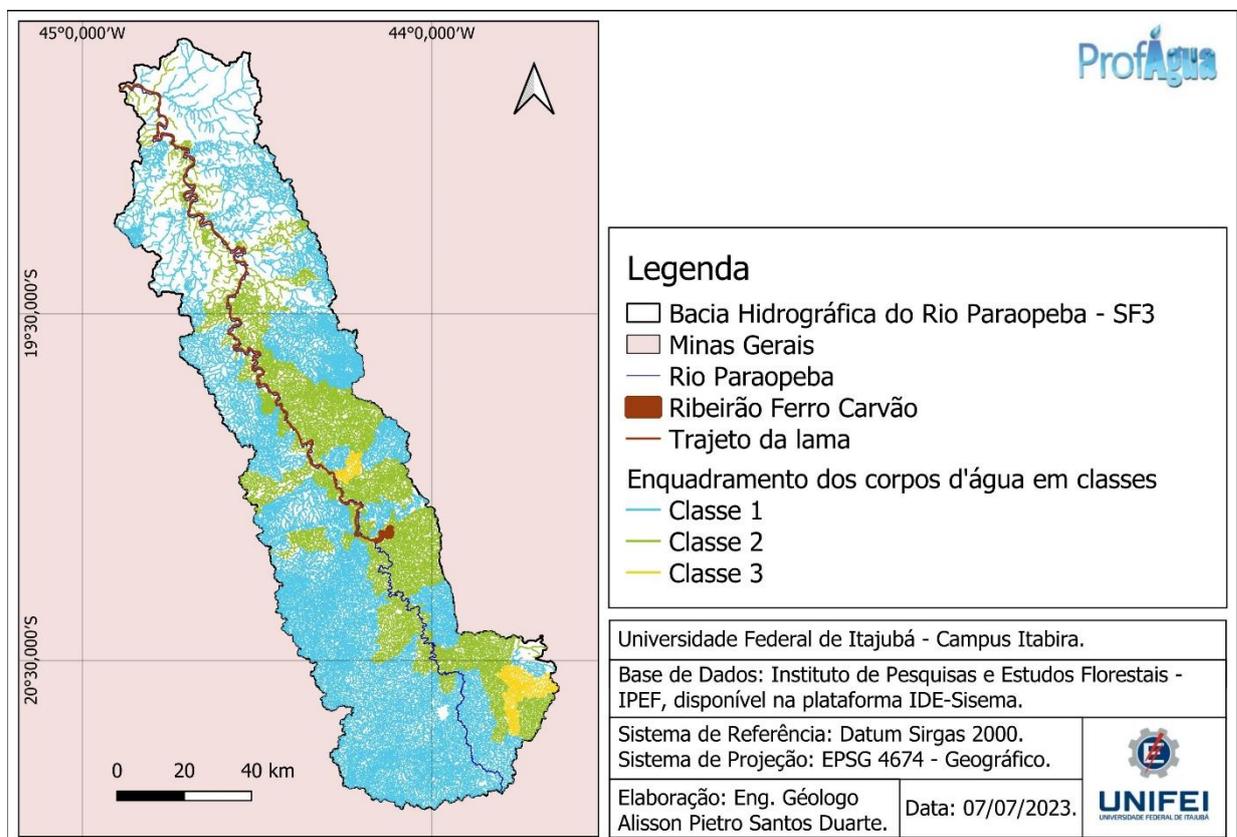
- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à pesca amadora;
- d) à recreação de contato secundário; e
- e) à dessedentação de animais.

Classe 4 - Águas que podem ser destinadas:

- a) à navegação; e
- b) à harmonia paisagística.

O rio Paraopeba enquadra-se, de acordo com a DN COPAM 14/1995, como Classe 2, desde a confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias. Os demais cursos d'água da bacia enquadram-se nas Classes 1, 2 e 3, conforme observado na Figura 27.

Figura 27 – Classes de enquadramento dos corpos d'água da Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba.



Fonte: Autor (2023).

Outorga de direito de uso dos recursos hídricos e usos insignificantes

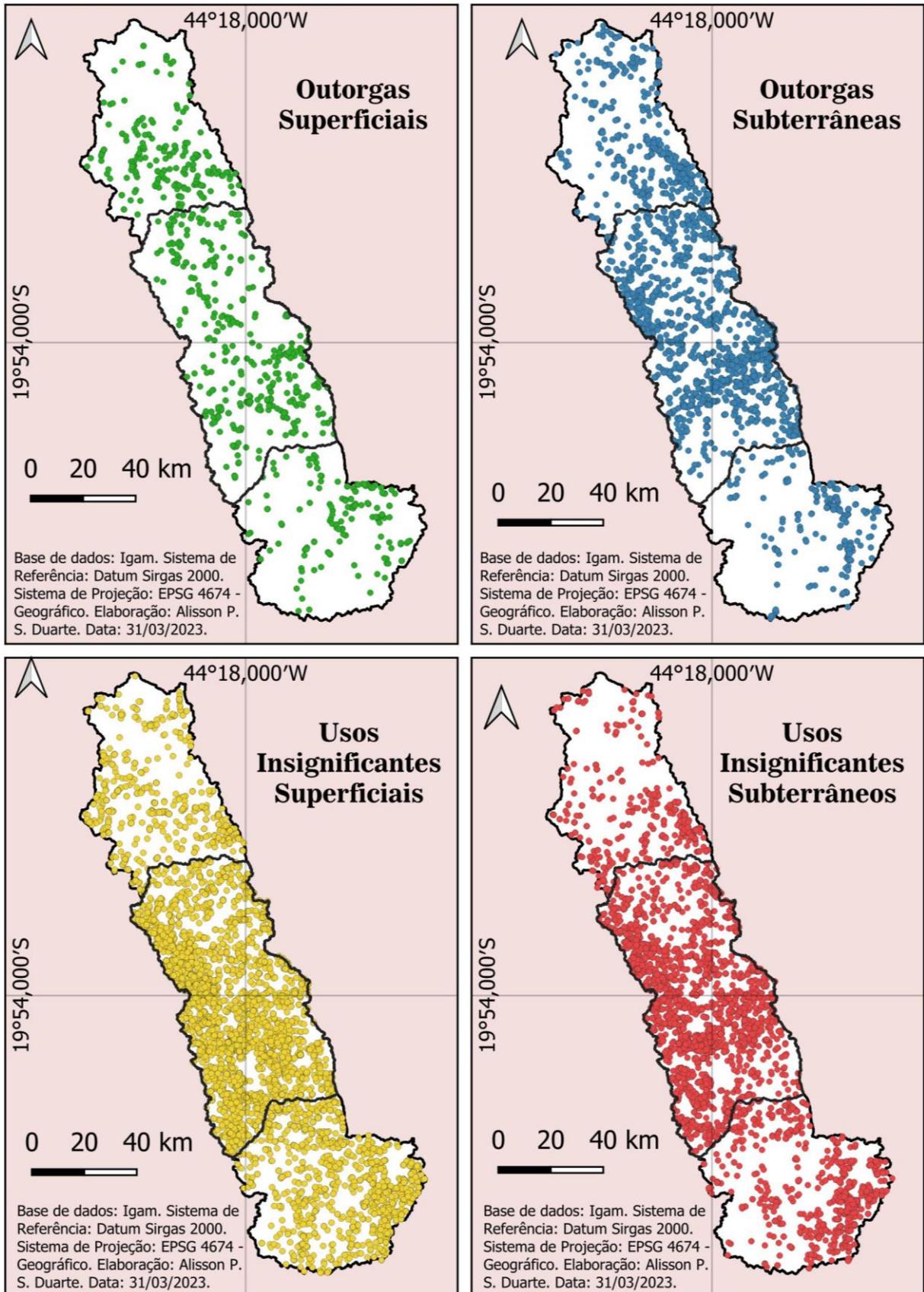
A outorga corresponde a um dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos e assegura ao usuário o direito de uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, sejam eles consuntivos ou não. Entretanto, este instrumento não confere ao usuário a propriedade da água, mas sim o direito de uso. Desta forma, as outorgas regularizadas podem ser suspensas total ou parcialmente, mediante situações específicas, como é o caso de cenários de escassez hídrica, não cumprimento dos termos de outorga, dentre outras hipóteses legalmente previstas.

A Lei nº 21.972/2016 confere ao IGAM a operacionalização da outorga. As análises dos processos de outorgas são realizadas pelo IGAM a partir das Unidades Regionais de Gestão das Águas (Urgas). A solicitação da outorga deve ser feita antes da implantação de qualquer intervenção que venha a alterar o regime, a quantidade ou a qualidade de um corpo d'água, seja ele superficial ou subterrâneo.

Os chamados Usos Insignificantes são aqueles cuja regularização de utilização dos corpos d'água independe de outorga de direito de uso, de acordo com o estabelecido pela Política Estadual de Recursos Hídricos – Lei nº 13.199/1999. Os critérios utilizados para enquadrar uma intervenção a um corpo d'água como uso insignificante encontram-se dispostos na DN CERH nº 09/2004 para captações e acumulações superficiais e na DN CERH nº 76/2022, para captações subterrâneas. O cadastro de uso insignificante é realizado gratuitamente através de sítio eletrônico disponibilizado pelo IGAM, a partir do qual os usuários fornecem as informações e emitem suas certidões online.

A análise da distribuição espacial das outorgas deferidas, renovadas e retificadas e dos usos insignificantes com cadastros efetivados na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, permite identificar as regiões com maior número de intervenções regularizadas superficiais e subterrâneas (Figura 28).

Figura 28 – Espacialização das outorgas deferidas, renovadas e retificadas e dos usos insignificantes com cadastros efetivados.



Fonte: Autor (2023).

A partir do mapa elaborado para a espacialização das outorgas e usos insignificantes (Figura 28) pode-se identificar as regiões da bacia do Paraopeba com maior número de outorgas e usos insignificantes regularizados, as quais caracterizam maior demanda pelo uso dos recursos hídricos.

As outorgas superficiais devidamente regularizadas ocorrem majoritariamente no Médio Paraopeba (356), seguidas pela ocorrência no Baixo Paraopeba (213) e em menor quantidade no Alto Paraopeba (154). As outorgas subterrâneas seguem a tendência das outorgas superficiais, com 1502 regularizações no Médio Paraopeba, 437 no Baixo Paraopeba e 240 no Alto Paraopeba.

Em relação aos usos insignificantes com cadastros devidamente efetivados, entre os modos de uso superficiais o maior quantitativo é observado no Médio Paraopeba (4069), seguido pelo Alto Paraopeba (1298) e, por fim, o Baixo Paraopeba, com 586 cadastros devidamente efetivados e vigentes. Os usos insignificantes subterrâneos regularizados também ocorrem majoritariamente no Médio Paraopeba (2554), seguido, respectivamente, pelos 881 cadastros efetivados no Alto Paraopeba e pelos 433 no Baixo Paraopeba.

Os processos de outorga possuem data de validade e podem vencer, caso não seja solicitada a renovação da outorga dentro do prazo previsto pela legislação vigente. As outorgas não renovadas passarão ao status de vencida e a intervenção não estará mais regularizada, de forma que o usuário não poderá mais fazer uso do recurso hídrico. Durante a análise dos processos de outorga, aquelas que não atenderem aos requisitos de documentação, estudos e prazos poderão ser indeferidas ou arquivadas. As outorgas podem ainda ser canceladas por solicitação do outorgante ou por determinação do IGAM.

A Tabela 1 traz o quantitativo das outorgas deferidas, renovadas e retificadas, ou seja, devidamente regularizadas, as quais foram anteriormente exibidas espacialmente na área de estudo a partir da Figura 28. São quantificados também os processos atualmente em fase de regularização e aqueles não regularizados, seja pelo indeferimento, arquivamento do processo de outorga ou por vencimento ou cancelamento da outorga outrora deferida.

As autorizações de perfuração exibidas na Tabela 1 não correspondem a um processo de outorga de direito de uso dos recursos hídricos propriamente dito, pelo fato desta autorização conceder ao usuário somente o direito à perfuração do poço tubular em local pretendido. Posteriormente, a regularização da captação pode ser obtida mediante formalização de processo de outorga para o modo de uso específico para a modalidade de captação de água subterrânea por meio de poço tubular já existente.

Em relação aos usos insignificantes, a Tabela 1 exibe o quantitativo dos usos devidamente regularizados a partir do cadastro e os usos não regularizados. Análogo ao procedimento das outorgas, as certidões de usos insignificantes também possuem data de validade. Os cadastros de usos insignificantes, apesar de serem auto declaratórios, podem não ser devidamente efetivados, caso as informações apresentadas sejam incompletas ou inconsistentes. Os cadastros de usos insignificantes também podem ser cancelados por solicitação do usuário ou por determinação do IGAM.

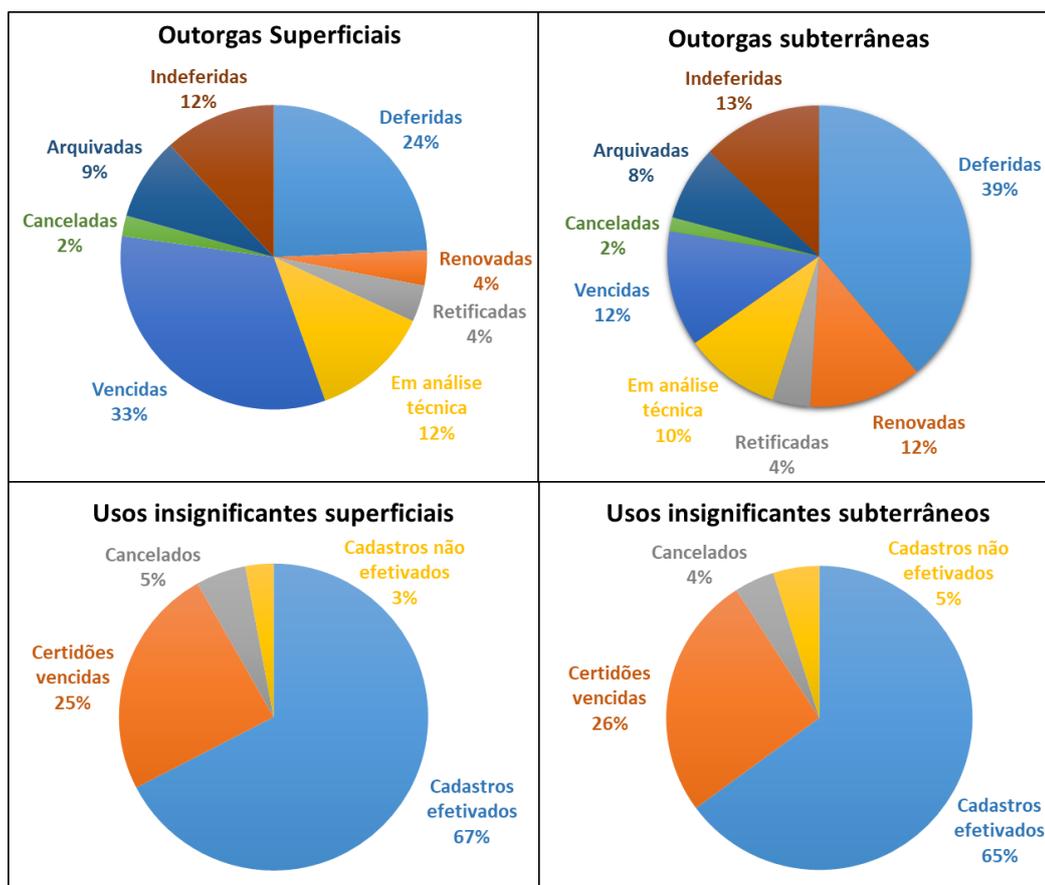
Tabela 1 – Quantitativo dos processos de outorga, autorizações de perfuração e usos insignificantes.

STATUS DO PROCESSO	Nº DE OUTORGAS		REGULARIZAÇÃO
	SUPERFICIAIS	SUBTERRÂNEAS	
Outorga deferida	545	1528	Devidamente regularizadas
Outorga renovada	87	488	
Outorga retificada	91	163	
Em análise técnica	295	416	Em fase de regularização
Outorga vencida	762	503	Não regularizados
Outorga cancelada	51	61	
Outorga arquivada	204	325	
Outorga indeferida	276	519	
STATUS DO PROCESSO	Nº DE AUTORIZAÇÕES DE PERFURAÇÃO CONCEDIDAS		REGULARIZAÇÃO
	SUPERFICIAIS	SUBTERRÂNEAS	
Autorização de perfuração concedida	Não se aplica	1972	Perfuração regularizada
STATUS DO PROCESSO	Nº DE USOS INSIGNIFICANTES		REGULARIZAÇÃO
	SUPERFICIAIS	SUBTERRÂNEAS	
Cadastro efetivado	7335	4663	Devidamente regularizados
Certidão vencida	2657	1867	Não regularizados
Uso insignificante cancelado	572	304	
Cadastro não efetivado	320	350	

Fonte: Autor (2023).

A Figura 29 mostra o gráfico com a porcentagem dos processos de outorga e de usos insignificantes, de acordo com os status apresentados na Tabela 1. Observam-se porcentagens significativas para as outorgas superficiais vencidas (33%) e subterrâneas vencidas (12%), o que pode remeter ao fato das intervenções não serem mais realizadas ou uma tendência ao uso irregular dos recursos hídricos. Na segunda hipótese, os usuários não regularizados estão sujeitos a multas e sanções previstas por lei.

Figura 29 – Quantitativo dos processos de outorga e usos insignificantes por status dos processos.



Fonte: Autor (2023).

Em relação aos modos de uso passíveis de outorga e/ou cadastro de uso insignificante, a Tabela 2 exibe todos os processos, regularizados e não regularizados, no intuito de identificar-se os modos de uso superficiais e subterrâneos mais demandados pelos usuários.

Para os modos de uso superficiais, observa-se na Tabela 2 grande demanda por captações de água diretamente em corpos d'água, com 1138 registros de processos de outorga e 5317 cadastros de usos insignificantes para esta modalidade. Destaque deve ser dado ao número de cadastros de usos insignificantes para barramento em curso d'água sem captação, com um total de 3372, ao passo que o número de outorgas para este modo de uso é de 192. Alguns modos de uso superficiais são passíveis somente de outorga, não sendo possível a realização de cadastro de uso insignificante, entre eles o a dragagem em curso d'água para extração mineral e o aproveitamento do potencial hidrelétrico (Tabela 2).

Entre os modos de uso subterrâneos destaca-se a captação de água subterrânea por meio de poço tubular já existente, com um total de 3357 outorgas e 2 usos insignificantes. Este baixo número de usos insignificantes para esta modalidade se deve ao fato de que este modo de uso

se tornou passível de cadastro de uso insignificante apenas em 2022, após publicação da DN CERH nº 76/2022.

Tabela 2 – Quantitativo dos processos de outorga e cadastros de usos insignificantes por modos de uso.

MODOS DE USO SUPERFICIAIS	Nº total de outorgas	Nº total de usos insignificantes
01-Captação em corpo d'água (rios, lagoas naturais, etc)	1138	5317
02-Captação em barramento em curso d'água sem regularização de vazão	197	1794
03-Captação em barramento em curso d'água com regularização de vazão (área menor ou igual a 5 ha)	113	286
04-Captação em barramento em curso d'água com regularização de vazão (área maior que 5 ha)	41	1
05-Barramento em curso d'água sem captação	192	3372
06-Barramento em curso d'água sem captação para fins de regularização de vazão	13	114
12-Desvio parcial ou total de curso d'água	30	Não se aplica
13-Dragagem, limpeza ou desassoreamento de curso d'água	56	Não se aplica
14-Dragagem em curso d'água para extração mineral	242	Não se aplica
15-Canalização e/ou retificação de curso d'água	148	Não se aplica
16-Travessia rodo-ferroviária (pontes e bueiros)	148	Não se aplica
18-Lançamento de efluente em corpo d'água	3	Não se aplica
20 - Aproveitamento de potencial hidrelétrico	10	Não se aplica
25-Usos coletivos - processo único de outorga	1	Não se aplica
MODOS DE USO SUBTERRÂNEOS	Nº total de outorgas	Nº total de usos insignificantes
07 - Perfuração de poço tubular	2229	Não se aplica
08 - Captação de água subterrânea por meio de poço tubular já existente	3357	2
09 - Captação de água subterrânea por meio de poço manual/cisterna	35	243
10 - Captação de água subterrânea para fins de rebaixamento de nível d'água para mineração	14	Não se aplica
11 - Captação de água em surgência/nascente	78	59
23 - Captação de água subterrânea para fins de pesquisa hidrogeológica	10	Não se aplica
24 - Rebaixamento de nível d'água subterrâneo para obras civis	4	Não se aplica
26 - Dragagem em cava aluvionar para fins de extração mineral	295	Não se aplica

Fonte: Autor (2023).

A apuração e quantificação das principais finalidade de uso dos recursos hídricos apontadas nos processos de outorga e cadastros de usos insignificantes permite identificar quais as principais demandas declaradas pelos usuários na bacia do rio Paraopeba (Tabela 3). Esta análise das finalidades permite identificar ainda o perfil dos usuários, tanto em áreas rurais quanto em áreas urbanas, a partir de suas principais demandas pelo uso da água.

No ranking de finalidades, observa-se o consumo humano em primeiro lugar, ocorrendo em 29,71% dos processos, seguido pela dessedentação animal (20,00%) e pela irrigação (13,71%). Vale ressaltar que um mesmo processo de outorga e/ou cadastro de uso insignificante pode apresentar mais de uma finalidade, o que resulta em um quantitativo total, na Tabela 3, superior ao somatório dos processos de outorga e usos insignificantes.

Tabela 3 – Principais finalidades de uso dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba.

FINALIDADES	Nº DE INTERVENÇÕES	%
Consumo humano	10469	29,71
Dessedentação de animais	7048	20,00
Irrigação	4831	13,71
Paisagismo	3901	11,07
Consumo industrial	2256	6,40
Aquicultura	1386	3,93
Recreação	1191	3,38
Lavagem de veículos	749	2,13
Abastecimento público	638	1,81
Extração mineral	633	1,80
Consumo agroindustrial	359	1,02
Urbanização	298	0,85
Regularização de vazão	256	0,73
Contenção de sedimentos	191	0,54
Controle de cheias	154	0,44
Recirculação de água	149	0,42
Pesquisa hidrogeológica	147	0,42
Rebaixamento de nível d'água	128	0,36
Aspersão de vias	122	0,35
Transposição de corpo de água	107	0,30
Disposição de rejeitos	100	0,28
Desassoreamento ou limpeza	37	0,11
Pesquisa mineral	34	0,10
Lançamento de efluentes	18	0,05
Clarificação de água	15	0,04
Geração de energia	10	0,03
Contenção de taludes	7	0,02

Fonte: Autor (2023).

Cobrança pelo uso dos recursos hídricos

A Lei nº 9.433/97 prevê que todo uso de recurso hídrico passível de outorga será cobrado, com vistas ao reconhecimento da água como um bem econômico (ANA, 2021). Esta lei confere aos usuários uma indicação do real valor da água e incentiva a racionalização do uso, além de prover recursos financeiros para o financiamento de programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos dos CBHs (ANA, 2021). A Cobrança é um dos cinco instrumentos de gestão das águas previsto na PNRH e na Política Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, regulamentada pelo Decreto nº 48.160/2021.

Na bacia hidrográfica do rio Paraopeba a cobrança encontra-se aprovada pela DN CERH-MG nº 474/2021, a partir da qual o CERH “*aprova a metodologia de cobrança pelo uso de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba, na forma de Deliberação Normativa do CBH Paraopeba nº 08, de 24 de novembro de 2021*”.

Sistema de informações sobre recursos hídricos

O Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (InfoHidro), foi instituído em âmbito federal, pela Lei nº 9.433/1997 e em âmbito estadual, pela Lei nº 13.199/1999. Na bacia SF3, este instrumento tem como principais objetivos coletar, tratar, armazenar, recuperar, disponibilizar e divulgar informações que contribuam para a gestão dos recursos hídricos na bacia. O InfoHidro vem sendo desenvolvido em módulos, ou subsistemas, com vistas à facilitação do acesso às informações sobre os recursos hídricos aos usuários, de acordo com os interesses prioritários identificados pelo IGAM.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Seleção das estações de monitoramento de qualidade da água

O IGAM é o principal instituto responsável pelo monitoramento da qualidade das águas e sedimentos da bacia do rio Paraopeba e conta desde 1997 com 12 pontos amostrais, cujas análises visam a obtenção de resultados referentes a parâmetros físicos, químicos e biológicos das águas. Estes pontos, que distam cerca de 40 km uns dos outros, totalizam mais de 300 km de extensão monitorada e encontram-se distribuídos ao longo dos municípios de Brumadinho, Melo Franco, Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Betim, Esmeraldas, Paraopeba, São José da Varginha, Papagaios, Pompéu e Felixlândia.

Entre as quinze estações que compõem a rede de monitoramento pós-rompimento da B-I, apenas oito possuem dados de monitoramento de qualidade das águas anteriores ao rompimento. Estas oito estações foram consideradas para criação dos Índices de Resiliência, visto que as sete estações criadas após o rompimento não possibilitam a análise sob a metodologia proposta, que envolve a comparação dos valores pré-rompimento e pós-rompimento. As estações selecionadas para o estudo podem ser observadas, com destaque em negrito, na Tabela 4, enquanto as estações não consideradas podem ser observadas sem destaque.

Tabela 4 – Estações de monitoramento da qualidade que compõem o Plano de Monitoramento Emergencial pós rompimento.

