

Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba - 3 anos

Foto: Vanessa Kelly Saraiva

Caderno Especial . 2022

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 3 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA Brumadinho/MG

Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 3 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA Brumadinho/MG

Belo Horizonte
2022

Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Avaliação da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do rio Paraopeba Após 3 anos
do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA –
Brumadinho/MG

Belo Horizonte

2022

© 2022 Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM

Governo do Estado de Minas Gerais

Governador

Romeu Zema Neto

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

Secretária

Marília Carvalho de Melo

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Diretora Geral

Marcelo da Fonseca

Diretora de Operações e Eventos Críticos

Wanderlene Ferreira Nacif

Gerente de Monitoramento de Qualidade das Águas

Sylvia Therese Meyer Ribeiro

I59a	Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba: acompanhamento da qualidade das águas do Rio Paraopeba após 3 anos do rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA – Brumadinho/MG / Instituto Mineiro de Gestão das Águas . --- Belo Horizonte: Igam, 2022. 83 p.; il. Caderno especial. 1. Qualidade da água - monitoramento. 2. Sedimentos. 3.Rio Paraopeba. I. Título.
------	---

CDU: 556:550.4

Equipe Técnica - Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas

Jéssica de Oliveira Santos, Engenheira Química

João Luiz Moreira Marques, graduando em Engenharia Ambiental

Katiane Cristina de Brito Almeida, Bióloga

Mariana Elissa Vieira de Souza, Geógrafa

Matheus Duarte Santos, Geógrafo

Marina Caldeira Tonucci, Química

Patrícia Franklin Mayrink Nogueira, Bióloga

Sérgio Pimenta Costa, Biólogo

Vanessa Kelly Saraiva, Química

Vitor Faria de Carvalho Oliveira, Estatístico

SIMGE - Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais

Paula Pereira de Souza, Meteorologista

Normalização bibliográfica

Foto Capa: Sisema

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 DESASTRE DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 e 2020	10
3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAPEBA	13
4 AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2021 NA BACIA DO PARAPEBA	14
5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS.....	21
5.1 Plano de amostragem – Metodologia.....	21
5.2 Rede de monitoramento.....	21
5.3 Frequência de amostragem.....	26
5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade	29
6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2021, NA CALHA DO RIO PARAPEBA.....	31
8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A DEZEMBRO DE 2021	54
9 CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	81

APRESENTAÇÃO

A bacia do rio Paraopeba é um território estratégico para o Estado de Minas Gerais, uma vez que está localizada no quadrilátero ferrífero, região de importante produção mineral e relevância econômica. Na bacia do rio Paraopeba, ainda estão três reservatórios de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte/RMBH, bem como um ponto de captação no próprio rio Paraopeba, instalado em 2015, para reverter a condição de estresse hídrico ao qual estavam submetidos os reservatórios de abastecimento de água.

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeito no complexo da Mina Córrego Feijão, designada B1, da empresa Vale S/A rompeu no ribeirão Ferro-Carvão, tributário do rio Paraopeba, município de Brumadinho. O Igam, a partir de então, no uso de suas competências, intensificou o monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos ao longo do trecho do rio Paraopeba afetado pelo rompimento, prezando pelas informações atualizadas das condições dos cursos de água afetados.

Nesse caderno estão apresentados os dados de monitoramento das águas superficiais decorridos três anos do rompimento da barragem. O programa de monitoramento tem por objetivo fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas dos corpos de água atingidos pelo desastre, bem como permitir o acompanhamento das ações de recuperação da bacia do rio Paraopeba. Além disso, aqui estão apresentadas as principais ações e entregas do órgão gestor de recursos hídricos no que se refere ao tema impacto na qualidade da água e usos múltiplos do rio Paraopeba.

Boa leitura!

Marcelo da Fonseca

Diretor Geral Igam

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Paraopeba correspondente a 2,5% da área total do estado de Minas Gerais, no qual estão inseridos 48 municípios, sendo que 14 deles estão na região metropolitana de Belo Horizonte. O rio Paraopeba é um tributário do rio São Francisco, de grande importância econômica, uma vez que, é uma relevante área de produção mineral, além de ser usada no abastecimento de água da região metropolitana de Belo Horizonte.

No dia 25 de janeiro de 2019, ocorreu o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, de propriedade da mineradora Vale S.A, localizada em Brumadinho, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. A estrutura da barragem tinha uma área total de aproximadamente 27 hectares, 87 metros de altura e não recebia rejeitos desde 2016. A ruptura da barragem provocou a liberação de cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de produção mineral (Imagem1), sendo que a maior parte ficou contida na calha do ribeirão Ferro-Carvão até sua confluência com rio Paraopeba, e uma parte se espalhou até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo. O material depositado no rio Paraopeba continua a se mover carregado pelo rio e pela ocorrência de chuvas na região.

O rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, tem sido considerado um desastre ambiental de grandes proporções, e o de maior acidente de trabalho da história brasileira. Tal fato, suscitou grande preocupação não só na bacia do rio Paraopeba como também em toda a bacia do rio São Francisco, que já vem atravessando uma longa crise hídrica, o que ocasionou manifestações por parte dos Governos dos Estados banhados pelo São Francisco e várias instituições públicas e da sociedade civil.

Diante deste quadro e aliado ao censo da Unesco (2018), que estima que o número de pessoas em situação de risco devido ao estresse hídrico provavelmente alcançará 2 bilhões no início da década de 2030, o monitoramento da qualidade da água é de suma importância, uma vez que fundamentará a proposição de ações de controle de qualidade ambiental da bacia visando a manutenção e melhoria das condições ambientais e dos seus cursos de água contribuintes, a fim de que a água possa atender, além dos usos pretendidos, os diversos usos previstos na legislação. Neste contexto, o monitoramento de corpos hídricos têm como objetivos: levantar estudos de caracterização gerando uma série histórica de referência para o

local, diagnosticar a qualidade da água e verificar se está de acordo com o uso designado pela legislação; prognosticar, com base no diagnóstico, as alterações na qualidade da água advindas da atividade antrópica; subsidiar, com base no diagnóstico e prognósticos, medidas preventivas para manutenção da qualidade necessária para o uso pretendido.

Neste sentido, o Igam vem acompanhando e orientando ações que são imprescindíveis para o gerenciamento de forma integrada dos recursos hídricos, visando o monitoramento da qualidade da água, para a manutenção dos serviços a que se destinam este compartimento ambiental.

Imagem 1 – Área da Barragem I da Mina do Córrego Feijão, antes e depois do rompimento



Fonte: Google Earth

2 DESASTRE DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 a 2021

Programa de monitoramento da qualidade das águas superficiais e sedimentos

Imediatamente após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, o Igam atuou em diversas ações no âmbito de gestão das águas tais como restrição de uso, emissão de outorgas emergenciais para captação, alinhamento com o Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) e com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa), além do monitoramento constante das águas e sedimentos.

No âmbito do monitoramento, no dia subsequente ao rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, pertencente à empresa Vale S.A, o Igam intensificou a frequência de coletas, que passou a ser diária na água superficial e semanal no sedimento, na calha do rio Paraopeba, entre Brumadinho e Felixlândia, durante os primeiros 60 dias após o rompimento. Além disso, o Igam adicionou ao monitoramento 8 estações de amostragem, para um melhor acompanhamento do impacto causado sobre as águas do rio Paraopeba.

Atualmente, o Igam monitora, mensalmente, 16 pontos na calha do rio Paraopeba e os resultados tem sido consolidados na forma de relatórios técnicos e boletins informativos, com o intuito de orientar as ações dos órgãos competentes, tanto na esfera estadual quanto na federal,

bem como para fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas atingidas pelo desastre.

Dentre os produtos elaborados pelo Igam, o Boletim ao Cidadão referente à qualidade da água do rio Paraopeba está em sua 35ª edição. Esse Boletim é publicado mensalmente pela Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas do Igam, bem como avaliação dos níveis de poluição e degradação ambiental do rio Paraopeba, através do relatório de Qualidade dos Sedimentos. Todas essas publicações trazem as informações do monitoramento em uma linguagem mais acessível à população.