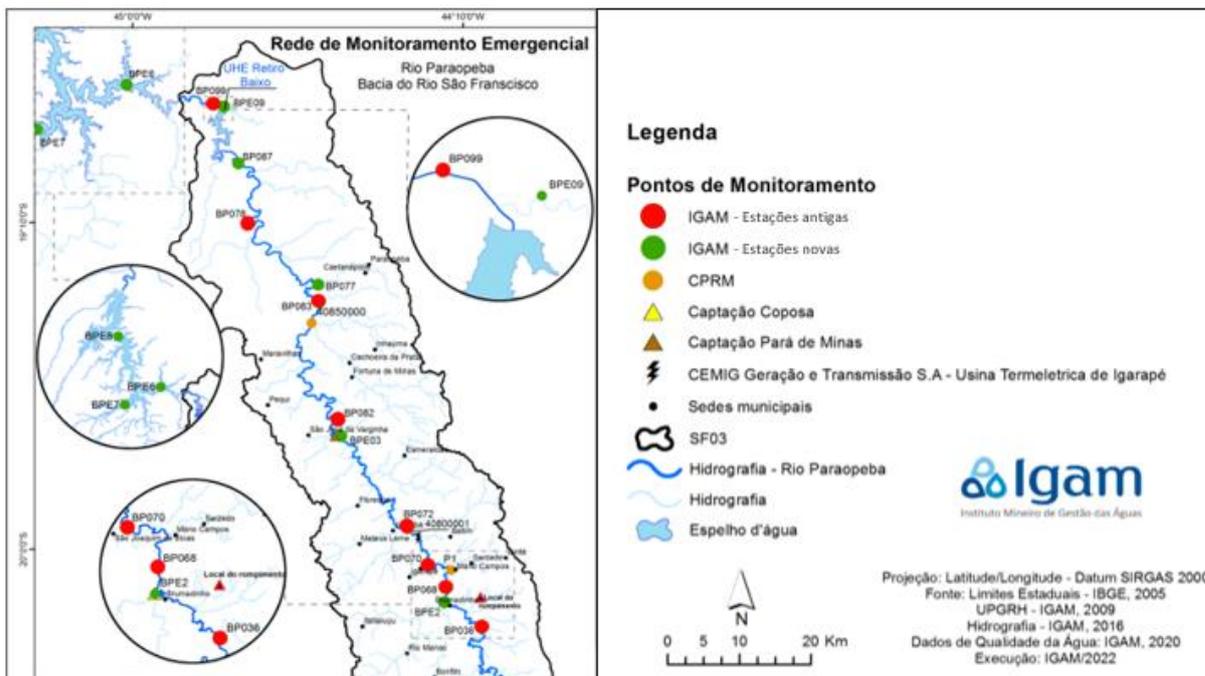
ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO	LOCAL
BP036	Brumadinho (a montante)
BPE2	Captação RMBH em Brumadinho
BP068	Mário Campos
BP070	São Joaquim de Bicas
BP072	Betim
BPE3	Montante Captação Pará de Minas
BP082	Esmeraldas
BP083	Paraopeba
BP077	Paraopeba
BP078	Curvelo
BP087	Antes de Retiro Baixo
BPE9	Ribeirão Gomes, foz depois de Retiro Baixo
BP099	Depois de Retiro Baixo
BPE6	Braço do reservatório em Felixlândia
BPE7	Braço do reservatório em Abaeté
BPE8	Dentro do reservatório de Três Marias

Fonte: Autor (2023).

A Figura 30 ilustra a localização das estações de monitoramento selecionadas para compor o estudo (círculos vermelhos), além das estações novas criadas pós-rompimento para

intensificar o monitoramento da qualidade das águas na bacia, em especial na porção a jusante do ponto de confluência entre o ribeirão Ferro-Carvão e o rio Paraopeba. A Figura 30 mostra ainda estações do SGB, captações da COPASA e um ponto de captação em Pará de Minas.

Figura 30 – Localização das estações de monitoramento selecionadas para o estudo.



Fonte: adaptado de IGAM (2022).

De acordo com IGAM (2019a), os monitoramentos contam com a análise de cerca de 50 parâmetros, podendo-se destacar a Turbidez, Oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Manganês total e os contaminantes tóxicos: Arsênio total, Cádmio total, Chumbo total, Cobre dissolvido, Cromo total, Mercúrio total, Níquel total e Zinco total.

A observância dos parâmetros de qualidade incluídos nos primeiros 43 Boletins Informativos disponibilizados pela FEAM (2023b) corroborou a escolha de sete parâmetros para compor os Índices de Resiliência. Os parâmetros selecionados e suas respectivas unidades de medida são: Turbidez (NTU), Ferro dissolvido (mg/L), Manganês total (mg/L), Alumínio dissolvido (mg/L), Chumbo total (mg/L), Cobre dissolvido (mg/L) e Mercúrio total (µg/L).

6.2 Análise das redes de monitoramento pluviométrica e fluviométrica

Monitoramento pluviométrico

O regime pluviométrico pode ser considerado uma das variáveis mais importantes para o estudo climático regional, além de influenciar significativamente o balanço hídrico da bacia hidrográfica, por afetar o regime de escoamento superficial e as recargas das unidades aquíferas.

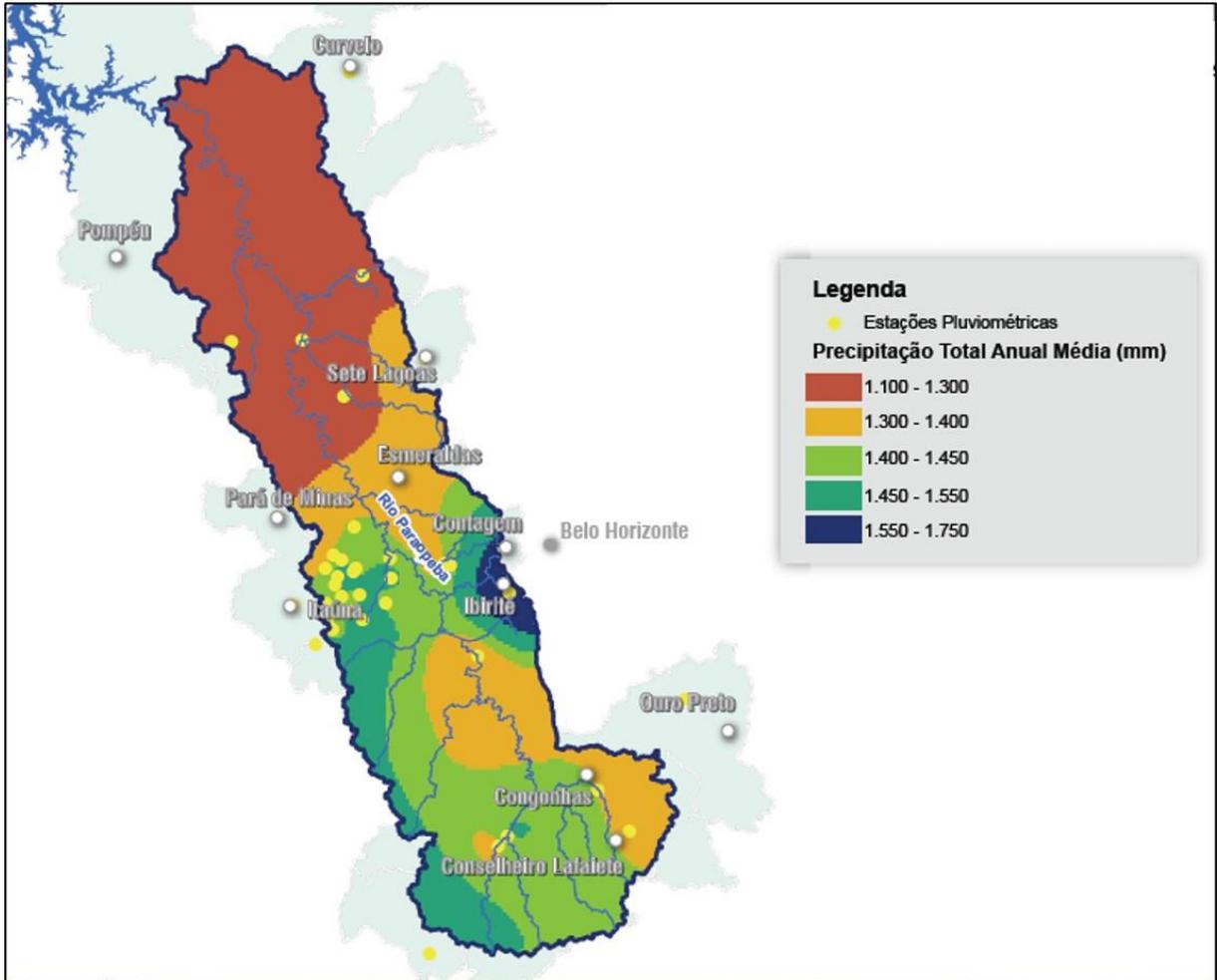
Na região da bacia hidrográfica do rio Paraopeba são, de acordo com ANA (2023), observadas 299 estações pluviométricas no total, entre as quais 183 constam como operantes. Entretanto, de acordo com COBRAPE (2020), apenas 53 possuem dados disponíveis para consulta e análise, das quais apenas 28 estão em operação. Essa condição ocorre devido à existência de empresas que operam as estações sem fornecimento dos dados (COBRAPE, 2020).

Quanto à densidade das estações, a bacia hidrográfica do rio Paraopeba apresenta um valor aproximado de 429,65 km²/estação, quando observadas as 28 estações operantes, e 226,98 km²/estação, quando são consideradas as 53 estações com dados disponíveis (COBRAPE, 2020).

Considerando-se a existência de dados de monitoramento pluviométrico para a bacia de 1941 a 2018, foi considerada a série de 30 anos, neste intervalo, com menor número de dados ausentes, minimizando as falhas (COBRAPE, 2020). Foram utilizados dados de 28 estações disponíveis, ainda em operação, para realização do estudo apresentado por COBRAPE (2020). Logo, após realização da consistência dos dados por parte do autor, este calculou as precipitações totais anuais, utilizando-se a média aritmética da precipitação total de cada ano para cada estação e desconsiderando-se os anos que apresentaram falta de dados. Por fim, os dados foram interpolados e georreferenciados, gerando um mapa com a precipitação total anual média (Figura 31) e o gráfico com a precipitação média mensal (Figura 32), ambos confeccionados por COBRAPE (2020), e tomados como referência no presente trabalho.

A análise da Figura 31 permite identificar que a precipitação total anual média na bacia do rio Paraopeba varia em torno de 1100 a 1750 mm. No Alto Paraopeba estes valores giram em torno de 1300 a 1550 mm. No Médio Paraopeba a variação abrange todo o intervalo identificado para a bacia, entre 1100 a 1750 mm por ano, atingindo a máxima de 1750 mm em porções do município de Ibirité, Betim e Contagem. No Baixo Paraopeba a precipitação total anual média é inferior ao restante da bacia e encontra-se na faixa de 1100 a 1300 mm por ano.

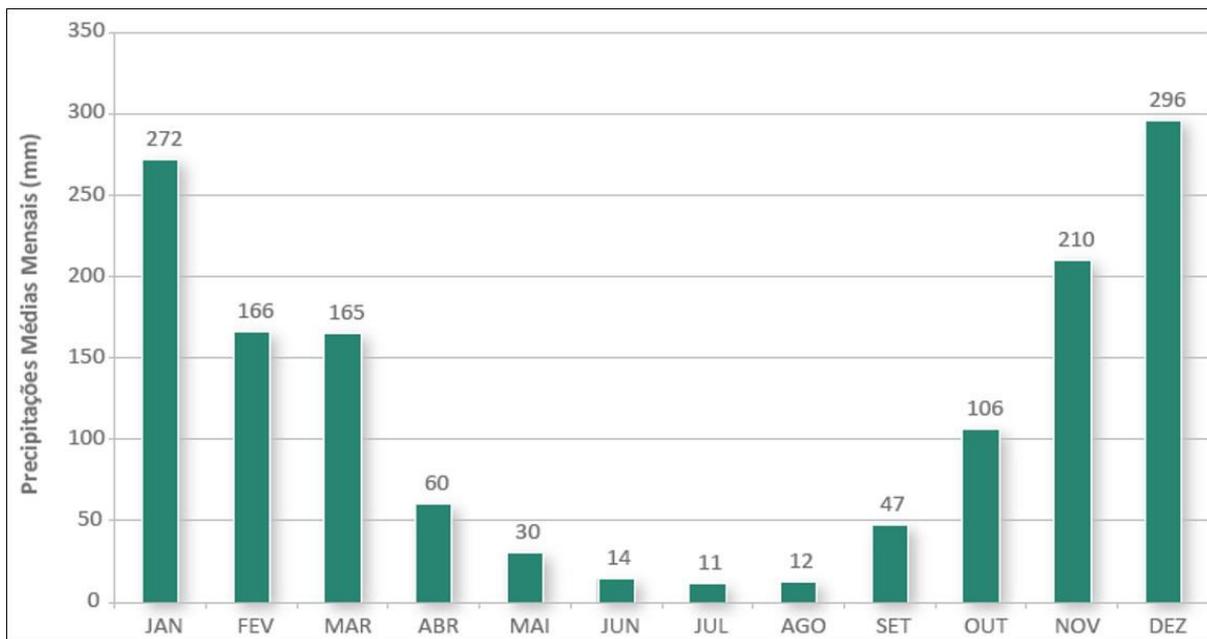
Figura 31 – Precipitação total média anual na bacia do rio Paraopeba.



Fonte: COBRAPE (2020).

De acordo com a Figura 32, as maiores precipitações médias mensais ocorrem, respectivamente, nos meses de dezembro (296 mm), janeiro (272 mm), novembro (210 mm), fevereiro (166 mm), março (165 mm) e outubro (106 mm), todos eles pertencentes ao período chuvoso. No período seco, por sua vez, as precipitações médias mensais encontram-se na faixa de 11 mm, observados para o mês de julho, a 60 mm, observados no mês de abril.

Figura 32 – Precipitação média mensal na bacia do rio Paraopeba.



Fonte: COBRAPE (2020).

Monitoramento fluviométrico

A rede fluviométrica é responsável pela medição dos dados de cotas (cm), vazões (m³/s), qualidade de água, resumo de descarga, sedimentos e perfil transversal. A rede fluviométrica na bacia hidrográfica do rio Paraopeba é composta por 398 estações, entre as quais 281 são apontadas por ANA (2023) como operantes.

De acordo com COBRAPE (2020), para o total de 76 estações operantes apontadas em seu estudo, 64 não apresentam dados; segundo a COBRAPE, isso ocorre provavelmente porque existem empresas que operam as estações, contudo, não fornecem os dados ao HidroWeb.

As estações fluviométricas analisadas no presente trabalho foram inicialmente selecionadas a partir da avaliação do estudo realizado pela empresa Arcadis (2022), o qual apresentou dados fluviométricos para sete estações, entre os anos de 1938 a 2018. Os dados da estação Melo Franco, código 40720002, foram desconsiderados pelo fato de suas coordenadas geográficas obtidas em consulta ao Portal HidroWeb indicarem um local fora do rio Paraopeba, em contradição ao apresentado por Arcadis (2022). Assim, a Tabela 5 e a Figura 33 foram confeccionadas compilando-se informações fornecidas por Arcadis (2022) e ANA (2023).

A Tabela 5 exhibe as estações selecionadas para compor as análises fluviométricas do presente estudo, com seus respectivos códigos, altitudes, áreas de drenagem e vazões de referência Q_{7,10} e Q₉₅. Todas as estações encontram-se no rio Paraopeba (Figura 33), sendo que a estação “São Brás do Suaçuí Montante”, encontra-se no Alto Paraopeba, na altitude mais elevada entre as seis estações analisadas; esta estação possui menor área de drenagem (462

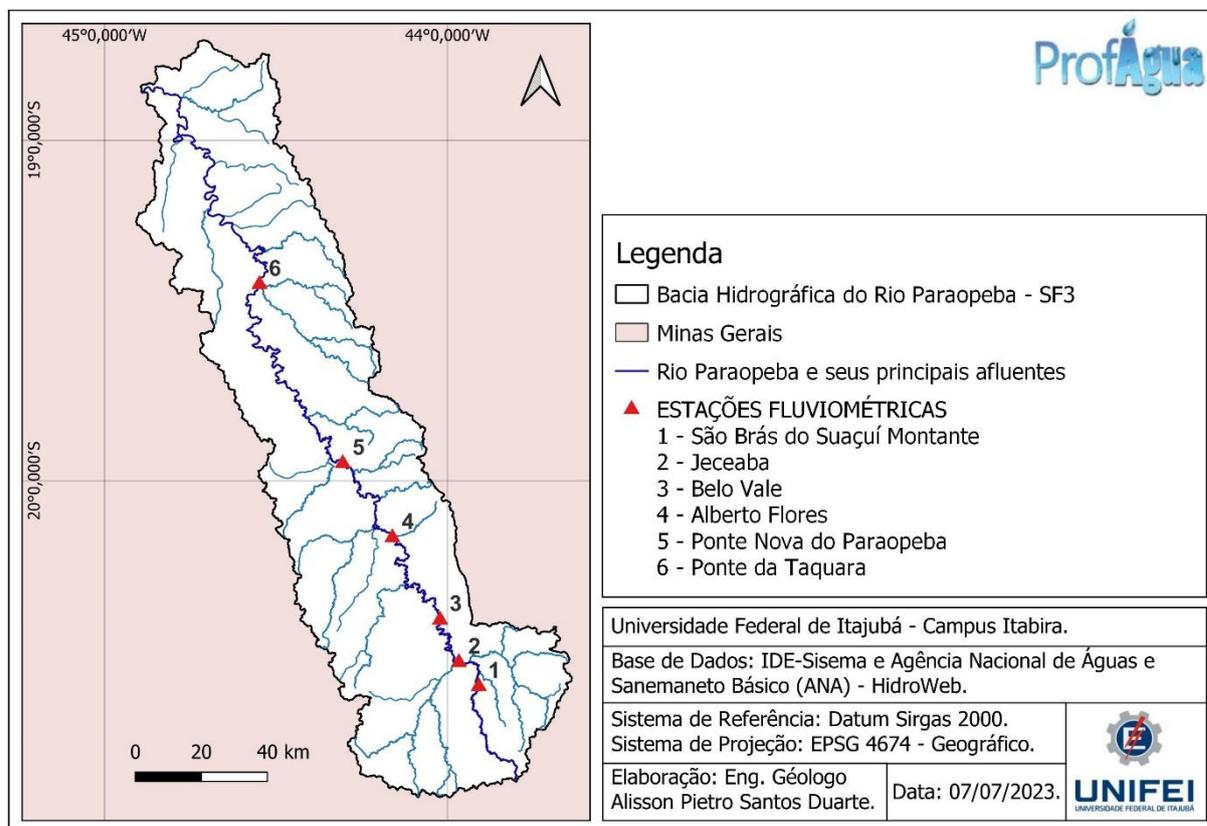
km²), tendo em vista que a bacia de contribuição a montante da estação é menor do que nas demais estações. Partindo-se da estação São Brás do Suaçuí Montante, em direção à foz da bacia, são encontradas, respectivamente, as estações Jeceaba, Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara. Neste sentido, de montante para jusante, observa-se decréscimo da altitude, aumento da área de drenagem e aumento das vazões de referência, conforme observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Estações Fluviométricas situadas no rio Paraopeba, com suas respectivas altitudes, áreas de drenagem e vazões de referência Q_{7,10} e Q₉₅.

Código	Nome	Altitude (m)	Área de drenagem (km ²)	Q _{7,10}	Q ₉₅
40549998	São Brás do Suaçuí Montante	837	462	1,44	2,24
40700002	Jeceaba	832	1340	9,4	12,8
40710000	Belo Vale	787	2770	10,43	14,45
40740000	Alberto Flores	725	4120	13,18	18,22
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	683	5680	17,43	24,29
40850000	Ponte da Taquara	627	8750	21,94	31,74

Fonte: Autor (2023) com base em Arcadis (2022) e ANA (2023).

Figura 33 – Estações fluviométricas consideradas no presente estudo.



Fonte: Autor (2023).

As vazões médias mensais apresentadas nos estudos de Arcadis (2022) na calha principal do rio Paraopeba, referente ao período de 1938 a 2018, informadas na Tabela 6, permitem identificar os meses com maior contribuição ao regime fluviométrico na bacia hidrográfica na área de estudo, para o referido período.

De acordo com a Tabela 6, as estações a jusante apresentam maiores vazões médias mensais em relação às estações a montante. Isto ocorre em função do volume acumulado, proporcional à área de drenagem que compõe a bacia de contribuição de cada estação. A velocidade com que as águas fluem ao longo do rio Paraopeba também influenciam na vazão, que é dada pela razão entre o volume de água (m³) e o tempo (s); isto faz com que as regiões caracterizadas por grandes declives assumam vazões mais elevadas, decorrentes das maiores velocidades assumidas pelas águas frente aos grandes desníveis. Neste contexto, a elevada diferença de altitude entre as estações São Brás do Suaçuí Montante e Jeceaba, contribuem para que as vazões médias mensais da estação Jeceaba se elevem e cheguem a superar um pouco, nos meses de fevereiro e março, as vazões observadas para a estação Belo Vale, a jusante, configurando um comportamento contrário à tendência principal verificada na bacia.

Tabela 6 – Vazões médias mensais (m³/s) na calha do rio Paraopeba, no período de 1938 a 2018.

Estação	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
São Brás do Suaçuí Montante	17,29	12,22	10,48	7,36	5,46	4,57	3,86	3,34	3,58	4,47	7,25	12,35
Jeceaba	75,40	81,30	69,74	46,33	32,08	27,81	22,48	19,36	18,67	22,29	33,73	69,01
Belo Vale	110,14	78,74	68,26	46,90	33,83	28,49	24,17	20,95	21,88	28,89	47,83	81,78
Alberto Flores	134,25	100,75	84,68	59,08	43,54	36,35	30,91	26,50	26,94	35,84	58,48	98,68
Ponte Nova do Paraopeba	172,47	143,70	123,97	84,15	60,79	50,86	43,10	36,53	36,52	46,09	74,65	132,41
Ponte da Taquara	267,64	198,07	172,25	118,15	83,55	69,13	57,60	48,60	48,64	62,70	109,60	198,23

Fonte: Adaptado de Arcadis (2022).

Outros fatores que também podem influenciar para que as vazões observadas em uma estação a montante superem as vazões médias mensais de uma estação a jusante, são as taxas de infiltração, de acordo com os solos e rochas aflorantes na calha do rio Paraopeba, condições de fluxo residual decorrentes da exploração das águas subterrâneas e também a influência dos

barramentos e captações, que tendem a reduzir, localmente, as vazões. Vale ressaltar que os barramentos, sejam para fins de captação ou não, devem ser devidamente regularizados, junto ao IGAM, por meio de processo de outorga, conforme evidenciado na Tabela 2.

Segundo Arcadis (2022), as variações fluviométricas, principalmente aquelas ocorridas no período chuvoso, correspondem a aspectos hidrodinâmicos de grande influência na qualidade das águas de um corpo hídrico. Segundo o autor, esta influência ocorre em função do arraste de sedimentos oriundos do escoamento superficial, suspensão de material alocado nas calhas dos cursos d'água e intensificação dos processos erosivos associados às variações de velocidade da água.

A elevação das vazões ocorrida ao longo do curso do rio Paraopeba favorece movimentos turbulentos, os quais podem colocar em suspensão resquícios de rejeitos da B-I, remanescentes na calha do rio. A presença de materiais finos, principalmente nas frações silte e argila, na calha do rio Paraopeba, contribui para a redução da capacidade de infiltração destas águas no solo, com conseqüentemente decréscimo do potencial de recarga dos aquíferos subterrâneos, aumento das vazões e do fluxo superficial.

6.3 Gênese provável dos elementos químicos selecionados como parâmetros que compõem os Índices de Resiliência

As possíveis origens dos elementos químicos encontrados no rio Paraopeba estão associadas, principalmente, à geologia local e a fontes de contaminação antrópica, sobretudo ao rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão ocorrida em Brumadinho. A seguir, serão apresentadas evidências da origem geogênica de determinados elementos químicos identificados nas águas do rio Paraopeba, bem como potenciais fontes de contaminação antrópica na bacia.

Origem Geogênica

De acordo com o mapa geológico apresentado anteriormente, na Figura 23, a Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba é composta por 44 unidades geológicas. A Tabela 7 indica todas estas unidades geológicas e suas litologias predominantes. As litologias predominantes foram obtidas a partir da tabela de atributos das unidades geológicas trabalhadas no software QGis, conforme metodologia e diretório apresentados anteriormente.

Tabela 7 – Unidades geológicas e suas respectivas litologias.

UNIDADE GEOLÓGICAS	LITOLOGIA(S) PREDOMINANTE(S)
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, depósitos de areia, argila e/ou cascalho
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	Conglomerado, laterita, depósitos de areia e/ou de argila
Complexo Belo Horizonte	Gnaisse
Complexo Bonfim	Gnaisse
Complexo Bonfim - Granodioritos	Granodiorito
Complexo Divinópolis	Granito, granodiorito
Complexo Lavras	Granito, migmatito, granitóide
Complexo Lavras - Gnaisses granulíticos	Gnaisse granulítico, migmatito
Complexo Lavras - Granitos Anatéticos	Granito
Corpo Alto Jacarandá	Granito
Corpo Bom Jardim	Quartzo monzodiorito
Corpo Cupim	Granito
Corpo Granitóides sin- a tarditectônicos	Granodiorito, granito, tonalito
Corpo Intrusivas Graníticas a Tonalíticas	Granito, tonalito
Corpo Itaúna	Tonalito
Corpo Monsenhor Isidro	Gabro
Corpo Rochas metabásicas	Metabasalto
Corpo Samambaia	Tonalito
Corpo Santana do Paraopeba	Granodiorito
Corpo Souza Noschese	Ortognaisse
Depósitos aluviais e coluviais	Conglomerado, arenito conglomerático, arenito, diamictito, lamito
Depósitos aluvionares	Depósitos de areia e ou cascalho
Formação Cauê	Itabirito
Formação Gandarela	Dolomito
Formação Juatuba	Argilito, conglomerado, arenito, siltito
Formação Lagoa do Jacaré	Calcarenito, siltito
Formação Santo Amaro	Arenito
Formação Serra de Santa Helena	Siltito, folhelho
Formação Três Marias	Arcóseo, argilito, siltito
Grupo Caraça	Filito
Grupo Itabira	Itabirito, dolomito
Grupo Itacolomi	Quartzito, filito, metaconglomerado
Grupo Maquiné	Metaconglomerado
Grupo Nova Lima	Xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca
Grupo Nova Lima, associação resedimentada	Metarenito, rocha metapelítica
Grupo Nova Lima, associação vulcânica máfica-ultramáfica	Serpentinito, metagabro
Grupo Nova Lima, associação vulcânica-química	Formação ferrífera bandada (BIF'S), metabasalto komatiítico, metachert
Grupo Piracicaba	Filito, dolomito, xisto
Grupo Sabará	Xisto, metagrauvaca
Membro Lagoa Santa	Calcarenito, calcissiltito
Membro Pedro Leopoldo	Calcissiltito, micrito
Rochas metaultramáficas	Rocha metaultramáfica
Suíte Alto Maranhão	Granito, tonalito, migmatito, granodiorito
Supergrupo Minas	Filito, Dolomito, Itabirito

Fonte: Autor (2023).