Os relatórios são divulgados em um repositório que foi criado para armazenar e dar transparência a todos as ações e acompanhamentos que estão sendo realizados no âmbito do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema)¹.

Em agosto de 2021 o Igam e a Feam realizaram vistoria em conjunto na região do rompimento da Barragem B1, em Brumadinho. Os analistas vistoriaram a estrutura remanescente da barragem B1, a Estação de Tratamento de Água Fluvial do ribeirão Ferro-Carvão (ETAF-1), a Estação de Tratamento do material que está sendo dragado do rio Paraopeba (ETAF Laginha), também foi percorrido o remanso 1 onde o rejeito ainda está sendo alvo de buscas dos bombeiros e a região do Marco Zero, onde o rejeito já foi totalmente removido e a área em fase inicial de revegetação, além do ponto onde a dragagem do rio Paraopeba está ocorrendo atualmente pontos de erosões no rio Paraopeba.

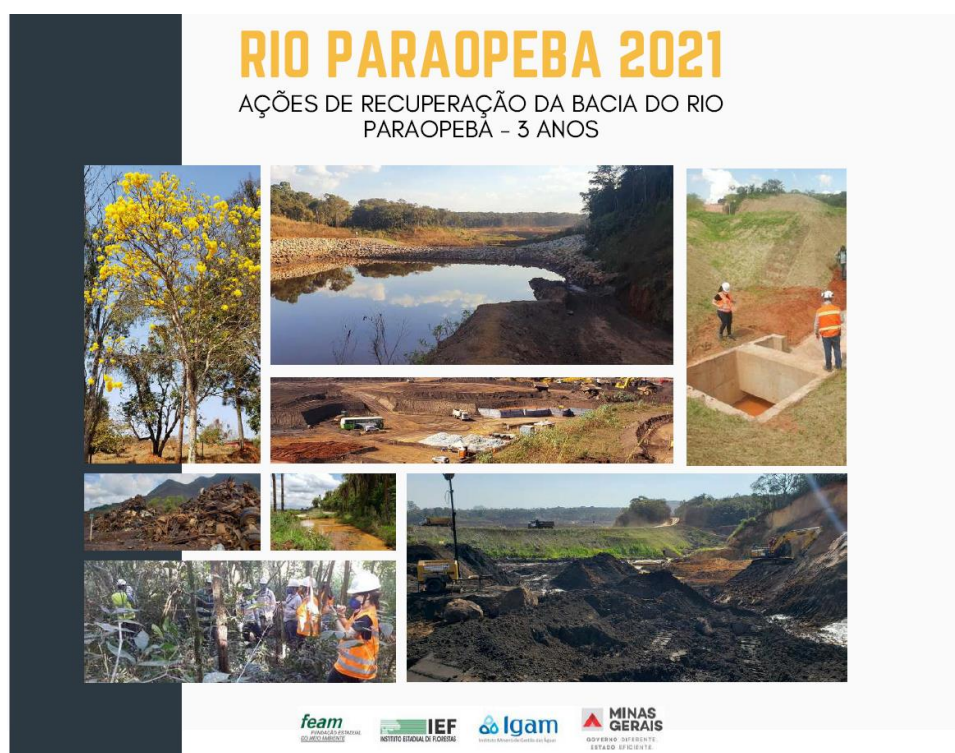
Também foi feita uma visita a comunidade do Tejuco, com o intuito de vistoriar o ponto de captação de água superficial de abastecimento público, local que foi alvo de denúncias pela comunidade, sobre a piora na qualidade da água de abastecimento.

¹<http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba>

Além disso, no ano em que se completam três anos do rompimento das barragens da Vale S.A., em Brumadinho, o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema), lançou o [Caderno de 3 anos](#) (Figura 1) das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba. O documento lista as principais ações executadas no ano de 2021, dentre as quais, relacionadas à melhoria da eficiência da operação de dragagem do rio e à retomada das atividades de campo dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Risco Ecológico.

Neste Caderno, apresentamos a toda sociedade, de forma sucinta e simplificada, as diversas atividades desempenhadas e medidas adotadas pelo Sisema, em articulação com o Comitê Pró-Brumadinho e demais órgãos envolvidos na recuperação ambiental da bacia do rio Paraopeba.

Figura 1 – Caderno de 3 anos das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba



Fonte: <http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba> (2022)

3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAOPEBA

A Deliberação Normativa Copam-MG nº 14, de 28 de dezembro de 1995 dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. De acordo com essa deliberação o rio Paraopeba, da confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias, é enquadrado como Classe 2.

Com a regulamentação da Política Estadual de Recursos Hídricos pelo Decreto nº 41.578, de 8 de março de 2001, e com vistas ao atendimento de seu artigo 7º, inciso II, o Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG) estabeleceram a Deliberação Normativa Conjunta nº 01, de 5 de maio de 2008, 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 deliberação normativa conjunta, os usos preponderantes para as classes de enquadramento são:

I. 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.

II. 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 nº 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.

III. 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.

IV. 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.

V. Classe 4 - Águas que podem ser destinadas:

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

4 AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2021 NA BACIA DO PARAOPEBA

O diagnóstico da precipitação foi realizado pelo Simge com base nas estações meteorológicas convencionais e automáticas da rede de observação de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), distribuídas na Bacia do Paraopeba e nas bacias vizinhas para melhor representatividade das bordas da UPGRH, uma vez que dentro da mesma somente três estações puderam ser utilizadas. Os dados foram interpolados para estimativa da chuva em áreas em que não existem estações.

A análise foi realizada considerando o ano civil de 2021, dividido em 4 trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. Para cada um dos trimestres são apresentados os campos de anomalia da

precipitação observada no Paraopeba. Foi realizada a análise considerando a chuva total registrada durante o ano, também apresentada em forma de anomalia.

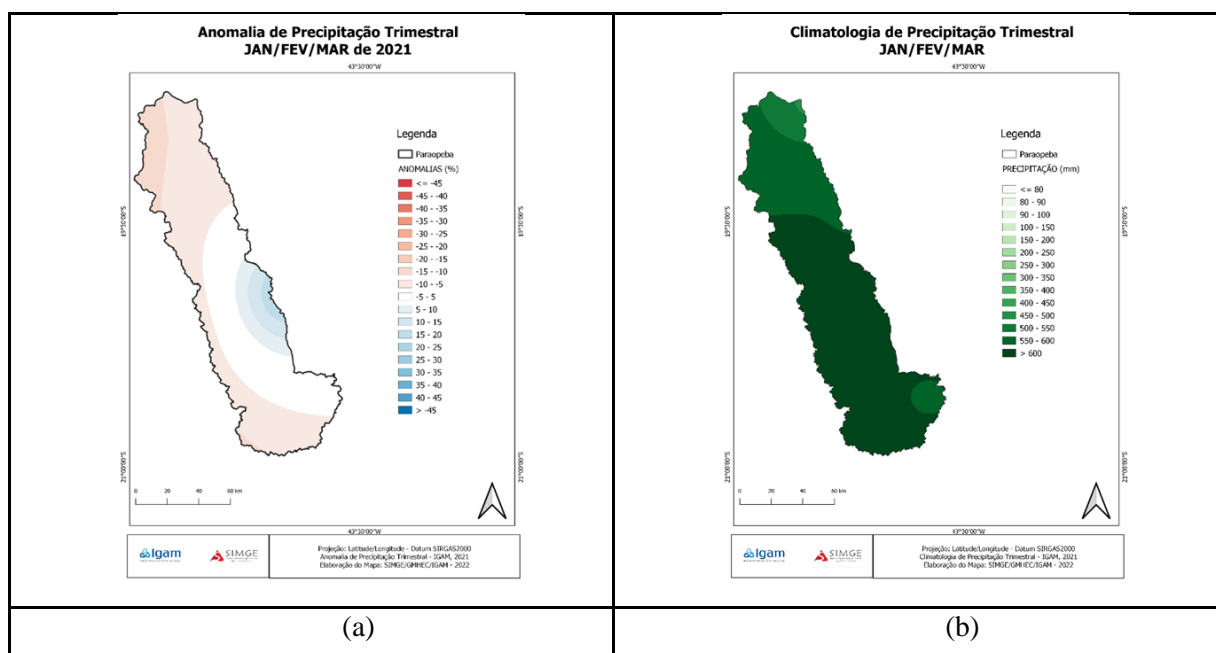
A anomalia de precipitação é variação da chuva observada (para mais ou para menos) tendo como referência a Normal climatológica. A anomalia positiva de chuvas ocorre quando a chuva fica acima da climatologia. Já a anomalia negativa ocorre quando a chuva fica abaixo da climatologia. A climatologia utilizada ilustra os valores das Normais climatológicas das chuvas publicadas pelo Inmet, com referência aos 30 anos entre 1981-2010.