A seguir, tem-se um panorama geral sobre a gênese de cada uma das unidades geológicas supracitadas e as regiões onde ocorrem na bacia do rio Paraopeba. Adicionalmente, são listados os principais minerais essenciais e acessórios que compõem cada uma das litologias indicadas na Tabela 7. Vale ressaltar que os minerais essenciais são aqueles cuja composição modal em uma rocha é superior a 10%, ao passo que os minerais acessórios possuem composição modal inferior a 10% e não interferem na classificação da rocha. A composição mineralógica e as fórmulas químicas de cada mineral foram obtidas a partir de SGB (2023) e MHE (2023).

Arcóseo

Rocha sedimentar presente no Baixo Paraopeba, apenas na Formação Três Marias.

Minerais essenciais: Quartzo; ortoclásio; microclínio; muscovita, biotita, clorita, anfibólios, piroxênios; epidoto.

Minerais acessórios: Rutilo, granada, magnetita, turmalina e apatita.

Arenito

Rocha sedimentar presente no Alto e Médio Paraopeba, nos depósitos aluviais, coluviais e nas Formações Juatuba e Santo Amaro.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Arenito conglomerático

Rocha sedimentar presente no Médio Paraopeba nos depósitos aluviais e coluviais.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Argilito

Rocha sedimentar presente no Médio e Baixo Paraopeba, nas Formações Juatuba e Três Marias.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita; illita; caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Não informados.

Calcarenito

Rocha sedimentar presente na bacia do rio Paraopeba na Formação Lagoa do Jacaré e no Membro Lagoa Santa.

Minerais essenciais: Calcita; quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Calcissiltito

Rocha sedimentar presente no Médio e Baixo Paraopeba, nos Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo.

Minerais essenciais: Calcita; quartzo; oligoclásio; andesina; labradorita; bytownita; muscovita; biotita; flogopita; caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita

Minerais acessórios: Paragonita; glauconita; lepidolita; zinnwaldita; margarita.

Conglomerado

Rocha sedimentar presente no Médio e Baixo Paraopeba, junto às coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, nos depósitos aluviais e coluviais e na Formação Juatuba.

Minerais essenciais: Mineralogia variada, podendo ser composta por seixos e calhaus de qualquer tipo de rocha.

Minerais acessórios: Não informados.

Depósitos de areia

Sedimentos ocorrentes no Alto, Médio e Baixo Paraopeba, majoritariamente no Baixo Paraopeba, junto às coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, às coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e aos depósitos aluvionares.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Depósitos de argila

Sedimentos ocorrentes no Alto, Médio e Baixo Paraopeba, majoritariamente no Baixo Paraopeba, junto às coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e às coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas.

Minerais essenciais: Caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita.

Minerais acessórios: Não informados.

Depósitos de cascalho

Sedimentos presentes no Alto e Médio Paraopeba, junto às coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e aos depósitos aluvionares.

Minerais essenciais: Mineralogia variada, podendo ser composta por seixos e calhaus de qualquer tipo de rocha.

Minerais acessórios: Não informados.

Diamictito

Rocha sedimentar presente no Médio Paraopeba, junto aos depósitos aluviais e coluviais.

Minerais essenciais: Rocha conglomerática, com fragmentos dispersos em matriz lamítica, siltico-argilosa, comumente siliciclástica.

Minerais acessórios: Não informados.

Dolomito

Rocha sedimentar presente no Alto e Médio Paraopeba, no Supergrupo Minas, Grupo Itabira, Formação Gandarela e no Grupo Piracicaba.

Minerais essenciais: Dolomita.

Minerais acessórios: Não informados.

Filito

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, no Supergrupo Minas, Grupos Caraça, Itacolomi e Piracicaba.

Minerais essenciais: Quartzo; sanidina; ortoclásio; microclínio; oligoclásio; andesina; labradorita; bytownita; muscovita; clorita; biotita; flogopita; caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita.

Minerais acessórios: Paragonita; glauconita; lepidolita; zinnwaldita; margarita.

Folhelho

Rocha sedimentar presente no Médio e Baixo Paraopeba, somente na Formação Serra de Santa Helena.

Minerais essenciais: Caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita

Minerais acessórios: Calcita; dolomita; pirita; apatita; gipsita.

Formação Ferrífera Bandada – Banded Iron Formation (BIF)

Rochas sedimentares presentes no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação vulcânica-química.

Minerais essenciais: Hematita; quartzo; magnetita; siderita.

Minerais acessórios: Apatita; piroxênios; anfibólios; dolomita; calcita.

Gabro

Rocha ígnea presente no Alto Paraopeba, somente no Grupo Monsenhor Isidoro.

Minerais essenciais: Labradorita; bytownita; biotita; augita; hiperstênio; olivina; hornblenda.

Minerais acessórios: Apatita; magnetita, ilmenita; espinélio; pirita; pirrotita; granada; titanita.

Gnaisse

Rocha metamórfica presente no Médio e Baixo Paraopeba, majoritariamente no Médio Paraopeba, presente nos Complexos Belo Horizonte e Bonfim.

Minerais essenciais: Plagioclásio; quartzo; muscovita; biotita.

Minerais acessórios: Granada; clorita; anfibólios; apatita; turmalina; epidoto; allanita; zircão.

Gnaisse granulítico

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, apresenta apenas no “Complexo Lavras – Gnaisses Granulíticos”.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; oligoclásio; hiperstênio; augita; hornblenda; biotita; magnetita.

Minerais acessórios: Titanita; allanita; zircão; apatita.

Granito

Rocha ígnea presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Complexos Lavras e Divinópolis, “Complexo Lavras – Granitos Anatéticos”, nos Corpos Alto Jacarandá e Cupim, nos Granitóides sin- a tarditectônicos e nas Intrusivas Graníticas a Tonalíticas.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; oligoclásio; andesina.

Minerais acessórios: Biotita; muscovita; hornblenda; titanita; magnetita; ilmenita; apatita; zircão; hematita; pirita; monazita; allanita; turmalina; fluorita; fayalita; granada; epidoto; andaluzita; cordierita; sillimanita; hastingsita; riebeckita; egirina; torita; diopsídio; augita; hiperstênio; hedenberguita; sanidina; clorita; calcita; clinozoisita; zoisita; caulinita; sericita; zeólitas; rutilo; magnetita; hematita; limonita.

Granitóide

Rocha ígnea presente no Alto Paraopeba, somente no Complexo Lavras.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; oligoclásio; andesina.

Minerais acessórios: Biotita; muscovita; hornblenda; titanita; magnetita; ilmenita; apatita; zircão; hematita; pirita; monazita; allanita; turmalina; fluorita; fayalita; granada; epidoto; andaluzita; cordierita; sillimanita; hastingsita; riebeckita; egirina; torita; diopsídio; augita; hiperstênio; hedenberguita; sanidina; clorita; calcita; clinozoisita; zoisita; caulinita; sericita; zeólitas; rutilo; magnetita; hematita; limonita.

Granodiorito

Rocha ígnea presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Complexos “Bonfim – Granodioritos” e Divinópolis, nos Corpos Santana do Paraopeba e Granitóides sin- a tarditectônicos e na Suíte Alto Maranhão.

Minerais essenciais: Quartzo; oligoclásio; microclínio; ortoclásio; hornblenda; biotita.

Minerais acessórios: Magnetita; titanita; allanita; apatita; zircão; rutilo.

Itabirito

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, presente no Supergrupo Minas, Grupo Itabira, Formação Cauê.

Minerais essenciais: Hematita; magnetita; quartzo; calcita; dolomita; piroxênios; granada; anfibólios.

Minerais acessórios: Pirolusita.

Lamito

Rocha sedimentar presente no Médio Paraopeba, nos Depósitos aluviais e coluviais.

Minerais essenciais: Caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita.

Minerais acessórios: Não informados.

Laterita

Rocha sedimentar presente no Alto, Médio e Baixo Paraopeba, majoritariamente no Baixo Paraopeba, nas Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e nas Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas.

Minerais essenciais: Limonita; goethita; hematita; magnetita; pirolusita; manganita; caulinita.

Minerais acessórios: Não informados.

Metabasalto

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, no Corpo “Rochas metabasálticas”.

Minerais essenciais: Augita; pigeonita; olivina; labradorita.

Minerais acessórios: Cromita; ilmenita; apatita; enstatita; pigeonita; olivina; nefelina; serpentina; esmectita; clorita; sericita.

Metabasalto komatiítico

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação vulcânica-química.

Minerais essenciais: Augita; pigeonita; olivina; labradorita.

Minerais acessórios: Cromita; ilmenita; apatita; enstatita; pigeonita; olivina; nefelina; serpentina; esmectita; clorita; sericita.

Metachert

Rocha metamórfica sedimentar presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação vulcânica-química.

Minerais essenciais: Calcedônia; quartzo.

Minerais acessórios: Não informados.

Metaconglomerado

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Grupos Itacolomi e Maquiné.

Minerais essenciais: Mineralogia variada, podendo ser composta por seixos e calhaus de qualquer tipo de rocha.

Minerais acessórios: Não informados.

Metagabro

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação vulcânica máfica-ultramáfica.

Minerais essenciais: Labradorita; bytownita; biotita; augita; hiperstênio; olivina; hornblenda.

Minerais acessórios: Apatita; magnetita, ilmenita; espinélio; pirita; pirrotita; granada; titanita.

Metagrauvaca

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Grupos Nova Lima e Sabará.

Minerais essenciais: Caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita; sericita; clorita; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; quartzo.

Minerais acessórios: Hornblenda; augita; epidoto; serpentina; biotita; magnetita; zircão; turmalina.

Metarenito

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação resedimentada.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Micrito

Rocha sedimentar presente no Médio Paraopeba, somente no Membro Pedro Leopoldo.

Minerais essenciais: Calcita; aragonita.

Minerais acessórios: Não informados.

Migmatito

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, majoritariamente no Alto Paraopeba, no Complexo Lavras, no “Complexo Lavras – Gnaisses Granulíticos” e na Suíte Alto Maranhão.

Minerais essenciais: Quartzo; sanidina; ortoclásio; microclínio; plagioclásio; biotita; hornblenda; epidoto.

Minerais acessórios: Apatita; granada; zircão; muscovita.

Ortognaisse

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, exclusivamente no Corpo Souza Noschese.

Minerais essenciais: Plagioclásio; quartzo; muscovita; biotita.

Minerais acessórios: Granada; clorita; anfibólios; apatita; turmalina; epidoto; allanita; zircão.

Quartzito

Rocha metamórfica presente no Alto Paraopeba, somente no Grupo Itacolomi.

Minerais essenciais: Quartzo; microclínio; ortoclásio; plagioclásio; sericita, illita, caulinita; clorita.

Minerais acessórios: Apatita, augita, biotita, clorita, epidoto, zoisita, granada, hornblenda, ilmenita, limonita, magnetita, monazita, rutilo, titanita, turmalina; zircão.

Quartzo monzodiorito

Rocha ígnea presente no Médio Paraopeba, exclusivamente no Corpo Bom Jardim.

Minerais essenciais: Quartzo; biotita; hornblenda; augita; andesina; oligoclásio; ortoclásio; microclínio.

Minerais acessórios: Apatita; titanita; zircão; magnetita; ilmenita; allanita; granada; pirita; rutilo.

Rocha metamáfica

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, somente no Grupo Nova Lima.

Minerais essenciais: Augita; pigeonita; olivina; labradorita.

Minerais acessórios: Cromita; ilmenita; apatita; enstatita; pigeonita; olivina; nefelina; serpentina; esmectita; clorita; sericita.

Rocha metapelítica

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação resedimentada.

Minerais essenciais: Quartzo; sanidina; ortoclásio; microclínio; oligoclásio; andesina; labradorita; bytownita; muscovita; clorita; biotita; flogopita; caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita.

Minerais acessórios: Paragonita; glauconita; lepidolita; zinnwaldita; margarita.

Rocha metaultramáfica

Rocha metamórfica presente no Alto Paraopeba, na Unidade “Rochas Metaultramáficas”.

Minerais essenciais: Augita; pigeonita; hiperstênio; bronzita; olivina; enstatita.

Minerais acessórios: Magnetita; cromita; flogopita; espinélio; pirita.

Serpentinito

Rocha metamórfica presente no Médio Paraopeba, no Grupo Nova Lima, associação vulcânica máfica-ultramáfica.

Minerais essenciais: Serpentina.

Minerais acessórios: Talco; calcita; dolomita; actinolita; tremolita; clorita.

Siltito

Rocha sedimentar presente no Médio e Baixo Paraopeba, majoritariamente no Baixo Paraopeba, nas Formações Juatuba, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena e Três Marias.

Minerais essenciais: Quartzo; sanidina; ortoclásio; microclínio; oligoclásio; andesina; labradorita; bytownita; muscovita; biotita; flogopita; caulinita; halloysita; antigorita; crisotilo; lizardita; montmorillonita; nontronita; illita; vermiculita.

Minerais acessórios: Paragonita; glauconita; lepidolita; zinnwaldita; margarita.

Tonalito

Rocha ígnea presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Granitóides sin- a tarditectônicos, Intrusivas Graníticas a Tonalíticas, nos Corpos Itaúna e Samambaia e na Suíte Alto Maranhão.

Minerais essenciais: Oligoclásio; andesina; quartzo; biotita; hornblenda; ortoclásio; microclínio; anortoclásio.

Minerais acessórios: Magnetita; ilmenita; apatita; titanita; zircão; pirita; granada.

Xisto

Rocha metamórfica presente no Alto e Médio Paraopeba, nos Grupos Nova Lima, Piracicaba e Sabará.

Minerais essenciais: Clorita; muscovita; talco; biotita; sanidina; ortoclásio; microclínio; plagioclásio; quartzo; granada; andaluzita; sillimanita; cianita; cloritoide; estauroлита; actinolita; grafita; cordierita; epidoto.

Minerais acessórios: Rutilo; turmalina; ilmenita; hematita; apatita; pirita; titanita; calcita, dolomita.

Alguns minerais podem ocorrer tanto como essenciais quanto acessórios, de acordo com o tipo de rocha e porcentagem em que ocorrem. A Tabela 8 indica a fórmula química e o grupo ao qual pertencem os minerais que ocorrem como constituintes essenciais das litologias descritas. Os elementos químicos que compõem os Índices de Resiliência do presente trabalho encontram-se destacados, no intuito de identificar sua origem geogênica na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Tabela 8 – Principais minerais essenciais formadores das litologias presentes nas unidades geológicas da bacia do rio Paraopeba e suas fórmulas químicas. (Continua).

MINERAL / MINERALÓIDE	FÓRMULA QUÍMICA	CLASSE/GRUPO
Actinolita	$(Ca,Na)_2(Mg,Fe^{2+},Al)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Inossilicatos
Andaluzita	Al_2SiO_5	Nossilicatos
Andesina	$(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$	Tectossilicatos
Anfibólios	$(Na,K)_{0-1}Ca_2(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al,Ti)_5(Si_6Al)_8O_{22}(OH,O)_3$	Inossilicatos
Anortoclásio	$(Na,K)AlSi_3O_8$	Tectossilicatos
Antigorita	$(Mg,Fe^{2+})_3Si_2O_5(OH)_4$	Filossilicatos
Aragonita	$CaCO_3$	Carbonatos
Augita	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)_2O_6$	Inossilicatos
Biotita	$K(Mg,Fe^{2+})_3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$	Filossilicatos
Bronzita	$MgSiO_2$	Inossilicatos
Bytownita	$(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$	Tectossilicatos
Calcedônia	SiO_2	Tectossilicatos
Calcita	$CaCO_3$	Carbonatos
Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Filossilicatos
Cianita	Al_2SiO_5	Nossilicatos
Clorita	$(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$	Filossilicatos
Cloritoide	$(Fe^{2+},Mg,Mn)_2Al_4Si_2O_{10}(OH)_4$	Nossilicatos
Cordierita	$(Mg,Fe^{2+})_2Al_4Si_5O_{18}$	Ciclossilicatos
Crisotilo	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Filossilicatos
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Carbonatos
Enstatita	$Mg_2Si_2O_6$	Inossilicatos
Epidoto	$Ca_2Al_2(Fe^{3+},Al)O(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)$	Sorossilicatos
Estaurilita	$(Fe^{2+},Mg)_2Al_9(Si,Al)_4O_{20}(O,OH)_4$	Nossilicatos
Flogopita	$KMg_3Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$	Filossilicatos
Goethita	$FeO(OH)$	Hidróxidos
Grafita	C	Elementos Nativos
Granada	$(Ca,Mg,Fe^{2+},Mn)_3(Al,Fe^{3+},Mn,Cr,Ti^{4+})_2(SiO_4)_3$	Nossilicatos
Halloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Filossilicatos
Hematita	Fe_2O_3	Óxidos
Hiperstênio	$(Mg,Fe^{2+})_2Si_2O_6$	Inossilicatos
Hornblenda	$(Na,K)_{0-1}Ca_2(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al,Ti)_5(Si_6Al)_8O_{22}(OH,O)_2$	Inossilicatos
Illita	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$	Filossilicatos
Labradorita	$(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$	Tectossilicatos
Limonita	$Fe(OH)_3.nH_2O$	Hidróxidos
Lizardita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Filossilicatos
Magnetita	$Fe^{2+}Fe_2O_4$	Óxidos
Manganita	$Mn^{3+}O(OH)$	Hidróxidos
Microclínio	$KAlSi_3O_8$	Tectossilicatos
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	Filossilicatos
Muscovita	$KAl_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$	Filossilicatos

Nontronita	$\text{Na}_{0,3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,n}(\text{H}_2\text{O})$	Filossilicatos
Oligoclásio	$(\text{Na},\text{Ca})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	Tectossilicatos
Olivina	$(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$	Nesosilicatos
Ortoclásio	KAlSi_3O_8	Tectossilicatos
Pigeonita	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Ca})(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$	Inossilicatos
Pirolusita	Mn^{4+}O_2	Óxidos
Piroxênios	XYZ_2O_6 onde X=Mg, Fe, Ca ou Na, Y=Mg, Fe, Fe ₃ ou Al e Z=Si com alguma substituição por Al	Inossilicatos
Plagioclásio	$(\text{Na},\text{Ca})\text{Al}(\text{Si},\text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	Tectossilicatos
Quartzo	SiO_2	Tectossilicatos
Sericita	$\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$	Filossilicatos
Serpentina	$(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Filossilicatos
Siderita	$\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$	Carbonatos
Sillimanita	Al_2SiO_5	Nesosilicatos
Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Filossilicatos
Vermiculita	$(\text{Mg},\text{Fe}^{3+},\text{Al})_3(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Filossilicatos

Fonte: Autor (2023).

(Conclusão).

Entre os 55 minerais essenciais encontrados como constituintes das rochas que ocorrem em toda a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, 32 deles possuem o elemento Alumínio em sua fórmula química, que equivale a 58,18% do número total de minerais essenciais. O elemento Ferro, por sua vez, ocorre em 25 destes minerais (45,45%), enquanto o Manganês ocorre em 4 destes (7,27%). Entretanto, o Chumbo, o Cobre e o Mercúrio não foram identificados na fórmula química de nenhum dos minerais essenciais identificados na bacia do rio Paraopeba, o que remete a uma origem não geogênica para estes três últimos elementos.

Os minerais acessórios comumente encontrados nas litologias descritas para a área de estudo e suas fórmulas químicas encontram-se listados na Tabela 9. Vale ressaltar alguns minerais podem ocorrer como minerais essenciais em algumas rochas e como acessórios em outras, de acordo com a sua porcentagem nas rochas. Os minerais listados na Tabela 9 são aqueles que ocorrem somente como acessórios nas unidades geológicas descritas.

Tabela 9 – Principais minerais acessórios formadores das litologias presentes nas unidades geológicas da bacia do rio Paraopeba e suas fórmulas químicas.

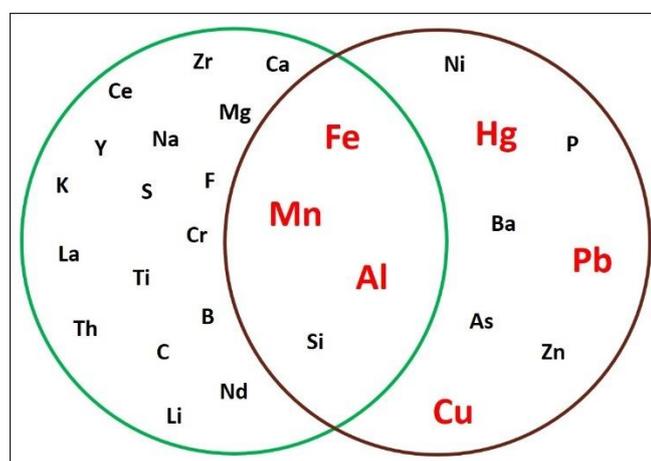
MINERAL / MINERALOIDE	FÓRMULA QUÍMICA	CLASSE/GRUPO
Allanita	$(\text{Ce,Ca,Y})_2(\text{Al,Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	Sorossilicatos
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	Fosfatos
Clinzoisita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$	Sorossilicatos
Cromita	$(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$	Óxidos
Diopsídio	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	Inossilicatos
Egirina	$\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	Inossilicatos
Esmeclita	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2-n}\text{H}_2\text{O}$	Filossilicatos
Espinélio	MgAl_2O_4	Óxidos
Fayalita	Fe_2SiO_4	Nossilicatos
Fluorita	CaF_2	Fluoretos
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfatos
Glauconita	$(\text{K,Na})(\text{Fe}^{3+},\text{Al,Mg})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Filossilicatos
Hastingsita	$\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	Inossilicatos
Hedenberguita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$	Inossilicatos
Ilmenita	$\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$	Óxidos
Lepidolita	$\text{K}(\text{Li,Al})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$	Filossilicatos
Margarita	$\text{CaAl}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Filossilicatos
Monazita	$(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$	Fosfatos
Nefelina	$(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$	Tectossilicatos
Paragonita	$\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Filossilicatos
Pirita	FeS_2	Sulfetos
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ onde $x = 0,0$ a $0,17$	Sulfetos
Riebeckita	$\text{Na}_2[(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_3\text{Fe}^{3+}_2]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Inossilicatos
Rutilo	TiO_2	Óxidos
Sanidina	$(\text{K,Na})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$	Tectossilicatos
Titanita	CaTiOSiO_4	Nossilicatos
Torita	$(\text{Th,U})\text{SiO}_4$	Nossilicatos
Tremolita	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Inossilicatos
Turmalina	$(\text{Na,Ca})(\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Mg,Al,Li})_3(\text{Al,Fe}^{3+},\text{Cr}^{3+},\text{Mg})_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{O,OH,F})_4$	Ciclossilicatos
Zeólitas	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tectossilicatos
Zinnwaldita	$\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$	Filossilicatos
Zircão	ZrSiO_4	Nossilicatos
Zoisita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$	Sorossilicatos

Fonte: Autor (2023).

Diante da avaliação das unidades geológicas identificadas na área de estudo, bem como as principais litologias pertencentes a estas unidades, com seus respectivos minerais essenciais e acessórios constituintes e fórmula química destes, pode-se dizer que os principais elementos químicos associados à origem geogênica, observa-se, na Figura 34, no círculo verde os

principais elementos químicos associados à origem geogênica e no círculo marrom observam-se os principais elementos cuja gênese foi associada por Geovviron (2019) à Barragem B-I. Cabe destacar que os elementos Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al) e Silício (Si) possuem sua gênese associada tanto à origem geogênica quanto aos rejeitos da B-I. Além destes, pode-se observar na Figura 34 os elementos químicos: Arsênio (As), Boro (B), Bário (Ba), Carbono (C), Cálcio (Ca), Cério (Ce), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Flúor (F), Mercúrio (Hg), Potássio (K), Lantânio (La), Lítio (Li), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Neodímio (Nd), Níquel (Ni), Fósforo (P), Chumbo (Pb), Enxofre (S), Tório (Th), Titânio (Ti), Ítrio (Y), Zinco (Zn) e Zircônio (Zr).

Figura 34 – Fluxograma de origem provável dos elementos químicos associados às litologias da área de estudo (círculo verde) e ao rejeito da B-I (círculo marrom).



Fonte: Autor (2023).

Apesar dos elementos químicos As, Ba, Cu, Hg, Ni, P, Pb e Ni estarem associados somente ao rejeito da B-I, é possível que estes possam também ter origem geogênica, associada a minerais acessórios de menor ocorrência na área, tendo em vista que o processo de beneficiamento do minério de Ferro não utiliza adição destes elementos químicos.

Fontes de contaminação antrópica

As fontes de contaminação antrópica na bacia do rio Paraopeba são diversas, distribuídas entre fontes difusas e pontuais, tanto no meio urbano quanto rural. O Estado de Minas Gerais instituiu, no intuito de incentivar às práticas de manejo e tratamento adequado dos efluentes líquidos, deliberações normativas que estabelecem critérios que tornam de conhecimento do Estado o porte e o potencial poluidor de seus empreendimentos.

Foram instituídas ações que preveem a apresentação da Declaração de Carga Poluidora (DCP) por parte dos empreendedores cujas atividades são potencialmente geradoras de efluentes líquidos. Esta declaração é entregue ao IGAM via Sistema de Informações do Estado

(SEI), de acordo com as diretrizes trazidas pela legislação vigente e demais instruções disponibilizadas por este instituto em seu sítio eletrônico (IGAM, 2023).

A DN COPAM nº 217/2017 estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ou de licenciamento ambiental no nível estadual. A DN COPAM/CERH nº 08/2022, por sua vez, determina que para os empreendimentos enquadrados nas classes 3, 4, 5 e 6 a declaração do porte e potencial poluidor deverá ser apresentada anualmente, enquanto aqueles enquadrados nas classes 1 e 2 estão dispensados da declaração (IGAM, 2023).

A partir da Tabela 10 observa-se que o município de Sete Lagoas, parcialmente localizado no Médio Paraopeba, apresenta o maior número de cargas poluidoras declaradas (18,42%), seguido por Betim, integralmente localizado no Médio Paraopeba, com um percentual de cargas poluidoras declaradas de 15,57%. Em seguida está o município de Iatiaiçu (10,31%), Pará de Minas (9,87%) e Brumadinho (7,46%), sendo os dois primeiros parcialmente localizados no Médio Paraopeba e o terceiro integralmente localizado no Médio Paraopeba. Outros municípios apresentam porcentagens inferiores, com destaque para Congonhas (5,48%), Ouro Preto (5,48%), Sarzedo (4,39%), Contagem (3,07%) e São José da Varginha (2,85%). Os demais municípios listados apresentam porcentagens individuais inferiores a 2,00% (Tabela 10).

Tabela 10 – Número de cargas poluidoras declaradas por município com a respectiva porcentagem do total na bacia.

MUNICÍPIOS	Nº DE CARGAS POLUIDORAS DECLARADAS	%
Sete Lagoas	84	18,42
Betim	71	15,57
Itatiaiuçu	47	10,31
Pará de Minas	45	9,87
Brumadinho	34	7,46
Congonhas	25	5,48
Ouro Preto	25	5,48
Sarzedo	20	4,39
Contagem	14	3,07
São José da Varginha	13	2,85
Juatuba	9	1,97
Esmeraldas	7	1,54
Ouro Branco	7	1,54
São Joaquim de Bicas	7	1,54
Belo Vale	6	1,32
Entre Rios de Minas	6	1,32
Ibirité	6	1,32
Mateus Leme	5	1,10
Conselheiro Lafaiete	4	0,88
Paraopeba	4	0,88
Cristiano Ottoni	3	0,66
Jeceaba	3	0,66
Caetanópolis	2	0,44
Curvelo	2	0,44
Maravilhas	2	0,44
Pompéu	2	0,44
Fortuna de Minas	1	0,22
Papagaios	1	0,22
São Brás do Suaçuí	1	0,22
TOTAL	456	100

Fonte: Autor (2023), com base em IGAM (2023).

Em relação às atividades declaradas como geradoras destas cargas poluidoras, observa-se que os dados mais recentes disponibilizados por IGAM (2023) foram publicados em 2021, referentes ao ano base de 2020. Para o total apurado de 456 declarações, há predomínio da lavra de mina a céu aberto, que representa 23,68% das cargas declaradas. O setor siderúrgico ocupa o segundo lugar, com um total de 23,46%, com diferença de apenas uma declaração em relação ao líder do ranking. O abate de animais ocorre em terceiro lugar, com 15,57%. Em seguida ocorrem com o mesmo percentual (6,36%) as atividades de extrações destinadas à construção civil, entre elas a extração de areia e cascalho, produção de brita comercial e atividades correlatas à fabricação de cimento e as atividades relacionadas às Unidades de Tratamento de

Minerais (UTM). Observa-se ampla diversidade entre os setores industriais declarados na área de estudo, os quais podem ser observados, com suas respectivas porcentagens na Tabela 11.

Tabela 11 – Principais atividades geradoras das cargas poluidoras declaradas.

ATIVIDADES	CARGAS POLUIDORAS DECLARADAS - 2020	%
Lavra de mina a céu aberto.	108	23,68
Siderurgia.	107	23,46
Abate de animais.	71	15,57
Extrações destinadas à construção civil (areia, cascalho, brita e fabricação de cimento).	29	6,36
Unidade de tratamento de minerais – UTM.	29	6,36
Fabricação de peças e acessórios para veículos rodoviários, ferroviários e aeronaves.	20	4,39
Armazenamento e distribuição de lubrificantes e combustíveis.	11	2,41
Fabricação de fármacos ou produtos químicos.	11	2,41
Reciclagem de resíduos não perigosos.	11	2,41
Beneficiamento de minerais não metálicos.	7	1,54
Produção e refino de derivados do petróleo.	7	1,54
Tratamento de esgoto sanitário.	7	1,54
Armazenamento e distribuição de gás liquefeito de petróleo - GLP.	5	1,10
Barragens e pilhas de contenção de rejeitos.	5	1,10
Fabricação de explosivos, detonantes e munição.	4	0,88
Dragagem para desassoreamento de corpos d'água.	3	0,66
Fabricação de máquinas, eletrodomésticos e/ou lâmpadas.	3	0,66
Fabricação de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes, solventes e secantes.	3	0,66
Moldagem de termoplástico não organoclorado.	3	0,66
Posto de combustível.	3	0,66
Armazenamento e transporte de resíduos perigosos.	2	0,44
Compostagem de resíduos industriais.	1	0,22
Fabricação de cervejas, chopes e maltes.	1	0,22
Fabricação de laminados e fios de borracha.	1	0,22
Fabricação de material cerâmico.	1	0,22
Fabricação de papel e derivados.	1	0,22
Fabricação de tecidos.	1	0,22
Tratamento de resíduos de serviços de saúde (Grupos A e E com contaminação biológica), visando a redução ou eliminação da carga microbiana, tais como desinfecção química, autoclave ou micro-ondas.	1	0,22
TOTAL	456	100,00

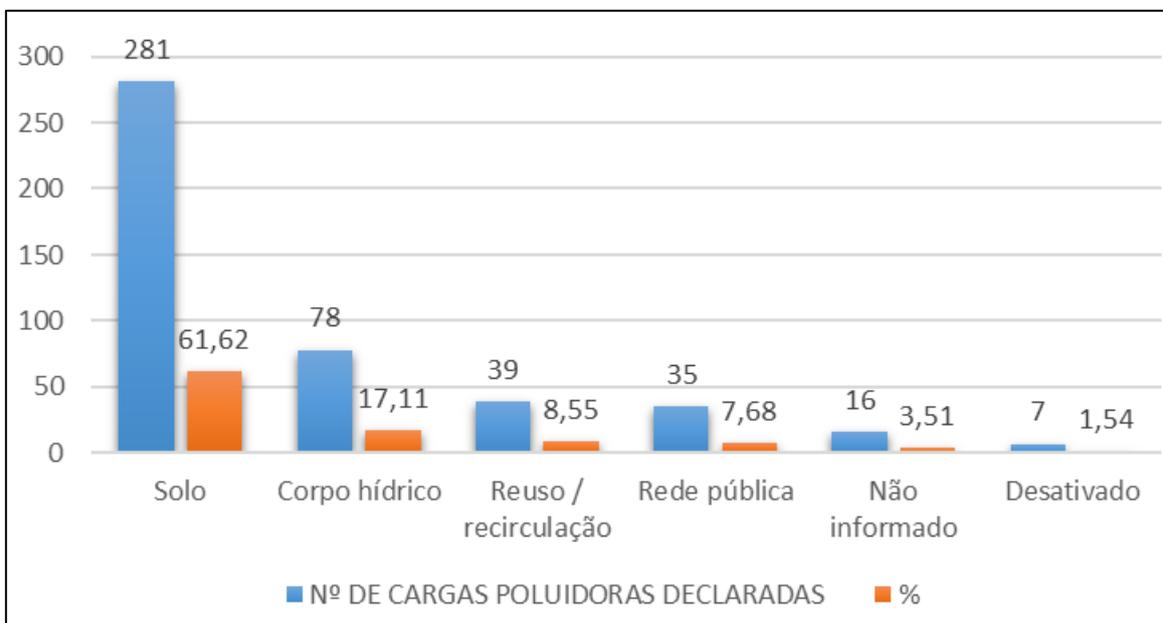
Fonte: Autor (2023), com base em IGAM (2023).

Os locais de lançamento destas cargas poluidoras declaradas variam entre solos, corpos hídricos, águas de reuso ou de recirculação e rede pública. Há também registro de lançamentos sem a devida indicação do local receptor da carga poluidora. A Figura 35 exhibe o quantitativo apurado para cada um dos principais locais de lançamento das cargas poluidoras consideradas no presente trabalho. Observa-se que o lançamento ocorre principalmente nos solos (61,62%),

o que pode corresponder a um risco potencial de contaminação dos recursos hídricos mediante o processo de lixiviação, principalmente no período chuvoso. De acordo com o tipo de solo predominante no local de lançamento das cargas poluidoras, ocorrerá maior ou menor infiltração ou mesmo escoamento superficial dos efluentes lançados, o que culminará em maior ou menor potencial de contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os lançamentos realizados diretamente em corpos hídricos assumem o percentual de 17,11% e representam alto potencial de contaminação dos recursos hídricos superficiais, de acordo com as concentrações de determinados elementos presentes nas cargas poluidoras. As cargas poluidoras utilizadas como reuso ou águas de recirculação correspondem a 8,55% e possuem baixo potencial poluidor em função do tratamento mais restritivo que comumente recebem, com vistas à utilização futura. Os lançamentos junto à rede pública somam 7,68% e possuem potencial poluidor semelhante ao lançamento direto nos corpos hídricos nos locais onde não há um sistema de tratamento de efluentes domésticos bem instaurado. Em contrapartida, nos municípios dotados de um sistema de tratamento de efluentes da rede pública, os riscos de contaminação dos corpos hídricos por estes efluentes industriais são minimizados.

Figura 35 – Principais locais de lançamento das Cargas Poluidoras Declaradas na bacia do rio Paraopeba.



Fonte: Autor (2023), com base em IGAM (2023).

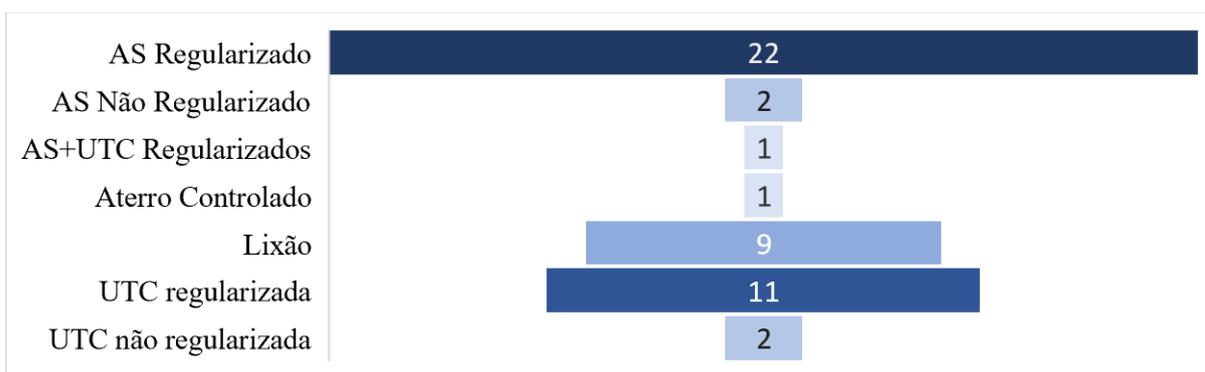
Como demonstrado no capítulo de caracterização da área de estudo, há predomínio dos latossolos (40,27%), cambissolos (33,28%) e de argissolos (16,09%). Os latossolos e os cambissolos possuem maior susceptibilidade ao processo de lixiviação em relação aos argissolos, em função da baixa transmissividade dos argissolos. Os solos ricos em argilas

apresentam moderado a alto potencial de armazenamento de água, porém apresentam baixa transmissividade, ou seja, a água não percola com facilidade entre seus interstícios. Esta característica pode ser aplicada aos efluentes lançados aos solos, que possuirão maior ou menor potencial de alcançar os corpos d'água superficiais e subterrâneos.

Em relação à Política Estadual de Resíduos Sólidos em Minas Gerais, pode-se afirmar que esta é desenvolvida pela FEAM, com apoio de outros entes públicos e privados, em conformidade com a Lei nº 18.031/2009 e com o Decreto nº 47.760/2019, (FEAM, 2023a). Esta política visa ao desenvolvimento, planejamento e monitoramento de programas, projetos, pesquisas e outros instrumentos referentes à reabilitação e recuperação de áreas degradadas. Esta degradação ocorre principalmente devido a atividades de mineração, disposição inapropriada de resíduos sólidos urbanos e industriais, entre outros.

Neste contexto, a Tabela 12 apresenta a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) nos municípios pertencentes totalmente ou parcialmente à bacia hidrográfica do rio Paraopeba. As destinações identificadas na bacia são: aterro sanitário (AS), Unidade de Triagem e Compostagem (UTC), aterro controlado e lixão. Observam-se que entre os aterros sanitários, alguns encontravam-se regularizados no ano de 2018 e outros não regularizados. Estes dados são os mais atuais encontrados entre os materiais disponibilizados nos sítios eletrônicos do Sisema. A Figura 36 informa o quantitativo das tipologias das destinações finais dos RSU na área de estudo.

Figura 36 – Quantitativo das tipologias de destinação final dos RSU na bacia hidrográfica do rio Paraopeba em 2018.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 – Destinação final dos RSU nos municípios da bacia hidrográfica do rio Paraopeba em 2018.

Município	Tipologia	Município	Tipologia
Belo Vale	AS Regularizado	Itaverava	AS Regularizado
Betim	AS Regularizado	Jeceaba	UTC Não Regularizada
Bonfim	AS Regularizado	Juatuba	AS Regularizado
Brumadinho	AS Regularizado	Lagoa Dourada	AS Regularizado
Cachoeira da Prata	AS Regularizado	Maravilhas	Lixão
Caetanópolis	Lixão	Mário Campos	AS Regularizado
Casa Grande	UTC regularizada	Mateus Leme	Aterro Controlado
Congonhas	AS Não Regularizado	Moeda	AS Regularizado
Conselheiro Lafaiete	AS Regularizado	Ouro Branco	AS Regularizado
Contagem	AS Regularizado	Ouro Preto	Lixão
Cristiano Ottoni	UTC regularizada	Papagaios	UTC regularizada
Crucilândia	UTC regularizada	Pará de Minas	AS Regularizado
Curvelo	AS Regularizado	Paraopeba	Lixão
Desterro de Entre Rios	UTC regularizada	Pequi	UTC não regularizada
Entre Rios de Minas	UTC regularizada	Piedade dos Gerais	UTC regularizada
Esmeraldas	Lixão	Pompéu	Lixão
Felixlândia	Lixão	Queluzito	UTC regularizada
Florestal	UTC regularizada	Resende Costa	AS Regularizado
Fortuna de Minas	Lixão	Rio Manso	AS Regularizado
Ibirité	AS Regularizado	São Brás do Suaçuí	UTC regularizada
Igarapé	AS Regularizado	São Joaquim de Bicas	AS+UTC Regularizados
Inhaúma	Lixão	São José da Varginha	UTC regularizada
Itatiaiuçu	AS Regularizado	Sarzedo	AS Regularizado
Itaúna	AS Não Regularizado	Sete Lagoas	AS Regularizado

Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

A partir da análise da Tabela 12 e da Figura 36 observa-se o predomínio de AS regularizados, identificados em 22 dos 48 municípios listados. As UTCs ocorrem em segundo lugar, com um quantitativo também expressivo de 11 municípios, seguidas pelos lixões, por sua vez utilizados para disposição dos RSU em 9 dos municípios da bacia do rio Paraopeba. O estudo indica a presença de dois AS e duas UTC não regularizados, respectivamente nos municípios de Congonhas, Itaúna, Jeceaba e Pequi. Não foram encontrados estudos mais recentes que indiquem posterior regularização por parte destes quatro municípios identificados em 2018 com disposições de RSU em locais não regularizados. O município de São Joaquim de Bicas apresentou disposição preferencial dos RSU tanto em AS quanto em UTC, ambos devidamente regularizados. Por fim, o município de Mateus Leme foi o único que indicou a presença de aterro controlado, dentre todos municípios avaliados por FEAM (2018).

6.4 Análise da série histórica de 2000 a 2018 e determinação dos Índices de Resiliência

A análise dos valores da série histórica de 2000 a 2018, apresentados por IGAM (2019a), permitiu tanto a comparação dos valores pré-rompimento com os valores permitidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022, quanto a determinação dos Índices de Resiliência. Apesar dos Índices de Resiliência propostos não levarem em consideração os limites estabelecidos pela DN supracitada, os valores pré-rompimento foram confrontados com estes limites para que fosse possível identificar os parâmetros que apresentavam extrapolações aos limites estabelecidos, antes mesmo do rompimento da B-I.

6.4.1 Comparação dos valores pré-rompimento com os limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022

A Tabela 13 indica, para cada uma das oito estações avaliadas no presente estudo: em amarelo, os limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022; em vermelho, os valores pré-rompimento, entre os anos de 2000 a 2018, que não satisfazem os limites estabelecidos pela DN supracitada; em verde, os valores pré-rompimento que não excederam os limites estabelecidos pela referida DN. Observa-se, a partir da Tabela 13, que apenas o Mercúrio total não excedeu os limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022 entre os anos de 2000 a 2018, apresentando o mesmo valor em todas as estações.

Tabela 13 – Intervalo de variação dos valores da série histórica de 2000 a 2018 em cada estação e as extrapolações pré-rompimento em relação à DN COPAM/CERH-MG - 08/2022.

Parâmetros	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
Limites Copam/CERH-MG 08/2022	0,1	0,01	0,009	0,3	0,1	0,2	100
Estação BP036	0,1 a 0,35	0,005 a 0,028	0,004 a 0,015	0,06 a 0,98	0,05 a 1,39	0,2	5,9 a 609
Estação BP068	0,08 a 0,54	0,005 a 0,035	0,004	0,05 a 0,97	0,04 a 1,69	0,2	1,1 a 596
Estação BP070	0,02 a 0,60	0,005 a 0,040	0,004	0,06 a 1,57	0,06 a 1,54	0,2	4,1 a 1856
Estação BP072	0,07 a 0,68	0,005 a 0,044	0,004	0,06 a 0,77	0,05 a 1,73	0,2	3,9 a 1268
Estação BP082	0,09 a 0,36	0,005 a 0,023	0,004	0,05 a 0,99	0,03 a 1,14	0,2	3,7 a 1010
Estação BP083	0,07 a 0,18	0,005 a 0,020	0,004 a 0,010	0,04 a 0,56	0,02 a 0,88	0,2	0,8 a 775
Estação BP078	0,07 a 0,39	0,005 a 0,027	0,004 a 0,008	0,03 a 1,19	0,01 a 1,30	0,2	2,5 a 766
Estação BP099	0,04 a 0,26	0,005 a 0,012	0,004	0,03 a 0,44	0,01 a 0,72	0,2	0,6 a 546

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 14, por sua vez, informa os valores médios obtidos a partir da série histórica de monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Paraopeba de 2000 a 2018 e suas extrapolações em relação à DN COPAM/CERH-MG - 08/2022. A convenção de cores é a mesma apresentada para a tabela anterior: em amarelo, os limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH-MG - 08/2022; em vermelho, os que excedem os limites estabelecidos pela DN supracitada; em verde, os valores que não excederam os limites estabelecidos pela referida DN. Observam-se, na Tabela 14, extrapolações dos parâmetros Alumínio dissolvido, Manganês total e Turbidez, enquanto o Chumbo total, Cobre dissolvido, Ferro dissolvido e Mercúrio total apresentam valores médios inferiores ou iguais aos limites estabelecidos.

Tabela 14 – Valores médios da série histórica de 2000 a 2018 em cada estação e as extrapolações pré-rompimento em relação à DN COPAM/CERH-MG - 08/2022.

Parâmetros	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
Limites Copam/CERH-MG 08/2022	0,1	0,01	0,009	0,3	0,1	0,2	100
Estação BP036	0,13	0,007	0,004	0,26	0,35	0,2	107,8
Estação BP068	0,14	0,007	0,004	0,25	0,32	0,2	86,4
Estação BP070	0,15	0,007	0,004	0,26	0,3	0,2	106,5
Estação BP072	0,16	0,007	0,004	0,26	0,29	0,2	113,8
Estação BP082	0,12	0,007	0,004	0,23	0,23	0,2	97,4
Estação BP083	0,11	0,006	0,004	0,17	0,22	0,2	92,7
Estação BP078	0,14	0,007	0,004	0,18	0,23	0,2	100,9
Estação BP099	0,11	0,005	0,004	0,13	0,11	0,2	50,4

Fonte: Autor (2023).

6.4.2 Determinação dos Índices de Resiliência

O produto final deste trabalho corresponde a três Índices de Resiliência dos recursos hídricos, a serem aplicados aos dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais, obtidos pós-rompimento da barragem de rejeitos da Vale S.A. em Brumadinho. Estes índices indicam, com critérios de maior ou menor restrição, os valores a serem alcançados para cada um dos parâmetros avaliados no presente estudo, para que não sejam excedidos, mensalmente, os valores propostos.

Os Índices de Resiliência propostos tomam por base os parâmetros Turbidez (NTU), Ferro dissolvido (mg/L), Manganês total (mg/L), Alumínio dissolvido (mg/L), Chumbo total

(mg/L), Cobre dissolvido (mg/L) e Mercúrio total ($\mu\text{g/L}$). Os três métodos propostos para a determinação dos Índices de Resiliência levam em consideração os resultados obtidos a partir da série histórica de monitoramento da qualidade da água de 2000 a 2018. Para os três métodos foram considerados valores obtidos a partir das estações BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BP083, BP078 e BP099 (Anexo I).

MÉTODO 1

A proposição feita para este método leva em consideração a média entre os valores mínimos e a média entre os valores máximos em cada uma das oito estações consideradas neste estudo. A partir destes valores máximos e mínimos, obtidos para cada um dos parâmetros, foi determinado o Índice de Resiliência proposto a partir do Método 1. Inicialmente, para fins de cálculos, foram adotadas as seguintes convenções:

- MÍNParâmetro = Média dos valores mínimos para o parâmetro entre as oito estações;
- MÁXParâmetro = Média dos valores máximos para o parâmetro entre as oito estações;
- IR1 = Índice de Resiliência obtido pelo Método 1;
- MÍNEstação = Valor mínimo do parâmetro na estação;
- MÁXEstação = Valor máximo do parâmetro na estação.

Desta forma, a média dos valores mínimos e a média dos valores máximos foram obtidas pelas seguintes equações:

Equação 1

$$\text{MínParâmetro} = \frac{\sum \text{MínEstação}}{8}$$

Equação 2

$$\text{MáxParâmetro} = \frac{\sum \text{MáxEstação}}{8}$$

Sendo assim, são apresentados a seguir os cálculos dos valores das médias dos valores mínimos e das médias dos valores máximos para cada um dos parâmetros considerados neste estudo. Em seguida serão apresentados os intervalos que correspondem ao IR1.

ALUMÍNIO DISSOLVIDO (mg/L) - Al

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o Alumínio dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínAl = \frac{\sum MínEstação}{8} = \frac{0,1 + 0,08 + 0,02 + 0,07 + 0,09 + 0,07 + 0,07 + 0,04}{8} = 0,07$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Alumínio dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxAl = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{0,35 + 0,54 + 0,60 + 0,68 + 0,36 + 0,18 + 0,39 + 0,26}{8} = 0,42$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para o Alumínio dissolvido:

$$IR1_{Al} = 0,07 \text{ a } 0,42$$

CHUMBO TOTAL (mg/L) - Pb

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o Chumbo total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínPb = \frac{\sum MínEstação}{8} = \frac{0,005 + 0,005 + 0,005 + 0,005 + 0,005 + 0,005 + 0,005 + 0,005}{8} = 0,005$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Chumbo total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxPb = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{0,028 + 0,035 + 0,040 + 0,044 + 0,023 + 0,020 + 0,027 + 0,012}{8} = 0,029$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para o Chumbo total:

$$IR1_{Pb} = 0,005 \text{ a } 0,029$$

COBRE DISSOLVIDO (mg/L) - Cu

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o Cobre dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínCu = \frac{\sum MínEstação}{8} = \frac{0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004}{8} = 0,004$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Cobre dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxCu = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{0,015 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,010 + 0,008 + 0,004}{8} = 0,007$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para o Cobre dissolvido:

$$IR1_{Cu} = 0,004 \text{ a } 0,007$$

FERRO DISSOLVIDO (mg/L) - Fe

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o Ferro dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínFe = \frac{\sum MÍNEstação}{8} = \frac{0,06 + 0,05 + 0,06 + 0,06 + 0,05 + 0,04 + 0,03 + 0,03}{8} = 0,05$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Ferro dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxFe = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{0,98 + 0,97 + 1,57 + 0,77 + 0,99 + 0,56 + 1,19 + 0,44}{8} = 0,93$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para o Ferro dissolvido:

$$IR1_{Fe} = 0,05 \text{ a } 0,93$$

MANGANÊS TOTAL (mg/L) - Mn

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínMn = \frac{\sum MÍNEstação}{8} = \frac{0,05 + 0,04 + 0,06 + 0,05 + 0,03 + 0,02 + 0,01 + 0,01}{8} = 0,03$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Manganês total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxMn = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{1,39 + 1,69 + 1,54 + 1,73 + 1,14 + 0,88 + 1,30 + 0,72}{8} = 1,30$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para o Manganês total:

$$IR1_{Mn} = 0,03 \text{ a } 1,30$$

MERCÚRIO TOTAL (µg/L) - Hg

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para o Mercúrio total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MínHg = \frac{\sum MÍNEstação}{8} = \frac{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2}{8} = 0,2$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para o Mercúrio total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MáxHg = \frac{\sum MáxEstação}{8} = \frac{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2}{8} = 0,2$$

Sendo assim, tem-se o seguinte Índice de Resiliência para o Mercúrio total:

$$IR1_{Hg} = 0,2$$

TURBIDEZ (NTU)

A partir da Equação 1, a média dos valores mínimos para a Turbidez pode ser obtida da seguinte maneira:

$$\text{MínTurbidez} = \frac{\sum \text{MínEstação}}{8} = \frac{5,9 + 1,1 + 4,1 + 3,9 + 3,7 + 0,8 + 2,5 + 0,6}{8} = 2,8$$

De forma análoga, a partir da Equação 2, a média dos valores máximos para a Turbidez pode ser obtida da seguinte maneira:

$$\text{MáxTurbidez} = \frac{\sum \text{MáxEstação}}{8} = \frac{609 + 596 + 1856 + 1268 + 1010 + 775 + 766 + 546}{8} = 928,2$$

Sendo assim, tem-se o seguinte intervalo correspondente ao IR1 para a Turbidez:

$$\text{IR1}_{\text{Turbidez}} = 2,8 \text{ a } 928,2$$

A partir dos valores calculados, são apresentados, na Tabela 15, os valores mínimos e máximos considerados para a resiliência de cada um dos sete parâmetros avaliados de acordo com o Método 1. Estes valores compõem o Índice de Resiliência obtido pelo Método 1 (IR1) para cada parâmetro. Este intervalo indica uma consolidação dos valores anteriores ao rompimento, obtidos a partir da série histórica de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba de 2000 a 2018. De acordo com o Método 1 proposto, são considerados resilientes os parâmetros cujos valores apurados pós-rompimento encontram-se dentro do IR1.

Tabela 15 – Índice de resiliência obtido pelo Método 1 (IR1) para os parâmetros avaliados.