A distribuição espacial da anomalia através destes campos permite a observação do comportamento espacial da mesma, dado que estas podem se comportar diferentemente mesmo dentro de uma mesma porção geográfica.

A cor branca nas figuras, indica as áreas em que a precipitação ficou em torno da climatologia. Já as cores em tons azuis representam as áreas em ocorreram anomalias positivas. As áreas preenchidas em cores quentes representam as áreas de anomalias negativas. Os valores são dados em porcentagem.

O trimestre JFM é caracterizado climatologicamente pela ocorrência de chuvas em torno de 500mm e 650mm no Paraopeba, com as maiores precipitações ocorrendo no alto Paraopeba. Verifica-se que a anomalia na precipitação ocorrida no primeiro trimestre (JFM) de 2021, exibido na Figura 2, foi negativa no setor centro-norte enquanto no setor centro-sul se apresentou predominantemente dentro da climatologia com algumas áreas apresentando anomalias positivas. As anomalias observadas variaram entre -11% e 18%.

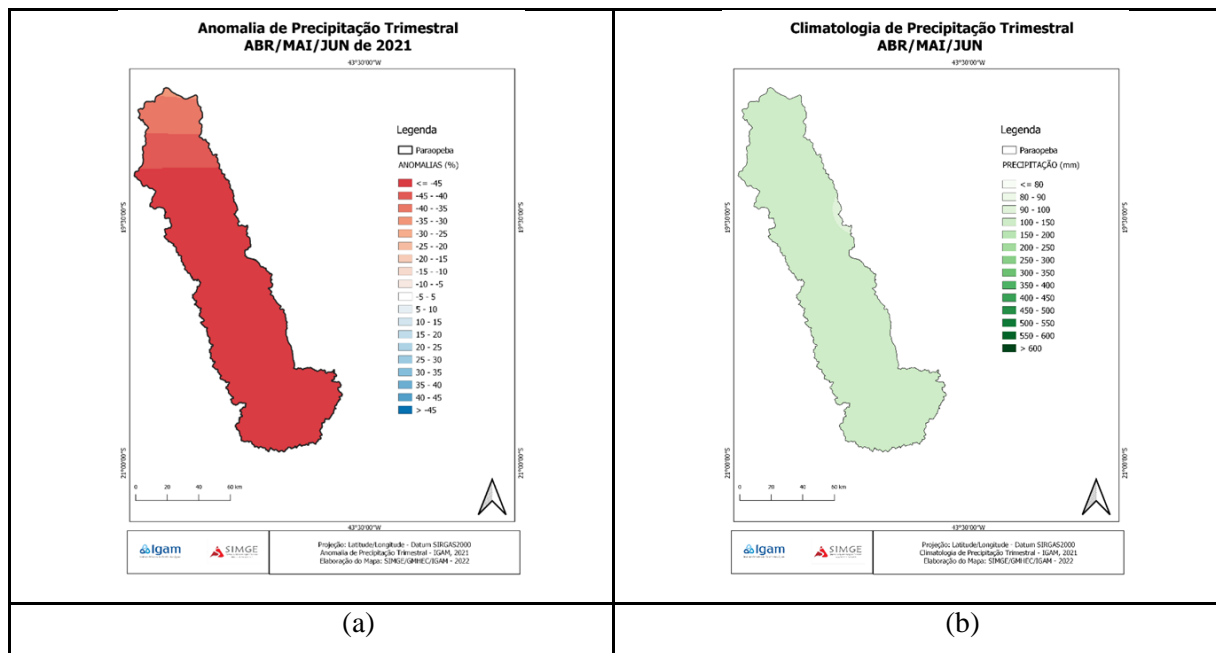
Figura 2 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre JFM de 2021; (b) climatologia da precipitação no trimestre JFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O segundo trimestre (AMJ), é o primeiro trimestre do período seco no estado. Climatologicamente, as chuvas computadas ao final do trimestre variam entre valores de 80mm a 110 mm, como exibido na Figura 3(b). Em 2021, observa-se ocorrência de anomalias predominantemente negativas no Paraopeba, conforme exibido na Figura 3(a). Os totais de precipitação observados dentro do trimestre foram inferiores à climatologia entre 69% e 33%.