Parâmetro	Mínimos	Máximos	IR1	Unidade
Alumínio	0,07	0,42	0,07 a 0,42	mg/L
Chumbo	0,005	0,029	0,005 a 0,029	mg/L
Cobre	0,004	0,007	0,004 a 0,007	mg/L
Ferro	0,05	0,93	0,05 a 0,93	mg/L
Manganês	0,03	1,30	0,03 a 1,30	mg/L
Mercúrio	0,2	0,2	0,2	µg/L
Turbidez	2,8	928,2	2,8 a 928,2	NTU

Fonte: Autor (2023).

MÉTODO 2

A proposição feita por este método leva em consideração a média entre os valores médios em cada uma das oito estações consideradas neste estudo. O Índice de Resiliência obtido

a partir dos valores médios indica uma análise da tendência dos valores no decorrer do período analisado, entre 2000 a 2018. Este método exclui os valores anômalos positivos e negativos e refletem a média entre os valores do período chuvoso, que tendem a ser mais elevados, e do período seco, os quais se mostram mais baixos. Este método impõe maior nível de restrição aos valores considerados como resilientes para os parâmetros avaliados, em função dos valores mais elevados, característicos do período chuvoso, excederem os limites estabelecidos pelos índices propostos neste trabalho, na grande maioria dos casos. Para fins de cálculos, foram adotadas as seguintes convenções:

- IR2 = Índice de Resiliência obtido pelo Método 2;
- MédParâmetro = Média dos valores médios para o parâmetro entre as oito estações;
- MédEstação = Valor médio do parâmetro na estação.

Desta forma, as médias dos valores médios foram obtidas pela seguinte equação:

Equação 3

$$MédParâmetro = \frac{\sum MédEstação}{8}$$

Sendo assim, são apresentados a seguir os cálculos dos valores das médias dos valores médios para cada um dos parâmetros considerados neste estudo.

ALUMÍNIO DISSOLVIDO (mg/L) - Al

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Alumínio dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédAl = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,13 + 0,14 + 0,15 + 0,16 + 0,12 + 0,11 + 0,14 + 0,11}{8} = 0,13$$

CHUMBO TOTAL (mg/L) - Pb

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Chumbo total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédPb = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,007 + 0,007 + 0,007 + 0,007 + 0,007 + 0,006 + 0,007 + 0,005}{8} = 0,007$$

COBRE DISSOLVIDO (mg/L) - Cu

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Cobre dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédCu = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004 + 0,004}{8} = 0,004$$

FERRO DISSOLVIDO (mg/L) - Fe

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Ferro dissolvido pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédFe = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,26 + 0,25 + 0,26 + 0,26 + 0,23 + 0,17 + 0,18 + 0,13}{8} = 0,22$$

MANGANÊS TOTAL (mg/L) - Mn

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Manganês total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédMn = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,35 + 0,32 + 0,30 + 0,29 + 0,23 + 0,22 + 0,23 + 0,11}{8} = 0,26$$

MERCÚRIO TOTAL (µg/L) - Hg

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para o Mercúrio total pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédHg = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2}{8} = 0,2$$

TURBIDEZ (NTU)

A partir da Equação 3, a média dos valores médios para a Turbidez pode ser obtida da seguinte maneira:

$$MédTurbidez = \frac{\sum MédEstação}{8} = \frac{107,8 + 86,4 + 106,5 + 113,8 + 97,4 + 92,7 + 100,9 + 50,4}{8} = 94,49$$

A partir dos valores calculados, são apresentados, na Tabela 16, os valores considerados para a resiliência de cada um dos sete parâmetros avaliados de acordo com o Método 2. Estes valores compõem o Índice de Resiliência obtido pelo Método 2 (IR2) para cada parâmetro. De acordo com o Método 2 proposto, são considerados resilientes os parâmetros cujos valores apurados, pós-rompimento, são inferiores ou iguais ao IR2 (Tabela 16).

Tabela 16 – Índice de resiliência obtido pelo Método 2 (IR2) para os parâmetros avaliados.

Parâmetro	IR2	Unidade
Alumínio	0,13	mg/L
Chumbo	0,007	mg/L
Cobre	0,004	mg/L
Ferro	0,22	mg/L
Manganês	0,26	mg/L
Mercurio	0,2	µg/L
Turbidez	94,49	NTU

Fonte: Autor (2023).

MÉTODO 3

A proposição feita por este método leva em consideração os valores mínimos, médios e máximos em cada uma das oito estações e também a precipitação mensal média na bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Foram elaboradas equações capazes de fornecer valores mais próximos às reais condições de resiliência, levando-se em consideração as oscilações decorrentes da sazonalidade, principalmente devido aos diferentes índices de precipitação.

O Método 3 inclui os valores anômalos positivos e negativos e abrange um intervalo, cujo valor mínimo se aproxima da média dos valores médios, calculado no Método 2 e os valores máximos, atribuídos ao mês de dezembro, se igualam aos máximos calculados no Método 1. Desta forma, são atribuídos valores de resiliência mais elevados aos parâmetros nos meses com maior média de precipitação mensal e valores menores aos meses com menor precipitação média mensal. Esta resiliência, proporcional aos índices de precipitação, permite maior aproximação das condições reais, anteriores ao rompimento, em função dos parâmetros considerados elevarem seus valores, naturalmente, no período chuvoso.

Esta proposição do Método 3 leva em consideração o fato do período chuvoso aumentar a susceptibilidade dos corpos hídricos a receberem sedimentos de origem geogênica e também cargas poluidoras de origem antrópica. Pode-se afirmar também que, quanto maiores os índices de precipitação, maiores as chances de movimentos turbulentos nos cursos d'água, com conseqüente aumento da Turbidez e da suspensão de materiais particulados que se encontravam inertes na calha do Paraopeba. Este material particulado pode ter sido depositado antes do rompimento da B-I, com origens diversas, podem ser provenientes da B-I, ou mesmo depositados após o rompimento, com origem externa à B-I. Para fins de cálculos, foram adotadas as seguintes convenções:

- IR3 = Índice de Resiliência obtido pelo Método 3;
- $KR_{\text{Parâmetro}}$ = Constante de resiliência do parâmetro;
- CP = Coeficiente de precipitação.

O cálculo da Constante de resiliência do parâmetro ($KR_{\text{Parâmetro}}$) e do $IR3_{\text{Parâmetro}}$ foi realizado utilizando-se a Equação 4 e a Equação 5, desenvolvidas pelo próprio autor deste trabalho pelo método denominado Modelagem Matemática.

Equação 4

$$KR_{\text{Parâmetro}} = \frac{(CP + 2) \times \text{Precipitação Mensal Máxima}}{[(CP + 1) \times (\text{MáxParâmetro}) - \text{MédParâmetro} - (CP \times \text{MínParâmetro})]}$$

Equação 5

$$IR3_{\text{Parâmetro}} = \frac{\text{MáxParâmetro} + \text{MédParâmetro} + (CP \times \text{MínParâmetro})}{(CP + 2)} + \frac{(\text{Precipitação Média Mensal})}{KR_{\text{Parâmetro}}}$$

De acordo com os estudos apresentados neste trabalho, a Precipitação Mensal Máxima ocorre no mês de dezembro e possui valor modular de 296. Em relação aos coeficientes de precipitação (CP), foram estabelecidos dois coeficientes distintos, sendo um deles aplicável aos parâmetros Alumínio dissolvido, Chumbo total, Cobre dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e Mercúrio total, com valor igual a 6 (seis). Para a Turbidez, o coeficiente de precipitação (CP) recebeu o valor de 16 (dezesesseis). Ambos os coeficientes foram estabelecidos por Modelagem Matemática, considerando-se as premissas listadas no capítulo de materiais e métodos.

Desta forma, aplicando-se o coeficiente de precipitação (CP = 6) às Equações 4 e 5, tem-se as seguintes Equações para o cálculo das KR's e do IR3 para os parâmetros Alumínio dissolvido, Chumbo total, Cobre dissolvido, Ferro dissolvido e Manganês total:

Equação 6

$$KR_{\text{Parâmetro}} = \frac{2368}{(7 \times \text{MáxParâmetro}) - \text{MédParâmetro} - (6 \times \text{MínParâmetro})}$$

Equação 7

$$IR3 = \frac{\text{MáxParâmetro} + \text{MédParâmetro} + (6 \times \text{MínParâmetro})}{8} + \frac{(\text{Precipitação Média Mensal})}{KR_{\text{Parâmetro}}}$$

De forma análoga, aplicando-se o coeficiente de precipitação (CP = 16) às Equações 4 e 5 para o parâmetro Turbidez, tem-se:

Equação 8

$$KRParâmetro = \frac{5328}{(17 \times MáxParâmetro) - MédParâmetro - (16 \times MínParâmetro)}$$

Equação 9

$$RESParâmetro = \frac{MáxParâmetro + MédParâmetro + (16 \times MínParâmetro)}{18} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRParâmetro}$$

Para o Mercúrio total não serão aplicadas as Equações 4 e 5, em caráter de excepcionalidade. Em função da constância deste valor, este será atribuído o mesmo valor a todos os meses, independente da precipitação média mensal.

Logo, tem-se os seguintes cálculos para obtenção do IR3 para cada um dos parâmetros trabalhados no presente trabalho:

ALUMÍNIO DISSOLVIDO (mg/L) - Al

Cálculo da constante de resiliência para o Alumínio dissolvido a partir da Equação 6:

$$KRAL = \frac{2368}{(7 \times MáxAl) - MédAl - (6 \times MínAl)} = \frac{2368}{(7 \times 0,42) - 0,13 - (6 \times 0,07)} = 990,79$$

Cálculo do IR3 para o Alumínio dissolvido, a partir da Equação 7, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3Al = \frac{MáxAl + MédAl + (6 \times MínAl)}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRAL}$$

$$IR3Al = \frac{0,42 + 0,13 + 6 \times 0,07}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{990,79}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Alumínio dissolvido, com valores específicos para cada mês (Quadro 2).

Quadro 2 – IR3 para o parâmetro Alumínio dissolvido – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
0,40	0,29	0,29	0,18	0,15	0,14	0,13	0,13	0,17	0,23	0,33	0,42

Fonte: Autor (2023).

CHUMBO TOTAL (mg/L) - Pb

Cálculo da constante de resiliência para o Chumbo total a partir da Equação 6:

$$KRPb = \frac{2368}{(7 \times MáxPb) - MédPb - (6 \times MínPb)} = \frac{2368}{(7 \times 0,029) - 0,007 - (6 \times 0,005)} = 14265,06$$

Cálculo do IR3 para o Chumbo total, a partir da Equação 7, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3Pb = \frac{MáxPb + MédPb + (6 \times MínPb)}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRPb}$$

$$IR3Pb = \frac{0,029 + 0,007 + 6 \times 0,005}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{14265,06}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Chumbo total, com valores específicos para cada mês (Quadro 3).

Quadro 3 – IR3 para o parâmetro Chumbo total – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
0,027	0,020	0,020	0,012	0,010	0,009	0,009	0,009	0,012	0,016	0,023	0,029

Fonte: Autor (2023).

COBRE DISSOLVIDO (mg/L) - Cu

Cálculo da constante de resiliência para o Alumínio dissolvido a partir da Equação 6:

$$KRCu = \frac{2368}{(7 \times MáxCu) - MédCu - (6 \times MínCu)} = \frac{2368}{(7 \times 0,007) - 0,004 - (6 \times 0,004)} = 112761,90$$

Cálculo do IR3 para o Cobre dissolvido, a partir da Equação 7, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3Cu = \frac{MáxCu + MédCu + (6 \times MínCu)}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRCu}$$

$$IR3Cu = \frac{0,007 + 0,004 + 6 \times 0,004}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{112761,90}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Cobre dissolvido, com valores específicos para cada mês (Quadro 4).

Quadro 4 – IR3 para o parâmetro Cobre dissolvido mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
0,007	0,006	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007

Fonte: Autor (2023).

FERRO DISSOLVIDO (mg/L) - Fe

Cálculo da constante de resiliência para o Ferro dissolvido a partir da Equação 6:

$$KRFe = \frac{2368}{(7 \times MáxFe) - MédFe - (6 \times MínFe)} = \frac{2368}{(7 \times 0,93) - 0,22 - (6 \times 0,05)} = 395,33$$

Cálculo do IR3 para o Ferro dissolvido, a partir da Equação 7, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3Fe = \frac{MáxFe + MédFe + (6 \times MínFe)}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRFe}$$

$$IR3Fe = \frac{0,93 + 0,22 + 6 \times 0,05}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{395,33}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Ferro dissolvido, com valores específicos para cada mês (Quadro 5).

Quadro 5 – IR3 para o parâmetro Ferro dissolvido mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
0,87	0,60	0,60	0,33	0,26	0,22	0,21	0,21	0,30	0,45	0,71	0,93

Fonte: Autor (2023).

MANGANÊS TOTAL (mg/L) - Mn

Cálculo da constante de resiliência para o Manganês total a partir da Equação 6:

$$KRMn = \frac{2368}{(7 \times MáxMn) - MédMn - (6 \times MínMn)} = \frac{2368}{(7 \times 1,30) - 0,26 - (6 \times 0,03)} = 273,44$$

Cálculo do IR3 para o Manganês total, a partir da Equação 7, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3Mn = \frac{MáxMn + MédMn + (6 \times MínMn)}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRMn}$$

$$IR3Mn = \frac{1,30 + 0,26 + 6 \times 0,03}{8} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{273,44}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Manganês total, com valores específicos para cada mês (Quadro 6).

Quadro 6 – IR3 para o parâmetro Manganês total – mg/L (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
1,21	0,82	0,82	0,44	0,33	0,27	0,26	0,26	0,39	0,61	0,99	1,30

Fonte: Autor (2023).

MERCÚRIO TOTAL ($\mu\text{g/L}$) - Hg

Em caráter de excepcionalidade, não serão aplicadas as fórmulas propostas para o cálculo da constante de resiliência (KR_{Hg}) e do $IR3_{Hg}$, visto que:

$$IR3_{Hg} = Mín_{Hg} = Méd_{Hg} = Máx_{Hg} = 0,2$$

Logo, tem-se o mesmo valor para o IR3 em todos os meses do ano para o parâmetro Mercúrio total (Quadro 7).

Quadro 7 – IR3 para o parâmetro Mercúrio total – $\mu\text{g/L}$ (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: Autor (2023).

TURBIDEZ (NTU)

Cálculo da constante de resiliência para a Turbidez a partir da Equação 8:

$$KRTurbidez = \frac{5328}{(17 \times MáxTurbidez) - MédTurbidez - (16 \times MínTurbidez)}$$

$$KRTurbidez = \frac{5328}{(17 \times 928,2) - 94,49 - (16 \times 2,8)} = 0,34$$

Cálculo do IR3 para a Turbidez, a partir da Equação 9, considerando-se as precipitações médias mensais:

$$IR3_{Turbidez} = \frac{MáxTurbidez + MédTurbidez + (16 \times MÍNturbidez)}{18} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{KRTurbidez}$$

$$IR3_{Turbidez} = \frac{928,2 + 94,49 + 16 \times 2,8}{18} + \frac{(Precipitação Média Mensal)}{0,34}$$

Aplicando-se os valores de precipitação média mensal à equação acima, tem-se o IR3 para o parâmetro Turbidez, com valores específicos para cada mês (Quadro 8).

Quadro 8 – IR3 para o parâmetro Turbidez – NTU (azul), considerando-se a precipitação média mensal na bacia (amarelo).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
272 mm	166 mm	165 mm	60 mm	30 mm	14 mm	11 mm	12 mm	47 mm	106 mm	210 mm	296 mm
857,7	546,6	543,7	235,4	147,4	100,4	91,6	94,5	197,3	370,5	675,8	928,2

Fonte: Autor (2023).

A partir dos cálculos e resultados apresentados, a Tabela 17 exibe o IR3 proposto, como produto principal do presente estudo. Este índice indica os valores a serem considerados como resilientes para cada um dos parâmetros avaliados, de acordo com a metodologia apresentada. Vale ressaltar que o período de estiagem ocorre entre os meses de abril e setembro, e o período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março. Pelas razões apresentadas, os meses com maior Média Mensal de Precipitação apresentam valores mais flexíveis em relação à resiliência, em razão das oscilações nos parâmetros decorrentes dos altos índices pluviométricos, conforme supracitado.

Tabela 17 – Índice de Resiliência obtido pelo Método 3 (IR3), considerando-se a precipitação média mensal na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Alumínio	0,40	0,29	0,29	0,18	0,15	0,14	0,13	0,13	0,17	0,23	0,33	0,42
Chumbo	0,02 7	0,020	0,020	0,012	0,010	0,009	0,009	0,009	0,012	0,016	0,023	0,029
Cobre	0,00 7	0,006	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007
Ferro	0,87	0,60	0,60	0,33	0,26	0,22	0,21	0,21	0,30	0,45	0,71	0,93
Manganês	1,21	0,82	0,82	0,44	0,33	0,27	0,26	0,26	0,39	0,61	0,99	1,30
Mercúrio	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Turbidez	857, 7	546,6	543,7	235,4	147,4	100,4	91,6	94,5	197,3	370,5	675,8	928,2

Fonte: Autor (2023).

6.5 Aplicação dos Índices de Resiliência determinados

Os três métodos propostos para obtenção dos Índices de Resiliência, foram aplicados, individualmente, aos valores obtidos pós-rompimento, no intuito de demonstrar a resiliência dos parâmetros considerados, sob diferentes perspectivas de restrição. A partir destes valores que excedem os limites estabelecidos, foi analisado o processo de resiliência mensal e anual dos recursos hídricos, pós-rompimento da B-I, para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022. As cores convencionadas para as tabelas apresentadas a seguir foram as seguintes: azul para os Índices de Resiliência propostos; vermelho para os valores que excedem os limites estabelecidos pelos Índices de Resiliência; verde para os valores que não excedem os limites estabelecidos pelos Índices de Resiliência.

Cabe esclarecer que os “valores não identificados” se referem aos elementos que fizeram parte dos estudos, porém não foi identificada a presença do elemento de acordo com o limite de detecção do método utilizado. Por outro lado, os valores “não informados” correspondem a elementos que não foram considerados no monitoramento mensal realizado pelo IGAM, ou seja, podem estar presentes, porém suas quantificações não foram realizadas.

6.5.1 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 1 – IR1

Conforme demonstrado anteriormente, a partir do Método 1, foi proposto um Índice de Resiliência obtido a partir do intervalo de resiliência, que toma por base os valores mínimos e máximos obtidos para cada parâmetro a partir da série histórica de 2000 a 2018. Apesar do intervalo refletir toda a variação ocorrida entre os anos supracitados, este índice considera resiliente todo valor igual ou inferior ao valor máximo pertencente ao intervalo determinado. Levando-se em consideração o IR1, foram identificados os parâmetros que excederam os limites estabelecidos, de acordo com a proposição deste método para os anos de 2019 (Tabela 18), 2020 (Tabela 19), 2021 (Tabela 20) e 2022 (Tabela 21).

Aplicação mensal do IR1 aos valores de 2019 (pós-rompimento)

No ano de 2019, para os meses de janeiro, fevereiro e março, período imediatamente após o rompimento, observam-se valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR1, para todos os sete parâmetros de qualidade da água considerados neste estudo (Tabela 18). Identifica-se considerável aumento dos valores do Alumínio dissolvido, Chumbo total, Cobre dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e da Turbidez neste período. Para os meses de abril e maio de 2019 não foram encontrados, nos materiais consultados, registros do monitoramento de qualidade da água realizado.

Tabela 18 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR1.

Método 1 2019	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR1	0,07 a 0,42	0,005 a 0,029	0,004 a 0,007	0,05 a 0,93	0,03 a 1,30	0,2	2,8 a 928,2
26/01/19 a 10/03/19	0,02 a 3,32	0,005 a 0,147	0,004 a 0,034	0,03 a 1,82	0,01 a 46,27	0,02 a 4,23	2,6 a 34500
Junho/19	0,09 a 0,47	0,005	Não inform.	Não inform.	0,05 a 0,18	0,2	2,6 a 36,5
Julho/19	0,04 a 0,11	0,005	Não inform.	Não inform.	0,01 a 0,16	0,2	2,3 a 35,8
Agosto/19	0,04 a 0,23	0,005	Não inform.	0,45	0,02 a 0,20	0,2	1,3 a 64,7
Setembro/19	0,04 a 0,12	0,005	Não inform.	0,33	0,01 a 0,28	0,2	1,6 a 48,7
Outubro/19	0,05 a 0,31	0,005	Não inform.	0,75	0,02 a 1,14	0,2	1,1 a 243
Novembro/19	0,12 a 1,07	0,005 a 0,006	Não inform.	0,9	0,06 a 1,38	0,2	6,2 a 317
Dezembro/19	0,38 a 0,50	0,005	Não inform.	0,9	0,11 a 3,94	0,2	104 a 675

Fonte: Autor (2023).

Em 2019 o Alumínio dissolvido excede os valores propostos pelo IR1 nos meses de janeiro, fevereiro, março, junho, novembro e dezembro, com valor máximo de 3,32 mg/L, registrado na série de monitoramento emergencial, entre janeiro e março de 2019. O excedente máximo chegou a 395% do valor calculado para o IR1. O Chumbo exibe extrapolações ao IR1 entre os meses de janeiro e março de 2019, com valor máximo de 0,147 mg/L, que excede em 253% o valor máximo estabelecido pelo IR1. O Cobre dissolvido excede os valores do IR1 de janeiro a março de 2019, com máxima de 0,034 mg/L (243% acima do limite). Vale ressaltar que os valores para o Cobre dissolvidos não foram informados para os meses de abril a dezembro de 2019.

Em 2019, o Ferro dissolvido excede os limites estabelecidos pelo IR1 nos meses de janeiro, fevereiro e março, com máxima de 1,82 mg/L (98% acima do limite). O Manganês excede os limites estabelecidos nos meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro, com expressiva extrapolação entre janeiro e março, com valor máximo registrado de 46,27 mg/L (1780% acima do limite). O Mercúrio total excede os limites estabelecidos pelo IR1 nos meses de janeiro a março, com valor máximo de 4,23 µg/L (1057% acima do limite). A Turbidez assumiu valores bastante elevados entre janeiro a março de 2019, com máxima de 34500 NTU, que excede em 1858% o valor máximo previsto pelo IR1.

Aplicação mensal do IR1 aos valores de 2020 (pós-rompimento)

No ano de 2020, observa-se que as extrapolações ocorrem para o Alumínio dissolvido, Chumbo total, Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez (Tabela 19). Os valores que não satisfazem os limites estabelecidos pelo IR1 ocorrem principalmente no período chuvoso, em especial nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

Tabela 19 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR1.

Método 1 2020	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR1	0,07 a 0,42	0,005 a 0,029	0,004 a 0,007	0,05 a 0,93	0,03 a 1,30	0,2	2,8 a 928,2
Janeiro/20	0,33 a 1,40	0,007 a 0,042	Não inform.	1,32	0,40 a 12,26	0,2	369 a 2498
Fevereiro/20	0,20 a 0,53	0,009 a 0,041	Não inform.	0,45 a 1,06	0,14 a 2,83	0,2	237 a 677
Março/20	0,15 a 0,24	0,005 a 0,019	Não inform.	0,37 a 0,84	0,16 a 3,41	0,2	182 a 798
Abril/20	0,15 a 1,19	0,005 a 0,028	Não inform.	0,29 a 1,00	0,28 a 4,56	0,2	128 a 692
Maió/20	0,08 a 0,16	0,005	Não inform.	0,32 a 0,70	0,06 a 0,66	0,2	23 a 78,8
Junho/20	0,08 a 0,19	0,005	Não inform.	0,21 a 0,54	0,02 a 0,23	0,2	12,4 a 49
Julho/20	0,03 a 0,13	0,005	Não inform.	0,16 a 0,49	0,01 a 0,24	0,2	3,6 a 32,6
Agosto/20	0,03 a 0,15	0,005	Não inform.	0,03 a 0,67	0,01 a 0,14	0,2	2,5 a 16,4
Setembro/20	0,04 a 0,16	0,005	Não inform.	0,09 a 0,70	0,02 a 0,12	0,2	1,7 a 13,4
Outubro/20	0,02 a 0,19	0,005	Não inform.	0,03 a 0,38	0,004 a 0,16	0,2	2,7 a 35,8
Novembro/20	0,02 a 0,63	0,005 a 0,014	Não inform.	0,13 a 0,85	0,02 a 1,24	0,2	5,4 a 448
Dezembro/20	0,07 a 0,36	0,005 a 0,024	Não inform.	0,19 a 1,18	0,02 a 3,00	0,2	17,3 a 849

Fonte: Autor (2020).

O Alumínio dissolvido excede os limites estabelecidos pelo IR1 nos meses de janeiro, fevereiro, abril e novembro, com máxima de 1,40 mg/L (167% acima do limite). O Chumbo total apresenta extrapolações nos meses de janeiro e fevereiro, com máxima de 0,042 mg/L, que excede em 72% o limite estabelecido pelo IR1. O Cobre dissolvido não apresenta valores informados no ano de 2020.

O Ferro dissolvido, em 2020, excede os limites estabelecidos pelo IR1 em janeiro, fevereiro, abril e dezembro, com máxima de 1,32 mg/L (71% acima do limite). O Manganês total apresenta extrapolações nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e dezembro, com máxima de 12,26 mg/L, que excede em 472% o limite estabelecido pelo IR1. O Mercúrio total não apresenta valores excedentes aos limites estabelecidos pelo IR1 em 2020. A Turbidez, em

2020, apresenta extrapolações somente no mês de janeiro, com máxima de 2498 NTU, que ultrapassa o limite aceitável pelo IR1 em 135%.

Aplicação mensal do IRI aos valores de 2021 (pós-rompimento)

No ano de 2021, observa-se que as extrapolações aos limites estabelecidos pelo IR1 ocorrem para o Alumínio dissolvido, Cobre dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez (Tabela 20). Os valores que não satisfazem os limites ocorrem somente no período chuvoso, nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

Tabela 20 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR1.

Método 1 2021	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR1	0,07 a 0,42	0,005 a 0,029	0,004 a 0,007	0,05 a 0,93	0,03 a 1,30	0,2	2,8 a 928,2
Janeiro/21	0,09 a 2,04	0,005 a 0,016	Não inform.	0,16 a 1,13	0,07 a 1,49	0,2	101 a 789
Fevereiro/21	0,07 a 0,54	0,005 a 0,017	0,004 a 0,021	0,17 a 0,86	0,05 a 1,67	0,2	41,7 a 579
Março/21	0,04 a 0,22	0,005 a 0,009	0,004	0,11 a 0,40	0,04 a 0,66	0,2	77,8 a 415
Abril/21	0,06 a 0,19	0,005 a 0,007	0,004	0,16 a 0,52	0,02 a 0,41	0,2	7,8 a 70,1
Mai/21	0,05 a 0,09	0,01	Não ident.	0,12 a 0,76	0,02 a 0,09	0,2	6 a 24,9
Junho/21	0,02 a 0,22	0,01	Não ident.	0,03 a 0,76	0,02 a 0,21	0,2	2,6 a 32,4
Julho/21	0,02 a 0,09	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,12	0,2	1,4 a 65,2
Agosto/21	0,02 a 0,15	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,10	0,2	2,6 a 24,8
Setembro/21	0,02 a 0,16	0,01	Não ident.	0,03 a 0,34	0,02 a 0,16	0,2	1,6 a 40,7
Outubro/21	0,02 a 0,31	0,01	Não ident.	0,03 a 0,50	0,05 a 0,73	0,2	13,2 a 188
Novembro/21	0,13 a 0,40	0,005 a 0,014	Não ident.	0,14 a 0,58	0,01 a 3,22	0,2	40,6 a 1140
Dezembro/21	0,10 a 0,63	0,005 a 0,027	Não ident.	0,10 a 0,53	0,08 a 0,99	0,2	79,7 a 1400

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido excede os limites estabelecidos pelo IR1 nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, com máxima de 2,04 mg/L (243% acima do limite). O Chumbo total se mostra resiliente no ano de 2021, sendo que todos os valores observados neste ano se encontram em conformidade com os limites estabelecidos pelo IR1. O Cobre dissolvido apresentou extrapolação no mês de fevereiro de 2021, com máxima de 0,021 mg/L, que excede em 150% o limite estabelecido pelo IR1. Vale ressaltar que não foram apresentados valores para o

parâmetro Cobre dissolvido em janeiro de 2021, ao passo que, entre maio e dezembro do referido ano, foi informada ausência deste elemento a partir dos métodos de detecção utilizados.

O Ferro dissolvido, em 2021, excedeu os limites estabelecidos pelo IR1 somente no mês de janeiro, com valor máximo de 1,13 mg/L (61% acima do limite). O Manganês total excedeu os limites do IR1 nos meses de janeiro, fevereiro e novembro, com máxima de 3,22 mg/L (124% acima do limite). O Mercúrio total se mantém resiliente para o ano de 2021, sem exceder os valores estabelecidos pelo IR1. A Turbidez mostrou-se resiliente de janeiro a outubro de 2021, de acordo com o IR1, porém ocorreram extrapolações aos limites do IR1 nos meses de novembro e dezembro de 2021, com máxima de 1400 NTU (75% acima do limite).

Aplicação mensal do IR1 aos valores de 2022 (pós-rompimento)

No ano de 2022, observa-se que as extrapolações aos limites estabelecidos pelo IR1 ocorrem para o Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez (Tabela 21). Assim como no ano anterior, todas os valores que não satisfazem os limites do IR1 foram verificados no período chuvoso, mais especificamente nos meses de janeiro, outubro, novembro e dezembro.

Tabela 21 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR1.

Método 1 2022	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR1	0,07 a 0,42	0,005 a 0,029	0,004 a 0,007	0,05 a 0,93	0,03 a 1,30	0,2	2,8 a 928,2
Janeiro/22	0,02 a 4,07	0,005 a 0,009	Não ident.	0,21 a 2,87	0,13 a 0,88	0,2	48,8 a 325
Fevereiro/22	0,05 a 0,22	0,01	Não ident.	0,25 a 0,55	0,06 a 0,93	0,2	81,2 a 322
Março/22	0,02 a 0,22	0,001	Não ident.	0,17 a 0,36	0,04 a 0,45	0,2	22 a 146
Abril/22	0,05 a 0,21	0,005	Não ident.	0,19 a 0,54	0,01 a 0,45	0,2	15 a 136
Mai/22	0,06 a 0,15	0,01	Não ident.	0,23 a 0,59	0,02 a 0,19	0,2	12,7 a 45,4
Junho/22	0,02 a 0,15	0,005	Não ident.	0,07 a 0,77	0,02 a 0,18	0,2	7 a 49
Julho/22	0,04 a 0,11	0,01	Não ident.	0,06 a 0,56	0,01 a 0,50	0,2	3 a 20
Agosto/22	0,05 a 0,10	0,01	Não ident.	0,05 a 0,58	0,01 a 0,11	0,2	2 a 15
Setembro/22	0,02 a 0,13	0,001	Não ident.	0,02 a 0,53	0,01 a 0,10	0,2	2 a 16
Outubro/22	0,04 a 1,15	0,001 a 0,005	Não ident.	0,04 a 1,09	0,02 a 0,40	0,2	7 a 188
Novembro/22	0,02 a 0,40	0,001 a 0,002	Não ident.	0,02 a 0,96	0,01 a 0,32	0,2	3 a 60
Dezembro/22	0,14 a 0,56	0,001 a 0,018	Não ident.	0,14 a 0,71	0,05 a 1,62	0,2	77 a 1018

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido excedeu os limites estabelecidos pelo IR1 nos meses de janeiro, outubro e dezembro, com máxima de 4,07 mg/L (485% acima do limite). O Ferro dissolvido

excede os limites do IR1 em janeiro, outubro e novembro, com máxima de 2,87 mg/L (154% acima do limite). O Manganês total excede os limites do IR1 somente no mês de dezembro, com valor máximo de 1,62 mg/L (62% acima do limite). A Turbidez se mostrou resiliente de janeiro a novembro de 2022, com extrapolação ao limite estabelecida pelo IR1 somente no mês de dezembro, com valor máximo de 1018 NTU (55% acima do limite). Os parâmetros Chumbo total, Cobre dissolvido e Mercúrio total se mostraram resilientes para o ano de 2022, de acordo com o IR1.

6.5.2 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 2 – IR2

A aplicação dos valores pós-rompimento ao IR2 permite identificar quais dos parâmetros considerados neste estudo encontram-se resilientes em cada mês, entre janeiro de 2019 a dezembro de 2022, com exceção dos meses de abril e maio de 2019, conforme supracitado. Em uma visão geral, observa-se que a resiliência obtida a partir do Método 2 é muito menor à obtida pelo Método 1, pelo fato de levar em consideração valores mais restritivos, referentes às médias previamente calculadas.

Aplicação mensal do IR2 aos valores de 2019 (pós-rompimento)

No ano de 2019 todos os parâmetros avaliados excederam os limites propostos para o IR2, com valores mais elevados nos primeiros meses pós-rompimento, de janeiro a março (Tabela 22). O Alumínio dissolvido excede os limites estabelecidos pelo IR2 em praticamente todos os meses apresentados na Tabela 22, com exceção de julho e setembro, com excedente máximo em 1277% acima do limite. O Chumbo total, Cobre dissolvido e Mercúrio total apresentam extrapolações ao IR2 somente até o mês de março, com excedentes aos limites em 1050%, 425% e 1058%, respectivamente. O Ferro dissolvido, em 2019, excede os limites estabelecidos pelo IR2 em todos os meses em que foram fornecidos os dados de monitoramento, com excedente máximo de 98% acima do limite.

Tabela 22 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR2.

Método 2 2019	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR2	0,13	0,007	0,004	0,22	0,26	0,2	94,49
26/01/19 a 10/03/19	0,02 a 3,32	0,005 a 0,147	0,004 a 0,034	0,03 a 1,82	0,01 a 46,27	0,02 a 4,23	2,6 a 34500
Junho/19	0,09 a 0,47	0,005	Não inform.	Não inform.	0,05 a 0,18	0,2	2,6 a 36,5
Julho/19	0,04 a 0,11	0,005	Não inform.	Não inform.	0,01 a 0,16	0,2	2,3 a 35,8
Agosto/19	0,04 a 0,23	0,005	Não inform.	0,45	0,02 a 0,20	0,2	1,3 a 64,7
Setembro/19	0,04 a 0,12	0,005	Não inform.	0,33	0,01 a 0,28	0,2	1,6 a 48,7
Outubro/19	0,05 a 0,31	0,005	Não inform.	0,75	0,02 a 1,14	0,2	1,1 a 243
Novembro/19	0,12 a 1,07	0,005 a 0,006	Não inform.	0,9	0,06 a 1,38	0,2	6,2 a 317
Dezembro/19	0,38 a 0,50	0,005	Não inform.	0,9	0,11 a 3,94	0,2	104 a 675

Fonte: Autor (2023).

O Manganês total excedeu os limites do IR2 em todos os meses do período chuvoso e também no mês de setembro, com extrapolação máxima de 1780% acima do limite. A Turbidez apresentou valores com extrapolações ao IR2 somente nos meses da estação chuvosa, ou seja, de janeiro a março e de outubro a dezembro, com excedente máximo de 18256% acima do limite. As extrapolações, de acordo com a aplicação do Método 2, indicam grande influência da precipitação na variação dos valores obtidos para os parâmetros analisados pós-rompimento no ano de 2019.

Aplicação mensal do IR2 aos valores de 2020 (pós-rompimento)

Em 2020, foram identificados valores que não satisfazem os limites estabelecidos pelo IR2 para cinco dos sete parâmetros analisados neste estudo (Tabela 23). O Alumínio dissolvido excedeu os limites estabelecidos pelo IR2 em todos os meses, exceto no mês de julho, com extrapolação máxima de 538% acima do limite, ocorrida em janeiro. O Chumbo total apresentou extrapolações principalmente nos meses da estação chuvosa, com excedente máximo ao IR2 (300% acima do limite) no mês de janeiro. O Ferro dissolvido apresentou valores acima dos limites estabelecidos pelo IR2 em todos os meses do ano, com excedente máximo de 71% em janeiro.

Tabela 23 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR2.

Método 2020	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR2	0,13	0,007	0,004	0,22	0,26	0,2	94,49
Janeiro/20	0,33 a 1,40	0,007 a 0,042	Não inform.	1,32	0,40 a 12,26	0,2	369 a 2498
Fevereiro/20	0,20 a 0,53	0,009 a 0,041	Não inform.	0,45 a 1,06	0,14 a 2,83	0,2	237 a 677
Março/20	0,15 a 0,24	0,005 a 0,019	Não inform.	0,37 a 0,84	0,16 a 3,41	0,2	182 a 798
Abril/20	0,15 a 1,19	0,005 a 0,028	Não inform.	0,29 a 1,00	0,28 a 4,56	0,2	128 a 692
Maió/20	0,08 a 0,16	0,005	Não inform.	0,32 a 0,70	0,06 a 0,66	0,2	23 a 78,8
Junho/20	0,08 a 0,19	0,005	Não inform.	0,21 a 0,54	0,02 a 0,23	0,2	12,4 a 49
Julho/20	0,03 a 0,13	0,005	Não inform.	0,16 a 0,49	0,01 a 0,24	0,2	3,6 a 32,6
Agosto/20	0,03 a 0,15	0,005	Não inform.	0,03 a 0,67	0,01 a 0,14	0,2	2,5 a 16,4
Setembro/20	0,04 a 0,16	0,005	Não inform.	0,09 a 0,70	0,02 a 0,12	0,2	1,7 a 13,4
Outubro/20	0,02 a 0,19	0,005	Não inform.	0,03 a 0,38	0,004 a 0,16	0,2	2,7 a 35,8
Novembro/20	0,02 a 0,63	0,005 a 0,014	Não inform.	0,13 a 0,85	0,02 a 1,24	0,2	5,4 a 448
Dezembro/20	0,07 a 0,36	0,005 a 0,024	Não inform.	0,19 a 1,18	0,02 a 3,00	0,2	17,3 a 849

Fonte: Autor (2023).

O Manganês total excedeu os valores estabelecidos pelo IR2 de janeiro a maio e também nos meses de novembro e dezembro de 2020, com extrapolação máxima de 472% acima do limite, observada no mês de janeiro. A Turbidez apresentou excedeu os limites estabelecidos pelo IR2 nos meses de janeiro a abril e também em novembro e dezembro, com extrapolação máximo de 1322% acima do limite, ocorrida em janeiro. Os valores de Cobre dissolvidos não foram informados para o ano de 2020, enquanto o Mercúrio total se mostrou inalterado no ano de 2020 de acordo com o IR2.

Observa-se, assim como em 2019, que a aplicação dos valores do monitoramento pós-rompimento ao IR2 indica forte tendência de extrapolação aos limites estabelecidos durante o período chuvoso (janeiro a março e outubro a dezembro).

Aplicação mensal do IR2 aos valores de 2021 (pós-rompimento)

No ano de 2021 as extrapolações mensais ocorrem praticamente nos mesmos meses observados no ano anterior, de acordo com o IR2 (Tabela 24).

Tabela 24 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR2.

Método 2 2021	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR2	0,13	0,007	0,004	0,22	0,26	0,2	94,49
Janeiro/21	0,09 a 2,04	0,005 a 0,016	Não inform.	0,16 a 1,13	0,07 a 1,49	0,2	101 a 789
Fevereiro/21	0,07 a 0,54	0,005 a 0,017	0,004 a 0,021	0,17 a 0,86	0,05 a 1,67	0,2	41,7 a 579
Março/21	0,04 a 0,22	0,005 a 0,009	0,004	0,11 a 0,40	0,04 a 0,66	0,2	77,8 a 415
Abril/21	0,06 a 0,19	0,005 a 0,007	0,004	0,16 a 0,52	0,02 a 0,41	0,2	7,8 a 70,1
Maió/21	0,05 a 0,09	0,01	Não ident.	0,12 a 0,76	0,02 a 0,09	0,2	6 a 24,9
Junho/21	0,02 a 0,22	0,01	Não ident.	0,03 a 0,76	0,02 a 0,21	0,2	2,6 a 32,4
Julho/21	0,02 a 0,09	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,12	0,2	1,4 a 65,2
Agosto/21	0,02 a 0,15	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,10	0,2	2,6 a 24,8
Setembro/21	0,02 a 0,16	0,01	Não ident.	0,03 a 0,34	0,02 a 0,16	0,2	1,6 a 40,7
Outubro/21	0,02 a 0,31	0,01	Não ident.	0,03 a 0,50	0,05 a 0,73	0,2	13,2 a 188
Novembro/21	0,13 a 0,40	0,005 a 0,014	Não ident.	0,14 a 0,58	0,01 a 3,22	0,2	40,6 a 1140
Dezembro/21	0,10 a 0,63	0,005 a 0,027	Não ident.	0,10 a 0,53	0,08 a 0,99	0,2	79,7 a 1400

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido apresenta excedente máximo, em relação aos limites estabelecidos pelo IR2, de 785% em janeiro, enquanto o Chumbo total apresenta extrapolação máxima de 193%, observada no mês de dezembro, ambos com excedentes máximos observados no período chuvoso. Em 2021, o Cobre dissolvido excede os limites do IR2 somente no mês de fevereiro, com extrapolação máxima de 263% acima do limite.

O Ferro dissolvido novamente apresenta valores superiores aos limites do IR2 em todos os meses do ano, com excedente máximo de 61% acima do limite, referente ao mês de janeiro. O Manganês total manteve sua tendência às extrapolações no período chuvoso, com excedente máximo aos valores determinados pelo IR2 de 124%, registrado no mês de novembro. O Mercúrio total se manteve inalterado em todos os meses do ano de 2021, enquanto a Turbidez manteve sua tendência de extrapolações maiores no período chuvoso, com excedente máximo de 741% acima do limite, no mês de dezembro.

Aplicação mensal do IR2 aos valores de 2022 (pós-rompimento)

No ano de 2022 os valores obtidos a partir do monitoramento pós-rompimento excedem os limites estabelecidos pelo IR2 em meses semelhantes, com tendência à melhoria da qualidade

da água, porém com valores excedentes máximos ainda superiores aos do ano anterior para alguns parâmetros (Tabela 25).

Tabela 25 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR2.

Método 2022	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR2	0,13	0,007	0,004	0,22	0,26	0,2	94,49
Janeiro/22	0,02 a 4,07	0,005 a 0,009	Não ident.	0,21 a 2,87	0,13 a 0,88	0,2	48,8 a 325
Fevereiro/22	0,05 a 0,22	0,01	Não ident.	0,25 a 0,55	0,06 a 0,93	0,2	81,2 a 322
Março/22	0,02 a 0,22	0,001	Não ident.	0,17 a 0,36	0,04 a 0,45	0,2	22 a 146
Abril/22	0,05 a 0,21	0,005	Não ident.	0,19 a 0,54	0,01 a 0,45	0,2	15 a 136
Maió/22	0,06 a 0,15	0,01	Não ident.	0,23 a 0,59	0,02 a 0,19	0,2	12,7 a 45,4
Junho/22	0,02 a 0,15	0,005	Não ident.	0,07 a 0,77	0,02 a 0,18	0,2	7 a 49
Julho/22	0,04 a 0,11	0,01	Não ident.	0,06 a 0,56	0,01 a 0,50	0,2	3 a 20
Agosto/22	0,05 a 0,10	0,01	Não ident.	0,05 a 0,58	0,01 a 0,11	0,2	2 a 15
Setembro/22	0,02 a 0,13	0,001	Não ident.	0,02 a 0,53	0,01 a 0,10	0,2	2 a 16
Outubro/22	0,04 a 1,15	0,001 a 0,005	Não ident.	0,04 a 1,09	0,02 a 0,40	0,2	7 a 188
Novembro/22	0,02 a 0,40	0,001 a 0,002	Não ident.	0,02 a 0,96	0,01 a 0,32	0,2	3 a 60
Dezembro/22	0,14 a 0,56	0,001 a 0,018	Não ident.	0,14 a 0,71	0,05 a 1,62	0,2	77 a 1018

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido foge a esta regra, com extrapolação em 1565% em relação ao IR2 no mês de janeiro de 2022. O Chumbo total apresentou novamente valores superiores aos limites do IR2 em 2022, com extrapolação máxima de 129% acima do limite, por sua vez inferior à máxima do ano anterior. O Cobre dissolvido se mostrou resiliente para o ano de 2022 em relação ao IR2.

Em 2022, pelo terceiro ano consecutivo, o Ferro dissolvido apresentou valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR2 em todos os meses do ano, com excedente máximo de 154% acima do limite, verificado em janeiro. O Manganês total apresentou extrapolação máxima de 62% acima do limite estabelecido pelo IR2, referente ao mês de dezembro, enquanto o Mercúrio total se manteve resiliente para todos os meses, conforme no ano anterior. A Turbidez apresentou valores melhores para o ano de 2022, comparado aos anos anteriores, de acordo com o IR2, mas ainda apresenta uma extrapolação elevada no mês de dezembro, que chega a 539% do limite estabelecido pelo IR2.

6.5.3 Aplicação mensal do Índice de Resiliência proposto pelo Método 3 – IR3

Entre os três métodos propostos para a obtenção dos índices de resiliência, o Método 3 corresponde ao de maior adaptabilidade às intempéries naturais, sobretudo à precipitação. As variações ocasionadas pelo carreamento de sedimentos e cargas poluidoras para os corpos hídricos no período chuvoso são consideradas e conferem maior flexibilidade à resiliência. Trata-se, portanto, de um meio termo entre o Método 1 (menos restritivo) e o Método 2 (mais restritivo). A aplicação dos valores pós-rompimento ao IR3 diminui a tendência de extrapolações somente no período chuvoso e permite uma maior aproximação às reais condições anteriores ao rompimento da B-I em Brumadinho.

Aplicação mensal do IR3 aos valores de 2019 (pós-rompimento)

Assim como observado para os demais métodos apresentados, no de 2019 todos os parâmetros avaliados excederam os limites propostos para o IR3, com valores mais elevados nos primeiros meses pós-rompimento, entre janeiro e março (Tabela 26).

Tabela 26 – Extrapolações mensais dos valores de 2019 em relação ao IR3.

Método 3 2019	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR3	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17
26/01/19 a 10/03/19	0,02 a 3,32	0,005 a 0,147	0,004 a 0,034	0,03 a 1,82	0,01 a 46,27	0,02 a 4,23	2,6 a 34500
Junho/19	0,09 a 0,47	0,005	Não inform.	Não inform.	0,05 a 0,18	0,2	2,6 a 36,5
Julho/19	0,04 a 0,11	0,005	Não inform.	Não inform.	0,01 a 0,16	0,2	2,3 a 35,8
Agosto/19	0,04 a 0,23	0,005	Não inform.	0,45	0,02 a 0,20	0,2	1,3 a 64,7
Setembro/19	0,04 a 0,12	0,005	Não inform.	0,33	0,01 a 0,28	0,2	1,6 a 48,7
Outubro/19	0,05 a 0,31	0,005	Não inform.	0,75	0,02 a 1,14	0,2	1,1 a 243
Novembro/19	0,12 a 1,07	0,005 a 0,006	Não inform.	0,9	0,06 a 1,38	0,2	6,2 a 317
Dezembro/19	0,38 a 0,50	0,005	Não inform.	0,9	0,11 a 3,94	0,2	104 a 675

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido se apresenta em conformidade com os limites estabelecidos pelo IR3 somente nos meses de julho e setembro, com extrapolação máxima de 572% para os meses de fevereiro e março de 2019. O Chumbo total apresenta valores superiores aos limites do IR3 somente entre janeiro e março, com excedente máximo de 368% acima do limite, nos meses de

fevereiro e março. O Cobre dissolvido apresenta extrapolação máxima aos limites estabelecidos pelo IR3 de 283% acima do limite, também nos meses de fevereiro e março.

Em 2019 o Ferro dissolvido apresentou valores em conformidade com os limites estabelecidos pelo IR3 somente para o mês de dezembro, com extrapolação máxima de 152% acima do limite, observada nos meses de fevereiro e março. O Manganês total apresentou excedente máximo ao IR3 de 2821%, referente aos meses de fevereiro e março. O Mercúrio total e a Turbidez apresentaram extrapolações ao IR3 somente nos meses de janeiro a março, com máximas de 1058% e 3173% acima dos limites, respectivamente.

Aplicação mensal do IR3 aos valores de 2020 (pós-rompimento)

Em relação à análise dos valores pós-rompimento para o ano de 2020 de acordo com o IR3, foram observados valores superiores aos limites estabelecidos pelo referido índice para cinco dos sete parâmetros avaliados (Tabela 27).

Tabela 27 – Extrapolações mensais dos valores de 2020 em relação ao IR3.

Método 3 2020	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR3	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17
Janeiro/20	0,33 a 1,40	0,007 a 0,042	Não inform.	1,32	0,40 a 12,26	0,2	369 a 2498
Fevereiro/20	0,20 a 0,53	0,009 a 0,041	Não inform.	0,45 a 1,06	0,14 a 2,83	0,2	237 a 677
Março/20	0,15 a 0,24	0,005 a 0,019	Não inform.	0,37 a 0,84	0,16 a 3,41	0,2	182 a 798
Abril/20	0,15 a 1,19	0,005 a 0,028	Não inform.	0,29 a 1,00	0,28 a 4,56	0,2	128 a 692
Mai/20	0,08 a 0,16	0,005	Não inform.	0,32 a 0,70	0,06 a 0,66	0,2	23 a 78,8
Junho/20	0,08 a 0,19	0,005	Não inform.	0,21 a 0,54	0,02 a 0,23	0,2	12,4 a 49
Julho/20	0,03 a 0,13	0,005	Não inform.	0,16 a 0,49	0,01 a 0,24	0,2	3,6 a 32,6
Agosto/20	0,03 a 0,15	0,005	Não inform.	0,03 a 0,67	0,01 a 0,14	0,2	2,5 a 16,4
Setembro/20	0,04 a 0,16	0,005	Não inform.	0,09 a 0,70	0,02 a 0,12	0,2	1,7 a 13,4
Outubro/20	0,02 a 0,19	0,005	Não inform.	0,03 a 0,38	0,004 a 0,16	0,2	2,7 a 35,8
Novembro/20	0,02 a 0,63	0,005 a 0,014	Não inform.	0,13 a 0,85	0,02 a 1,24	0,2	5,4 a 448
Dezembro/20	0,07 a 0,36	0,005 a 0,024	Não inform.	0,19 a 1,18	0,02 a 3,00	0,2	17,3 a 849

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido apresentou um comportamento distinto do observado para os dois métodos anteriores, com alternância de períodos com extrapolações e sem extrapolações. O excedente máximo ao IR3 para o Alumínio ocorreu no mês de abril, sob registro de valores 331% acima do limite. O Chumbo total apresentou a excedente máximo ao IR3 de 117% no mês de abril, com extrapolações menos expressivas nos meses de janeiro e fevereiro. O Cobre dissolvido não apresentou valores para análise pós rompimento no ano de 2020, o que impede a sua avaliação para o ano de 2020.

O Ferro dissolvido apresentou valores acima dos limites estabelecidos pelo IR3 em todos os meses, exceto em outubro e teve excedente máximo de 160% no mês de agosto. O Manganês total apresentou valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR3 nos meses de janeiro a maio, novembro e dezembro, com extrapolação máxima ao IR3 de 518% no mês de abril. O Mercúrio total mostrou-se resiliente em 2020 para todos os meses, de acordo com o IR3, enquanto a Turbidez apresentou extrapolações nos meses de janeiro a abril, com excedentes máximos de 147% em abril e de 146% em janeiro.

Aplicação mensal do IR3 aos valores de 2021 (pós-rompimento)

No ano de 2021 à análise dos valores pós-rompimento, de acordo com o IR3, demonstrou valores superiores aos limites estabelecidos para seis dos sete parâmetros avaliados no presente estudo (Tabela 28). O Alumínio dissolvido apresentou um comportamento de extrapolações semelhante ao ocorrido no ano de 2020, com oscilação entre períodos nos quais os limites foram satisfeitos e outros onde os limites não foram satisfeitos, de acordo com as proposições do IR3. O excedente máximo ao IR3 para o Alumínio dissolvido em 2021 foi de 255% acima do limite, registrada no mês de janeiro. A análise dos valores para o Chumbo total indicou extrapolações ao IR3 nos meses de junho, julho e agosto, com registro de excedente em 11% acima do limite para os três meses. O Cobre dissolvido indicou valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR3 somente no mês de fevereiro, com máxima de 175% acima do limite.

Tabela 28 – Extrapolações mensais dos valores de 2021 em relação ao IR3.

Método 3 2021	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR3	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17
Janeiro/21	0,09 a 2,04	0,005 a 0,016	Não inform.	0,16 a 1,13	0,07 a 1,49	0,2	101 a 789
Fevereiro/21	0,07 a 0,54	0,005 a 0,017	0,004 a 0,021	0,17 a 0,86	0,05 a 1,67	0,2	41,7 a 579
Março/21	0,04 a 0,22	0,005 a 0,009	0,004	0,11 a 0,40	0,04 a 0,66	0,2	77,8 a 415
Abril/21	0,06 a 0,19	0,005 a 0,007	0,004	0,16 a 0,52	0,02 a 0,41	0,2	7,8 a 70,1
Mai/21	0,05 a 0,09	0,01	Não ident.	0,12 a 0,76	0,02 a 0,09	0,2	6 a 24,9
Junho/21	0,02 a 0,22	0,01	Não ident.	0,03 a 0,76	0,02 a 0,21	0,2	2,6 a 32,4
Julho/21	0,02 a 0,09	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,12	0,2	1,4 a 65,2
Agosto/21	0,02 a 0,15	0,01	Não ident.	0,03 a 0,56	0,01 a 0,10	0,2	2,6 a 24,8
Setembro/21	0,02 a 0,16	0,01	Não ident.	0,03 a 0,34	0,02 a 0,16	0,2	1,6 a 40,7
Outubro/21	0,02 a 0,31	0,01	Não ident.	0,03 a 0,50	0,05 a 0,73	0,2	13,2 a 188
Novembro/21	0,13 a 0,40	0,005 a 0,014	Não ident.	0,14 a 0,58	0,01 a 3,22	0,2	40,6 a 1140
Dezembro/21	0,10 a 0,63	0,005 a 0,027	Não ident.	0,10 a 0,53	0,08 a 0,99	0,2	79,7 a 1400

Fonte: Autor (2023).

Em 2021 o Ferro dissolvido não apresentou valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR3 somente nos meses de março, novembro e dezembro, com registro de excedente máximo de 173% acima do limite, registrado em junho. O Manganês total apresentou extrapolações ao IR3, em 2021, para os meses de janeiro, fevereiro, outubro e novembro, com excedente máximo de 163% acima do limite, registrado em novembro. O Mercúrio total se mostrou resiliente para todos os meses de 2021, enquanto a Turbidez configurou extrapolações ao IR3 nos meses de fevereiro, novembro e dezembro, com excedente máximo de 69% acima do limite, referente ao mês de novembro.

Aplicação mensal do IR3 aos valores de 2022 (pós-rompimento)

Em 2022, os resultados obtidos a partir do monitoramento da qualidade das águas do rio Paraopeba, pós-rompimento, indicou valores superiores aos limites estabelecidos pelo IR3 para cinco dos sete parâmetros avaliados no presente trabalho (Tabela 29).

Tabela 29 – Extrapolações mensais dos valores de 2022 em relação ao IR3.

Método 3 2022	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR3	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17	Ver Tabela 17
Janeiro/22	0,02 a 4,07	0,005 a 0,009	Não ident.	0,21 a 2,87	0,13 a 0,88	0,2	48,8 a 325
Fevereiro/22	0,05 a 0,22	0,01	Não ident.	0,25 a 0,55	0,06 a 0,93	0,2	81,2 a 322
Março/22	0,02 a 0,22	0,001	Não ident.	0,17 a 0,36	0,04 a 0,45	0,2	22 a 146
Abril/22	0,05 a 0,21	0,005	Não ident.	0,19 a 0,54	0,01 a 0,45	0,2	15 a 136
Mai/22	0,06 a 0,15	0,01	Não ident.	0,23 a 0,59	0,02 a 0,19	0,2	12,7 a 45,4
Junho/22	0,02 a 0,15	0,005	Não ident.	0,07 a 0,77	0,02 a 0,18	0,2	7 a 49
Julho/22	0,04 a 0,11	0,01	Não ident.	0,06 a 0,56	0,01 a 0,50	0,2	3 a 20
Agosto/22	0,05 a 0,10	0,01	Não ident.	0,05 a 0,58	0,01 a 0,11	0,2	2 a 15
Setembro/22	0,02 a 0,13	0,001	Não ident.	0,02 a 0,53	0,01 a 0,10	0,2	2 a 16
Outubro/22	0,04 a 1,15	0,001 a 0,005	Não ident.	0,04 a 1,09	0,02 a 0,40	0,2	7 a 188
Novembro/22	0,02 a 0,40	0,001 a 0,002	Não ident.	0,02 a 0,96	0,01 a 0,32	0,2	3 a 60
Dezembro/22	0,14 a 0,56	0,001 a 0,018	Não ident.	0,14 a 0,71	0,05 a 1,62	0,2	77 a 1018

Fonte: Autor (2023).

O Alumínio dissolvido excedeu os limites do IR3 em janeiro, abril, junho e nos meses de outubro a dezembro, com extrapolação máxima de 509% em janeiro. O Chumbo apresentou valores superiores aos limites estabelecidos, apenas nos meses de julho e agosto, com excedente máximo aos limites do IR3 de 11% acima do limite em ambos os meses. O Cobre dissolvido e o Mercúrio total mostraram-se resilientes no ano de 2022 em todos os meses. Vale ressaltar que para os meses nos quais o Cobre dissolvido foi discriminado como “não identificado”, foi aplicado o método de detecção deste elemento químico, porém as concentrações obtidas estiveram abaixo do limite de detecção do método, o que remete a valores próximos de zero.

O Ferro dissolvido apresentou valores em conformidade com os limites do IR3 apenas nos meses de fevereiro, março e dezembro e apresentou excedente máximo de 175% acima do limite, referente ao mês de junho. O Manganês total excedeu os limites propostos pelo IR3 em fevereiro, abril, julho e dezembro de 2022, com extrapolação máxima de 92% acima do limite, apurada no mês de julho. A Turbidez mostrou-se resiliente, em 2022, de janeiro a novembro e apresentou extrapolação somente em dezembro (10% acima do limite estabelecido pelo IR3).

6.5.4 Aplicação anual dos três Índices de Resiliência elaborados

A análise da aplicação dos três Índices de Resiliência elaborados aos valores pós-rompimento, mensalmente, para os anos de 2019 a 2022, permitiu a identificação dos parâmetros que demonstraram, anualmente, extrapolações aos limites estabelecidos por cada um dos três índices. Assim, considerou-se a resiliência anual de cada um dos parâmetros de acordo com a extrapolação ou não dos limites estabelecidos, para o período de um ano. A partir desta análise, o Quadro 9 aponta os parâmetros considerados resilientes para cada um dos anos avaliados, de acordo com cada um dos três Índices de Resiliência elaborados. Análogo à convenção de cores utilizada para indicar a resiliência mensal, as células em verde, no Quadro 9, indicam valores de resiliência anual, enquanto as células em vermelho indicam que no referido ano, de acordo com o método aplicado, em algum momento houve extrapolação aos valores considerados resilientes.

Quadro 9 – Resiliência anual dos parâmetros avaliados, de acordo com o IR1, IR2 e IR3.

Parâmetro	Ano	Alumínio dissolvido (mg/L)	Chumbo total (mg/L)	Cobre dissolvido (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês total (mg/L)	Mercúrio total (µg/L)	Turbidez (NTU)
IR1	2019	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	2020	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
	2021	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	2022	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Red
IR2	2019	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	2020	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
	2021	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
	2022	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Red
IR3	2019	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	2020	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
	2021	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red
	2022	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Red

Fonte: Autor (2023).

Observa-se, a partir do Quadro 9, que o Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez, apesar das melhorias nos resultados de qualidade da água obtidos através do monitoramento pós-rompimento, ainda não são considerados resilientes de acordo com nenhum dos três métodos propostos. O Chumbo total mostrou-se resiliente apenas sob o emprego do IR1 para os anos de 2021 e 2022. O Cobre dissolvido, por sua vez, mostrou-se resiliente apenas para o ano de 2022, de acordo com os três índices elaborados. Por fim, o Mercúrio total mostrou-se resiliente desde 2020, de acordo com o IR1, IR2 e IR3.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições de resiliência dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, em especial no ribeirão Ferro-Carvão e no rio Paraopeba diante das perturbações resultantes do rompimento da B-I no município de Brumadinho nortearam as análises e discussões realizadas no presente trabalho.

A caracterização da área de estudo, que corresponde à bacia hidrográfica do rio Paraopeba, em função de seus aspectos físicos, bióticos e de gestão dos recursos hídricos possibilitou a identificação de diversos aspectos naturais e de influência antrópica na bacia. Este estudo permitiu a compreensão de condicionantes naturais da bacia, tais como a rede principal de drenagens, os principais biomas característicos da bacia, além dos climas predominantes, os quais exercem influência sobre as temperaturas, índices de pluviosidade e outras variáveis importantes para compreensão do ciclo hidrológico na bacia.

O diagnóstico hidrogeológico realizado permitiu a identificação das regiões com maiores volumes de águas subterrâneas passíveis de serem exploradas, situadas no domínio poroso. A identificação dos principais tipos de solo permitiu identificar-se o predomínio de solos com maiores e menores capacidades de infiltração, geração de sedimentos e aptidões agrícolas. A capacidade de infiltração contribui com as recargas de aquíferos e pode favorecer ou não o escoamento superficial. Estas características físico-químicas dos solos estão diretamente relacionadas às litologias que originaram os solos mapeados na região. A análise das unidades geológicas presentes na área de estudo, em função de suas principais rochas e minerais constituintes, bem como suas composições químicas, permitiu identificar-se as unidades com maior potencial de contribuição à origem geogênica dos elementos químicos.

A avaliação do uso e cobertura da terra permitiu identificar-se as áreas mais antropizadas, com maiores potenciais de geração de sedimentos e de cargas poluidoras, os quais podem atingir os recursos hídricos e ocasionar perda da qualidade da água, dificultando a sua capacidade de resiliência. Por outro lado, a compreensão dos instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos pela PNRH permitiu identificar-se os esforços realizados para que a gestão ocorra de forma efetiva, com vistas à preservação dos recursos hídricos. A implementação e exercício dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba evidencia os esforços para conscientização e racionalização do uso da água, tendo em visto a manutenção dos volumes exploráveis sob um modelo de gestão cada vez mais assertivo e eficaz.

A elaboração dos três Índices de Resiliência permitiu obter valores de referência ao estado de qualidade da água anteriores ao rompimento. Foram considerados resilientes os

valores, obtidos a partir do monitoramento pós-rompimento, que se mostraram iguais ou inferiores aos limites estabelecidos pelos índices elaborados. Os três métodos propostos apresentaram diferentes graus de restrição em relação aos valores considerados resilientes, sendo o Método 1 o menos restritivo, o Método 2 o mais restritivo e o Método 3 caracterizado por um grau intermediário de restrição e dotado de maior confiabilidade em relação às condições reais vigentes anteriormente ao rompimento da B-I.

Portanto, cada um dos três Índices de Resiliência pode ser aplicado, individualmente, de acordo com o maior ou menor grau de restrição que se deseja estabelecer. O autor deste trabalho recomenda a aplicação do IR3, pelo fato deste índice refletir melhor as reais condições de resiliência, considerando-se a variável precipitação média mensal, que se mostra com extrema importância para avaliação das condições de resiliência. Entretanto, estudos menos criteriosos poderão tomar por base o IR1, o qual também reflete as condições de resiliência, porém com menor rigor em relação à sazonalidade e variação dos índices pluviométricos. Já o IR2 pode ser utilizado quando o estudo for conduzido à análise de tendências, onde os valores médios corresponderem às variáveis de maior interesse.

A aplicação dos três Índices de Resiliência aos valores pós-rompimento demonstra períodos em que os valores se encontram dentro dos limites permitidos e também valores que excedem estes limites. Ao observar-se a resiliência mensal, percebe-se que há notória melhoria nas condições de resiliência dos parâmetros avaliados, porém, ao avaliar a resiliência anual, conclui-se que ainda há um grande desafio a ser enfrentado, tendo em vista que as condições de resiliência ainda não são satisfatórias.

Diante destes resultados, em relação às hipóteses apresentadas no presente trabalho, pode-se afirmar que, de fato, os rejeitos da barragem depositados na calha deste rio continuam constituindo-se um risco potencial à qualidade das águas e representam um dos principais agentes responsáveis pelo retardo da resiliência das áreas atingidas. Este fato é evidenciado pela não extrapolação, em alguns meses, de alguns parâmetros aos Índices de Resiliência propostos, inclusive em períodos chuvosos, com posterior retrocesso em relação aos valores apresentados. Isto demonstra que, mesmo que os valores se mostrem resilientes por um longo período de tempo, enquanto houverem sedimentos da B-I na calha do rio Paraopeba, estes podem voltar a prejudicar a qualidade da água.

Outra hipótese confirmada é que o arcabouço geológico da bacia contribui para o retardo da resiliência, uma vez que elementos químicos são carreados para os cursos d'água a partir de sedimentos, especialmente no período chuvoso. Diante dos estudos apresentados, esta hipótese

se mostra válida, especialmente sobre os elementos químicos Alumínio, Ferro e Manganês, os quais ocorrem naturalmente nas fórmulas químicas dos minerais que compõem as rochas pertencentes a diversas unidades geológicas mapeadas na área de estudo.

A terceira hipótese, referente à possibilidade das cargas poluidoras provenientes de atividades antrópicas representarem risco à contaminação dos recursos hídricos no rio Paraopeba, com possível retardo do processo de resiliência, também se mostra pertinente, uma vez que a origem do Chumbo total, Cobre dissolvido e Mercúrio total não foi diretamente associada à origem geogênica. Além destes elementos, há indícios de que outros elementos químicos e biológicos oriundos de cargas poluidoras possam comprometer a qualidade das águas no rio Paraopeba, porém recomendam-se mais estudos para que sejam estabelecidas as fontes pontuais e não pontuais de contribuição a esta poluição.

Portanto, recomenda-se que as práticas de contenção do avanço do rejeito e a remoção destes do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba devam continuar sendo executadas em paralelo ao monitoramento, para que futuramente possa ser considerado um estado de real resiliência dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba diante da perturbação ocasionada pelos rejeitos da B-I da Mina Córrego do Feijão. Sugere-se, em estudos futuros, que sejam consideradas outras variáveis capazes de contribuir para o entendimento da oscilação dos valores destes parâmetros na bacia do rio Paraopeba ao longo do ano.

Por fim, ressalta-se que os três Índices de Resiliência elaborados se aplicam exclusivamente à bacia hidrográfica do rio Paraopeba. O autor deste trabalho prevê a elaboração futura de Índices de Resiliência com condições de contorno mais amplas, de modo que a metodologia possa ser aplicada em diversas bacias hidrográficas pelo mundo. Estes estudos futuros deverão considerar a identificação das condições de resiliência não somente diante de desastres ambientais, mas também frente à ação antrópica, que por diversas vezes prejudica a qualidade dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Portal HidroWeb**. 2023. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: mar. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Brasília: 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Report Trimestral Descaracterização de Barragens a Montante**. Brasília. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019**. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. 2019.
- ALAMDARI, N.; SAMPLE, D. J.; LIU, J.; ROSS, A. *Assessing climate change impacts on the reliability of rainwater harvesting systems*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, p. 178-189, 2018.
- ALMEIDA, I. M. de; JACKSON FILHO, J. M.; VILELA, R. A. de G. Origens históricas e organizacionais do desastre da barragem do Córrego do Feijão. **Rev Bras Med Trab**, v. 17, n. 1, p. 13–20, 2019a.
- ALMEIDA, I. M. de; JACKSON FILHO, J. M.; VILELA, R. A. de G. Razões para investigar a dimensão organizacional nas origens da catástrofe industrial da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 4, p. 1-5, 2019b.
- ALVES, C. B. M. *Evaluation of fish passage through the Igarapé Dam fish ladder (rio Paraopeba, Brazil), using marking and recapture*. **Neotropicaç Ichthyology**, v. 5, n. 2, p. 233-236, 2007.
- ANDRADE-AYALA, A.; OSORIO-GARCÉS, C. E.; MARTINEZ-IDROBO, J. P. *Reflexión acerca de la visión de la Gestión Integral de vulnerabilidad por desabastecimiento de agua en zona rural de Colombia*. **Ingeniería Y Competitividad**, v. 21, n. 2, p. 1–14, 2 ago. 2019.

- ANELLI, R. L. S. Uma nova cidade para as águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 69–84, 2015.
- ARAÚJO, R. A. DE *et al.* **Análise do Impacto Ambiental do Rompimento da Barragem de Brumadinho por meio de Índices de Vegetação**. Geotecnologias e Inovações Tecnológicas. **Anais**. 2019.
- ARCADIS. **Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos - Fechamento De Ciclo (25/01/2019 A 31/03/2022)**, dez. 2022.
- AZCUÑA-CASTRO, F.; MEJÍA-VACA, D. E. *Análisis de resiliencia en inversiones de un sistema de riego en base a la comparación de escenarios de cambio climático*. **Investigacion & Desarrollo**, v. 21, n. 1, 31 jul. 2021.
- BECHLER, Reinaldo Guilherme; RIBEIRO, Rosiane. **(Des)Caminhos da Mineração em Brumadinho: presente, passados e futuros [Debate]**. Revista Tempo e Argumento, Florianópolis, v. 11, n. 26, p. 548 - 559, jan./abr. 2019.
- BIONDI, João Carlos. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 528 p.
- BLANCO-LONDOÑO, S. A.; TORRES-LOZADA, P.; GALVIS-CASTAÑO, A. *Identification of resilience factors, variables and indicators for sustainable management of urban drainage systems*. **DYNA (Colombia)**, v. 84, n. 203, p. 126–133, 1 dez. 2017.
- BOLAÑOS-PORTILLA, I. C.; HURTADO-SÁNCHEZ, I. C.; RESTREPO-TARQUINO, I. *Diffuse cognitive maps for analysis of vulnerability to climate variability in andean rural micro-watersheds*. **DYNA (Colombia)**, v. 87, n. 212, p. 38–46, 1 jan. 2020.
- BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). 2020.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e dá outras providências. 2010.

- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. 1997.
- CARVALHO, D. W. DE. Análise das Narrativas de Uma Catástrofe a partir do Direito dos Desastres: O Desastre de Brumadinho, 2019. **Congresso Brasileiro de Direito Ambiental**. Anais. 2019.
- CARVALHO, A. de. **Processos morfogênicos e condicionantes associados aos eventos de entulhamento dos fundos de Vales de afluentes do médio/baixo rio Paraopeba/MG**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- CASTRO, L. V. P. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. Dissertação “Mestrado em Engenharia de Minas”. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CETESB. “Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas de Amostragem”. In: Série Relatórios/CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo 2009**. 2ª edição. Apêndice A. São Paulo/SP, Brasil. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2010.
- COBBING, J. E.; DE WIT, M. *The Grootfontein aquifer: Governance of a hydro-social system at Nash equilibrium*. **South African Journal of Science**, v. 114, n. 5–6, 2018.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS (COBRAPE). Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba / Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. São Paulo, 2020.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Deliberação CERH-MG nº 474, de 23 de dezembro de 2021**. Aprova a metodologia de cobrança pelo uso de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba, na forma da Deliberação Normativa do CBH Paraopeba nº 08, de 24 de novembro de 2021. 2021.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 06 de dezembro de 2017**. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. 2017.

- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Deliberação Normativa COPAM nº 14/1995, de 28 de dezembro de 1995**. Dispõe sobre o enquadramento das águas da bacia do rio Paraopeba. 1995.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS (COPAM/CERH). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. 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. 2022.
- CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CERH). **Deliberação Normativa CERH nº 76, de 19 de abril de 2022**. Define os critérios para a regularização do uso de água subterrânea nas Circunscrições Hidrográficas do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. 2022.
- CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CERH). **Deliberação Normativa CERH - MG nº 09, de 16 de junho de 2004**. Define os usos insignificantes para as circunscrições hidrográficas no Estado de Minas Gerais. 2004.
- COSTA, R. A. DA; PINTO, A. P. E. DE F. Análise Econômico-Financeira da Vale S.A. Após o Acidente em Brumadinho. **Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora - CES/JF**, 2019.
- CUNHA, N. R. D. C.; BECHLER, R. R.; FRANÇA, C. S. Publicização E Sentidos Das Narrativas Históricas Na (In)Formação De Sensibilidades Sobre As Tragédias-Crimes De Minas Gerais. **Revista TransVersos**, n. 18, p. 171–197, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **SUMÁRIO Mineral 2009**. Brasília: DNPM, v. 29, jun. 2010. 104 p.
- DIAMANTINI, E.; LUTZ, S. R.; MALLUCCI, S.; MAJONE, B.; MERZ, R.; BELLIN, A. *Driver detection of water quality trends in three large European river basins*. **Science of The Total Environment**, v. 612, p. 49–62, 2018.
- DOMINGUES, E. *et al.* Impactos Econômicos da Paralisação de Parte da Produção Mineral em Minas Gerais Decorrentes do Desastre de Barragem em Brumadinho. **Revista Eletrônica Gestão e Sociedade**, v. 14, n. 38, p. 3463–3479, 2020.
- ELIZALDE-CASTILLO, F.; DÍAZ-CARAVANTES, R. E.; MORENO VÁZQUEZ, J. L. *Resiliencia en el agua doméstica en comunidades del río Sonora ante el derrame de 2014*. **Economía Sociedad y Territorio**, v. 21, n. 66, p. 569–598, 25 maio 2021.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. Rio de Janeiro, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos *et al.* – 5. ed., revista e ampliada, Brasília, 2018.
- FARIA, E. F. DE; SOUZA, R. M. **Da Responsabilidade Civil do Estado por Omissão Fiscalizatória: Acidentalidade Provocada pelo Rompimento da Barragem de Brumadinho.** *A&C - Revista de Direito Administrativo & Constitucional*, v. 19, n. 78, p. 221–248, 2019.
- FISHER-JEFFES, L. *et al.* *Stormwater harvesting: Improving water security in South Africa's urban areas.* *South African Journal of Science*, v. 113, n. 1–2, 1 jan. 2017.
- FLUES, M.; HAMA, P.; FORNARO, A. Avaliação do nível da vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR- Brasil). *Química Nova*, v. 26, n. 4, p. 479-483, 2003. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400006>>. Acesso em mar 2023.
- FOREST GIS. Portal de Geotecnologias. 2021. Disponível em <<https://forest-gis.com/2009/04/base-de-dados-shapefile-do-brasil-todo.html/>> Data de acesso: out 2021.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Resíduos Sólidos.** Belo Horizonte, Minas Gerais. 2023a. Disponível em <<http://www.FEAM.br/residuos-solidos>>. Acesso em mar de 2023.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Recuperação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba. **Boletim Informativo do Cidadão sobre a Qualidade da Água no rio Paraopeba** – 1. ed. a 43. ed. Belo Horizonte, Minas Gerais 2023b. Disponível em <<http://www.feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/boletim-informativo-do-cidadao-sobre-a-qualidade-da-agua-no-rio-paraopeba>>. Acesso em jan 2023.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais em 2018.** Belo Horizonte, Minas Gerais. 2018.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Plano para incremento do percentual de tratamento de esgotos sanitários na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.** Programa “Minas Trata Esgoto”. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2011.

Disponível em: <<http://www.FEAM.br/minas-trata-esgoto/bacia-do-rio-paraopeba>>. Acesso em jun 2022.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM); INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF); INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Rio Paraopeba 2021 - Ações de Recuperação da Bacia do Rio Paraopeba - 3 Anos**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2022.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM); INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF); INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **4 Anos Rio Paraopeba - Ações de Recuperação Desempenhadas em 2022**. 2023.

GIKAS, G. D.; TSIHRINTZIS, V. A. *Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater*. **Journal of Hydrology**, v. 466-467, p. 115-26, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.020>. Acesso em mar 2023.

GOMES, F. B. R. *et al.* Avaliação de Impactos Ambientais do Desastre de Brumadinho - MG pela Proposição de Valores de Referência. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 1–20, jan. 2020.

GEOENVIRON. **Caracterização geoquímica de rejeitos-composição química global, análise granulométrica e classificação segundo a norma NBR ABNT 10.004/2004**. Nota Técnica, dez. 2019.

GUNAWARDANA, C.; GOONETILLEKE, A.; EGODAWATTA, P.; DAWES, L. *Role of solids in heavy metals buildup on urban road surfaces*. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, n. 4, p. 490-498, 2012.

HALABI, A.L.M., SIACARA, A.T., SAKANO, V.K. *et al.* *Tailings Dam Failures: A Historical Analysis of the Risk*. **J Fail. Anal. and Preven**, v. 22, p. 464–477. 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s11668-022-01355-3>>. Acesso em jun 2022.

HENRIQUES REZENDE, J. *et al.* *Brazilian Archives of Biology and Technology. Hydrologic Pulses and Remaining Natural Vegetation in Jaú and Jacaré-Pepira Watersheds*. **Arch. Biol. Technol.** v.53 n, v. 5, n. 5, p. 1127–1136, 2010.

HERBAS BAENY, E. *et al.* *Evaluación de la vulnerabilidad socio ambiental del sector lechero de La Maica (Cochabamba) frente al cambio climático Assessment of the social environmental vulnerability of the dairy sector of La Maica (Cochabamba) facing the climate change*. **ACTA NOVA**. 2017.

- HOLLING, C., *Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, pp. 1-23, 1973. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245
- HOLLING, C., *Engineering resilience versus ecological resilience [Online]*, Washington D. C., Peter Schulze – Editor, **National Academy of Engineering**, 1996. Disponível em <<http://www.nap.edu/read/4919/chapter/4>> Acesso em abr de 2022.
- INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IDE-SISEMA). 2023. Disponível em <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>>. Acesso em jan. de 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapeamento de Recurso Naturais do Brasil Escala 1:250.000**. Rio de Janeiro. 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico de geomorfologia**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Ibama multa Vale em R\$ 250 milhões por catástrofe em Brumadinho (MG). Site institucional. 2022. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/ultimas-2/1879-ibama-multa-vale-em-r-250-milhoes-por-catastrofe-em-brumadinho-mg>>. Acesso em jun. de 2022.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Declaração de Carga Poluidora. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2023. Disponível em: <<http://www.IGAM.mg.gov.br/declaracaodecargapoluidora>>. Acesso em mar de 2023.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da Série Histórica entre 2000 e 2018 - Informativo Especial**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2019a.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano de Monitoramento Emergencial Rio Paraopeba - Rompimento Barragem Córrego Feijão em Brumadinho**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2019b.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2020.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2013. Disponível em: <<http://portalinfohidro.IGAM.mg.gov.br/publicacoes-tecnicas/qualidade-das-aguas/6023-qualidade-das-aguas-superficiais>>. Acesso em jun de 2022.

- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). Especial: Mapa Köppen Brasil Detalhado. 2021. Disponível em <<http://www.ipef.br/geodatabase/>> Acesso em out 2021.
- KABATA-PENDIAS, Alina; PENDIAS, Henryk. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press, 1992.
- KOLJONEN, T. *et al. The geochemical atlas of Finland: part 2: till*. **Espoo: Geological Survey of Finland**, 1992. 218 p.
- KUS, B.G.; Kandasamy, J.K.; Vigneswaran, S.; SHON, H. *Water quality in rainwater tanks in rural and metropolitan areas of New South Wales, Australia*. **Journal of Water Sustainability**, v. 1, p. 33-43, 2011.
- LEE, H.; LAU, S.L.; KAYHANIAN, M.; STENSTROM, M.K. *Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges*. **Water Research**, v. 38, n. 19, p. 4153-4163, 2004.
- LIMA, F. W.; RODRIGUES, L. L.; SANTOS, C. A. **Rompimento das Barragens de Mariana e Brumadinho e seus Impactos Socioambientais**. *Raízes no Direito*, v. 8, n. 1, 2019.
- LITTLE, C.; LARA, A. Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. **BOSQUE 31(3): 175-178**. 2010.
- LOPES JR., Idio. **Atlas geoquímico do Vale do Ribeira: geoquímica dos sedimentos ativos de corrente**. 2. ed. rev. São Paulo: CPRM, 2007. 77 p.
- MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. 2020. Disponível em <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>> Acesso em out 2021.
- MENDEZ, C. B.; KLENZENDORF, J. B.; AFSHAR, B. R.; SIMMONS, M. T.; BARRET, M. E.; KINNEY, K. A.; KIRISITS, M. J. *The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater*. **Water Research**, v. 5, n. 5, p. 2049-2059, 2011. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>>. Acesso em mar 2023.
- MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, R. P.; FARIAS, M. D. S.; BELLO, I. P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L. F. C. D. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 519–534, 2016.
- MIMURA, A.M.S.; ALMEIDA, J.M.; VAZ, F.A.S.; OLIVEIRA, M.A.L.de.; FERREIRA, C.C.M.; SILVA, J.C.J. *Chemical composition monitoring of tropical Rainwater during an atypical dry year*. **Atmospheric Research**, v. 169, p. 391-399, 2016.

- MINAS GERAIS. **Decreto nº 48.160, de 24 de março de 2021**. Regulamenta a cobrança pelo uso de recursos hídricos no Estado e dá outras providências. 2021.
- MINAS GERAIS. **Decreto nº 47.760, de 20 de novembro de 2019**. Contém o Estatuto da Fundação Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências. 2019
- MINAS GERAIS. **Lei nº 21.972, de 21/01/2016**. Dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Sisema - e dá outras providências. 2016.
- MINAS GERAIS. **Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009**. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. 2009.
- MINAS GERAIS. **Decreto nº 41578, de 8 de março de 2001**. Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. 2001.
- MINAS GERAIS. **Lei nº 13.199/1999 de 29/01/1999**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. 1999.
- MINERAIS DO PARANÁ S.A. **Geoquímica de solo: horizonte B: relatório final de projeto**. Curitiba: MINEROPAR, 2005. 2 v.
- MIRA ATTANASIO, C. *et al.* A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. 2012.
- MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS HEINZ EBERT (MHE). *Minerais & Rochas*. 2023. Disponível em <<https://museuhe.com.br/>>. Acesso em jan 2023.
- NAKADA, L.Y.K.; MORUZZI, R.B. Variabilidade qualitativa de águas pluviais coletadas em telhado e sua importância na concepção do sistema de tratamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 1-9, 2014.
- NISS, M.; BLUM, W. *The Learning and Teaching of Mathematical Modelling*. **London: Routledge**. 2020.
- NOVAK, A.C.; GIESEN, V.E.G.; DEBUSK, M.K. *Designing rainwater harvesting systems*. Wiley: New Jersey, p. 151-174, 2014.
- OCHOA, Y.; OJEDA-REVAH, L. *Conservación de vegetación para reducir riesgos hidrometeorológicos en una metrópoli fronteriza*. **Estudios Fronterizos**, v. 18, n. 35, p. 47-69, 18 jan. 2017.
- PEDRO, F.; MALTCHIK, L.; BIANCHINI JR. *Hydrologic cycle and dynamics of aquatic macrophytes in two intermittent rivers of the semi-arid region of Brazil*. **Braz. J. Biol.** 2006.

- PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.
- PEREIRA, L. F.; CRUZ, G. DE B.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Brumadinho, Brasil: Uma Análise Baseada nas Mudanças de Cobertura da Terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 2, p. 122–129, 2019.
- PILON, N. A. L.; CAVA, M. G. B.; NALON, M. A.; ZIMBACK, L.; DURIGAN, G. Riqueza, relevância e estratégias para a conservação de fisionomias campestres do Cerrado no Horto Florestal de Botucatu, SP, Brasil. **Revista do Instituto Florestal**, v. 29, p. 7-17, 2017.
- POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. **Rompimento da Barragem da Vale em Brumadinho: Impactos Socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba**. Belo Horizonte. 2020.
- ROCHA, B.C.C.M.; ARAÚJO, J.V.G.; REIS, R.P.A. Caracterização de águas de chuva coletadas em coberturas de diferentes materiais visando a concepção de sistemas prediais de aproveitamento de água. In: *25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Recife, 2009.
- RODRIGUES, E. L. *et al.* Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 3, p. 485–500, dez. 2015.
- 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, n. 1, p. 33–37, 2013.
- ROMÃO, A. *et al.* **Avaliação Preliminar dos Impactos Sobre a Saúde do Desastre da Mineração da Vale (Brumadinho, MG)**. Ministério da Saúde - Fundação Oswaldo Cruz, 2019. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/32268>
- SEÇÃO DE SEGURANÇA E SAÚDE DO TRABALHADOR (SEGUR). **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019**. 240p. set de 2019.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD); FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM); INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF); INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Resolução Conjunta**

- SEMAD/FEAM/IEF/IGAM nº 3.147/2022.** Dispõe sobre a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos e seu Comitê Gestor e estabelece o trâmite para o encaminhamento de dados geoespaciais digitais vetoriais e suas especificações técnicas, e dá outras providências. 2022.
- SELEGUIM, F. B. *How do community responses from global south contribute to climate justice and resilience debate?* **Ambiente e Sociedade**, v. 24, 2021.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Glossário Geológico (Dinâmico) Ilustrado.** 2023. Disponível em <<https://sigep.eco.br/glossario/>>. Acesso em jan 2023.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Setorização de Riscos Geológicos.** Ação Emergencial para Reconhecimento de Áreas de Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa, Enchente e Inundação. 2018.
- SOARES, L. Barragem de Rejeitos, CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Coordenação de Processos Minerários. Comunicação Técnica elaborada para o livro Tratamento de minérios. 5. ed. Cap.19. pág. 831-896. Rio de Janeiro. 2015.
- SOUSA, V. S.; FREITAS, V. M. DE. Revisão Teórica Sobre os Desastres da Mineração Brasileira Incididos em Mariana-MG (2015) e Brumadinho-MG (2019). IV Colóqui Estadual de Pesquisa Multidisciplinar - II Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar. Anais. 2019.
- SOUZA, E. R. M. DE *et al.* **Estudo Epidemiológico de Avaliação do Aumento da Incidência de Arboviroses em Consequência ao Rompimento de Barragens em Minas Gerais, Brasil.** Research, Society and Development, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2021.
- TABARELLI, M.; MANTOVANI, W. A riqueza de espécies arbóreas na floresta atlântica de encosta no estado de São Paulo (Brasil). **Revista Brasileira de Botânica.** 22 (2): 217-223. 1999.
- TABARELLI, M.; *et al.* Desafios e oportunidades para a conservação da Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade.** 1 (1): 132-138. 2005.
- TERAJIMA, P. DOS R. B.; NETO, J. O. N. **Responsabilidade do Estado em Decorrência dos Acidentes Ambientais em Mariana e Brumadinho.** XIV EVINCI - Evento de Iniciação Científica. Anais. 2018.
- TORRES, A.; MENDEZ-FAJARDO, S.; TORRES, A.P.G.; SANDOVAL, S. *Quality of rainwater runoff on roofs and its relation to uses and rain characteristics in the Villa Alexandra and acacias neighborhoods of Kennedy, Bogota, Colombia.* **Journal of**

- Environmental Engineering**, v. 139, n. 10, p. 1273-1278, 2013. Disponível em <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000746](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000746)>. Acesso em mar 2023.
- TRUJILLO-NARCÍA, A. *et al.* Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. **Rev. Int. Contam. Ambie.** 2012.
- VAITSMAN, J. *et al.* Metodologia de elaboração do Índice de Percepções Organizacionais. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 19, n. 6, p. 1631–1643, 2003.
- VALE. Balanço da Reparação. 2022. Disponível em <https://www.vale.com/documents/d/guest/Revista_Balanco_Reparacao_FINAL_pgs_duplas%201>. Acesso em jan. 2023.
- VALE. Reparação - Vale conclui obras emergenciais de contenção em brumadinho. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <<https://www.vale.com/pt/w/vale-conclui-obras-emergenciais-de-contencao-em-brumadinho>>. Acesso em jan. 2023.
- VEJA. Antes e depois de Brumadinho - imagens aéreas da lama na cidade. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/veja-antes-e-depois-de-brumadinho-eimagens-aereas-de-lama-na-cidade/>. Acesso em jun. 2022.
- VIGLIO, E. P.; CUNHA, F. G. DA. **Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco**: Minas Gerais. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico Do Brasil (SGB), 238p. 2018.
- VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**, 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 472 p.
- YOON, S. W.; CHUNG, S. W.; OH, D. G.; LEE, J. W. *Monitoring of non-point source pollutants load from a mixed forest land use.* **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 6, p. 801-805, 2010
- WALKER, B., HOLLING, C., CARPENTER, S. and KINZIG, A., *Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems.* **Ecology and Society** [Online], 9(2), 2004. Disponível em: <http://www.uu.nl/sites/default/files/resilience-adaptability-and-transformability.pdf>
- WEINBERG, A. Uso de Índices de Qualidade de Água para a Caracterização da Bacia Hidrográfica do rio Guandu. Rio de Janeiro. UFRJ/ Escola Politécnica, 166 p. 2013.
- ZHANG, Q.; WANG, X.; HOU, P.; WAN, W.; LI, R.; REN, Y.; OUYANG, Z. *Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China.* **Journal of Environmental Management**, v. 132, p. 178-187, 2014. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.009>>. Acesso em mar 2023.

ANEXO I

Análise estatística dos resultados de Turbidez no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Turbidez - NTU	N Válido	Min	P10	P25	Mediana	P75	P90	Max	Média	Desvio Padrão
BP036 - Melo Franco	75	5,9	12,1	18	43,6	118	324	609	107,8	150,1
BP068 - Mário Campos	74	1,1	8	14,6	34,8	92,3	262	596	86,4	123,1
BP070 - S. J. de Bicas	75	4,1	6,9	13,4	41	89,5	260	1856	106,5	234,5
BP072 - Betim	75	3,9	6,5	11,8	31,1	86,7	360	1268	113,8	220
BP082 - Esmeraldas	75	3,7	9,7	14,5	37,9	97,5	225	1010	97,4	172,4
BP083 - Paraopeba	75	0,8	14	23,2	46,5	107	218	775	92,7	121,1
BP078 - Pompéu	75	2,5	10,2	15,8	42,3	127	296	766	100,9	143,9
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	42	0,6	2,5	3,9	14,1	38,8	77,2	546	50,4	114,7

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Ferro dissolvido no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Ferro Dissolvido - mg/L	N Válido	Mín.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	DP
BP036 - Melo Franco	74	0,06	0,13	0,16	0,23	0,32	0,45	0,98	0,26	0,15
BP068 - Mário Campos	73	0,05	0,12	0,15	0,21	0,28	0,44	0,97	0,25	0,16
BP070 - S. J. de Bicas	74	0,06	0,12	0,15	0,21	0,31	0,4	1,57	0,26	0,2
BP072 - Betim	74	0,06	0,13	0,16	0,23	0,33	0,43	0,77	0,26	0,14
BP082 - Esmeraldas	74	0,05	0,08	0,12	0,18	0,28	0,41	0,99	0,23	0,17
BP083 - Paraopeba	74	0,04	0,07	0,09	0,14	0,22	0,29	0,56	0,17	0,1
BP078 - Pompéu	74	0,03	0,06	0,07	0,15	0,21	0,3	1,19	0,18	0,17
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	41	0,03	0,03	0,04	0,09	0,18	0,28	0,44	0,13	0,11

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Manganês total no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Manganês total - mg/L	N Válido	Mín.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	DP
BP036 - Melo Franco	73	0,05	0,12	0,15	0,24	0,47	0,76	1,39	0,35	0,28
BP068 - Mário Campos	72	0,04	0,09	0,12	0,19	0,34	0,74	1,69	0,32	0,33
BP070 - S. J. de Bicas	73	0,06	0,08	0,13	0,2	0,33	0,72	1,54	0,3	0,28
BP072 - Betim	73	0,05	0,07	0,1	0,14	0,32	0,94	1,73	0,29	0,35
BP082 - Esmeraldas	73	0,03	0,05	0,07	0,13	0,28	0,67	1,14	0,23	0,25
BP083 - Paraopeba	73	0,02	0,04	0,07	0,13	0,28	0,58	0,88	0,22	0,21
BP078 - Pompéu	73	0,01	0,03	0,06	0,12	0,3	0,71	1,3	0,23	0,27
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	41	0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	0,21	0,72	0,1	0,16

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Alumínio dissolvido no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Alumínio Dissolvido - mg/L	N Válido	Min.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	Desvio Padrão
BP036 - Melo Franco	22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,21	0,35	0,13	0,06
BP068 - Mário Campos	21	0,08	0,1	0,1	0,1	0,1	0,18	0,54	0,14	0,1
BP070 - S. J. de Bicas	22	0,02	0,1	0,1	0,1	0,17	0,27	0,6	0,15	0,12
BP072 - Betim	22	0,07	0,1	0,1	0,1	0,13	0,28	0,68	0,16	0,14
BP082 - Esmeraldas	22	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,19	0,36	0,12	0,06
BP083 - Paraopeba	22	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,18	0,11	0,03
BP078 - Pompéu	22	0,07	0,1	0,1	0,1	0,13	0,22	0,39	0,14	0,08
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	22	0,04	0,1	0,1	0,1	0,1	0,13	0,26	0,11	0,04

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Chumbo total no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Chumbo Total - mg/L	N Válido	Min.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	DP
BP036 - Melo Franco	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,012	0,028	0,007	0,004
BP068 - Mário Campos	58	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,011	0,035	0,007	0,005
BP070 - S. J. de Bicas	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,011	0,04	0,007	0,005
BP072 - Betim	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,012	0,044	0,007	0,006
BP082 - Esmeraldas	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,011	0,023	0,007	0,004
BP083 - Paraopeba	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,011	0,02	0,006	0,003
BP078 - Pompéu	74	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,01	0,027	0,007	0,004
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	41	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,012	0,005	0,002

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Cobre dissolvido no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Cobre Dissolvido - mg/L	N Válido	Min.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	DP
BP036 - Melo Franco	27	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,015	0,004	0,002
BP068 - Mário Campos	26	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0
BP070 - S. J. de Bicas	27	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0
BP072 - Betim	27	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0
BP082 - Esmeraldas	27	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0
BP083 - Paraopeba	52	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,01	0,004	0,001
BP078 - Pompéu	52	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,001
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	41	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0

Fonte: IGAM (2019a).

Análise estatística dos resultados de Mercúrio total no período de 2000 a 2018, em estações de monitoramento do rio Paraopeba.

Mercúrio Total - µg/L	N Válido	Min.	P10	P25	Mediana	P75	P90	Máx.	Média	DP
BP036 - Melo Franco	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP068 - Mário Campos	37	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP070 - S. J. de Bicas	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP072 - Betim	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP082 - Esmeraldas	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP083 - Paraopeba	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP078 - Pompéu	38	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0
BP099 - jusante UHE Retiro Baixo	22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0

Fonte: IGAM (2019a).

ANEXO II

Em memória das vítimas fatais do rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão, Brumadinho – MG, em 25 de janeiro de 2019. (Continua).

Adail dos Santos Junior;	Davyson Christian Neves;	Jorge Luiz Ferreira;	Priscila Elen Silva;
Adair Custódio Rodrigues;	Denilson Rodrigues;	José Carlos Domeneguete;	Rafael Mateus de Oliveira;
Ademário Bispo;	Dennis Augusto da Silva;	Josiane de Souza Santos;	Ramon Júnior Pinto;
Adilson Saturnino de Souza;	Diego Antônio de Oliveira;	Josué Oliveira da Silva;	Rangel do Carmo Januário;
Adnilson Silva Nascimento;	Diomar Custódia dos Santos Silva;	Juliana Creizimar de Resende Silva;	Reginaldo da Silva;
Adriano Aguiar Lamounier;	Dirce Dias Barbosa;	Juliana Esteves da Cruz Aguiar;	Reinaldo Fernandes Guimarães;
Adriano Caldeira do Amaral;	Djener Paulo Las-Casas Melo;	Juliana Parreiras Lopes;	Reinaldo Gonçalves;
Adriano Gonçalves dos Anjos;	Duane Moreira de Souza;	Júlio César Teixeira Santiago;	Reinaldo Simão de Oliveira;
Adriano Junio Braga;	Edeni do Nascimento;	Jussara Ferreira dos Passos Silva;	Renato Eustáquio de Sousa;
Adriano Ribeiro da Silva;	Edgar Carvalho Santos;	Kátia Aparecida da Silva;	Renato Rodrigues da Silva;
Adriano Wagner da Cruz de Oliveira;	Edimar da Conceição de Melo Sales;	Kátia Gisele Mendes;	Renato Rodrigues Maia;
Alaércio Lúcio Ferreira;	Ediônio José dos Reis;	Lays Gabrielle de Souza Soares;	Renato Vieira Caldeira;
Alano Reis Teixeira;	Edirley Antônio Campos;	Leandro Antonio Silva;	Renildo Aparecido do Nascimento;
Alex Mário Moraes Bispo;	Ednilson dos Santos Cruz;	Leandro Rodrigues da Conceição;	Ricardo Eduardo da Silva;
Alex Rafael Piedade;	Edson Rodrigues dos Santos;	Lecilda de Oliveira;	Ricardo Henrique Veppo Lara;
Alexis Adriano da Silva;	Edymayra Samara Rodrigues Coelho;	Lenilda Cavalcante Andrade;	Robert Ruan Oliveira Teodoro;
Alexis César Jesus Costa;	Egilson Pereira de Almeida;	Lenilda Martins Cardoso Diniz;	Robson Máximo Gonçalves;
Alisson Martins de Souza;	Eliandro Batista de Passos;	Leonardo Alves Diniz;	Rodney Sander Paulino Oliveira;
Alisson Pessoa Damasceno;	Eliane de Oliveira Melo (grávida da Maria Elisa)	Leonardo da Silva Godoy;	Rodrigo Henrique de Oliveira;
Amanda de Araújo Silva;	Eliane Nunes Passos;	Leonardo Pires de Souza;	Rodrigo Miranda dos Santos;
Amarina de Lourdes Ferreira;	Elis Marina Costa;	Letícia Mara Anízio de Almeida;	Rodrigo Monteiro Costa;
Amauri Geraldo da Cruz;	Eliveltom Mendes Santos;	Letícia Rosa Ferreira Arrudas;	Rogério Antônio dos Santos;
Anailde Souza Pereira;	Elizabeth de Oliveira Espíndola Reis;	Levi Gonçalves da Silva;	Roliston Teds Pereira;
Anderson Luiz da Silva;	Elizeu Caranjo de Freitas;	Lourival Dias da Rocha;	Ronnie Von Olair da Costa;
André Luiz Almeida Santos;	Emerson José da Silva Augusto;	Luciana Ferreira Alves;	Rosaria Dias da Cunha;
Andrea Ferreira Lima;	Erídio Dias;	Luciano de Almeida Rocha;	Roselia Alves Rodrigues Silva;
Angélica Aparecida Ávila;	Eudes José de Souza Cardoso;	Lúcio Rodrigues Mendanha;	Rosiane Sales Souza Ferreira;
Angelita Cristiane Freitas de Assis;	Eva Maria de Matos;	Luís Felipe Alves;	Rosilene Ozorio Pizzani Mattar;
Ângelo Gabriel da Silva Lemos;	Evandro Luiz dos Santos;	Luís Paulo Caetano;	Ruberlan Antônio Sobrinho;
Anízio Coelho dos Santos;	Éverton Guilherme Ferreira Gomes;	Luiz Carlos Silva Reis;	Samara Cristina dos Santos Souza;
Antônio Fernandes Ribas;	Everton Lopes Ferreira;	Luiz Cordeiro Pereira;	Samuel da Silva Barbosa;

Armando da Silva Raggy Grossi;	Fabrcio Henriques da Silva;	Luiz de Oliveira Silva;	Sandro Andrade Gonçalves;
Aroldo Ferreira de Oliveira;	Fabrcio Lrcio Faria;	Luiz Taliberti Ribeiro da Silva;	Sebastião Divino Santana;
Bruna Lelis de Campos;	Fauler Douglas da Silva Miranda;	Manoel Messias Sousa Araujo;	Srgio Carlos Rodrigues;
Bruno Eduardo Gomes;	Felipe Jose de Oliveira Almeida;	Marcelle Porto Cangussu;	Sirlei de Brito Ribeiro;
Bruno Rocha Rodrigues;	Fernanda Batista do Nascimento;	Marcelo Alves de Oliveira;	Sueli de Fátima Marcos;
Camila Aparecida da Fonseca Silva;	Fernanda Cristhiane da Silva;	Marciano de Araujo Severino;	Thiago Leandro Valentim;
Camila Santos de Faria;	Fernanda Damian de Almeida (grávida do Lorenzo);	Marciel de Oliveira Arantes;	Thiago Mateus Costa;
Camila Taliberti Ribeiro da Silva;	Flaviano Fialho;	Marcileia da Silva Prado;	Tiago Augusto Favarini;
Camilo de Lelis do Amaral;	Francis Erick Soares Silva;	Marcio Coelho Barbosa Mascarenhas;	Tiago Barbosa da Silva;
Carla Borges Pereira;	Francis Marques da Silva;	Márcio de Freitas Grilo;	Tiago Coutinho do Carmo;
Carlos Augusto dos Santos Pereira;	George Conceio de Oliveira;	Márcio Flavio da Silva;	Tiago Tadeu Mendes da Silva* ;
Carlos Eduardo de Souza;	Geraldo de Medeiros Filho;	Márcio Flavio da Silveira Filho;	Uberlandio Antônio da Silva;
Carlos Eduardo Faria;	Gilmar Jose da Silva;	Márcio Paulo Barbosa Pena Mascarenhas;	Vagner Nascimento da Silva;
Carlos Henrique de Faria;	Giovani Paulo da Costa;	Marco Aurélio Santos Barcelos;	Valdeci de Sousa Medeiros;
Carlos Roberto da Silva;	Gisele Moreira da Cunha;	Marcus Tadeu Ventura do Carmo;	Vinrcius Henrique Leite Ferreira;
Carlos Roberto da Silveira;	Gislene Conceio Amaral;	Maria de Lurdes da Costa Bueno* ;	Wagner Valmir Miranda;
Carlos Roberto Deusdedit;	Glaysen Leandro da Silva;	Marlon Rodrigues Gonçalves;	Walaci Junhior Cândido da Silva;
Carlos Roberto Pereira;	Gustavo Andri Xavie;	Martinho Ribas;	Walisson Eduardo Paixão;
Cassia Regina Santos Souza;	Gustavo Sousa Júnior;	Maurrcio Lauro de Lemos;	Wanderson Carlos Pereira;
Cssio Cruz Silva Pereira;	Heitor Prates Máximo da Cunha;	Max Elias de Medeiros;	Wanderson de Oliveira Valeriano;
Cláudio Jose Dias Rezende;	Helbert Vilhena Santos;	Milton Xisto de Jesus;	Wanderson Paulo da Silva;
Cláudio Leandro Rodrigues Martins;	Hermrcio Ribeiro Lima Filho;	Miraceibel Rosa;	Wanderson Soares Mota;
Cláudio Marcio dos Santos;	Hernane Junior Moraes Elias;	Miramar Antonio Sobrinho;	Warley Gomes Marques;
Cláudio Pereira Silva;	Hugo Maxs Barbosa;	Moisés Moreira de Sales;	Warley Lopes Moreira;
Cleidson Aparecido Moreira;	rcaro Douglas Alves;	Natália Fernanda da Silva Andrade;	Weberth Ferreira Sabino;
Cleiton Luiz Moreira Silva;	Izabela Barroso Câmara Pinto;	Nathalia de Oliveira Porto Araujo* ;	Wellington Alvarenga Benigno;
Cleosane Coelho Mascarenhas;	Janice Helena do Nascimento;	Nilson Dilermando Pinto;	Wellington Campos Rodrigues;
Cristiane Antunes Campos* ;	Jhobert Donadonne Gonçalves Mendes;	Ninrode de Brito Nascimento;	Wenderson Ferreira Passos;
Cristiano Braz Dias;	João Marcos Ferreira da Silva;	No Sano Rodrigues;	Weslei Antônio Belo;
Cristiano Jorge Dias;	João Paulo Altino;	Noel Borges de Oliveira;	Wesley Antônio das Chagas;
Cristiano Serafim Ferreira;	João Paulo de Almeida Borges;	Olavo Henrique Coelho;	Wesley Eduardo De Assis;
Cristiano Vinrcius Oliveira de Almeida;	João Paulo Ferreira de Amorim Valadão;	Olrcpio Gomes Pinto;	Willian Jorge Felizardo Alves;

Cristina Paula da Cruz Araujo;	João Paulo Pizzani Valadares Mattar;	Pamela Prates da Cunha;	Wilson Jose da Silva;
Daiana Caroline Silva Santos;	João Tomaz de Oliveira;	Paulo Geovane dos Santos;	Wiryslan Vinícius Andrade de Souza;
Daniel Guimarães Almeida Abdalla;	Joiciane de Fátima dos Santos;	Paulo Natanael de Oliveira;	Zilber Lage de Oliveira.
Daniel Muniz Veloso;	Jônatas Lima Nascimento;	Pedro Bernardino de Sena;	*Vítimas não encontradas.
David Marlon Gomes Santana;	Jonis André Nunes;	Peterson Firmino Nunes Ribeiro;	

Fonte: adaptado de Vale (2023).

(Conclusão).