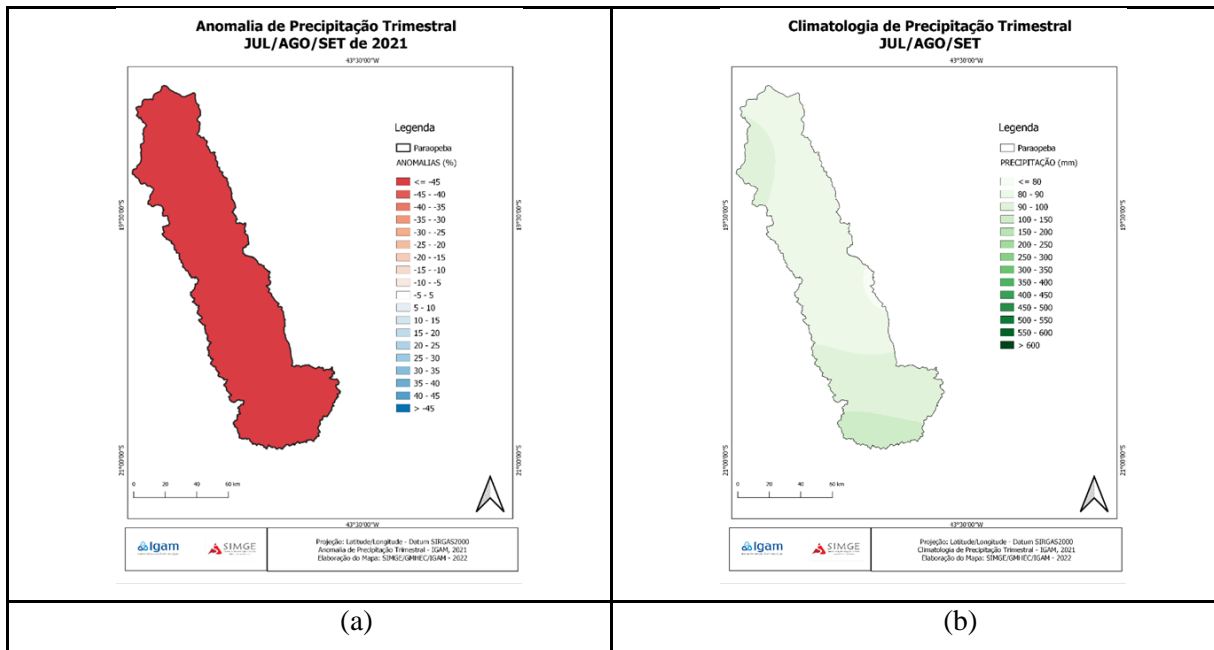
Figura 3 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre AMJ de 2021; (b) climatologia da precipitação no trimestre AMJ.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O terceiro trimestre (JAS) é o segundo trimestre do período seco, que é também o pior trimestre do ano na contribuição de chuvas, já que as precipitações totais no Paraopeba, exibidas na Figura 4(b), nesse período variam climatologicamente entre 40mm e 80mm. Em 2021 esse trimestre, exibido na Figura 4(a), se apresentou ainda pior do que a climatologia, com anomalias negativas ao longo de toda a área, com precipitações observadas ficando entre 74% e 58% inferiores à climatologia.

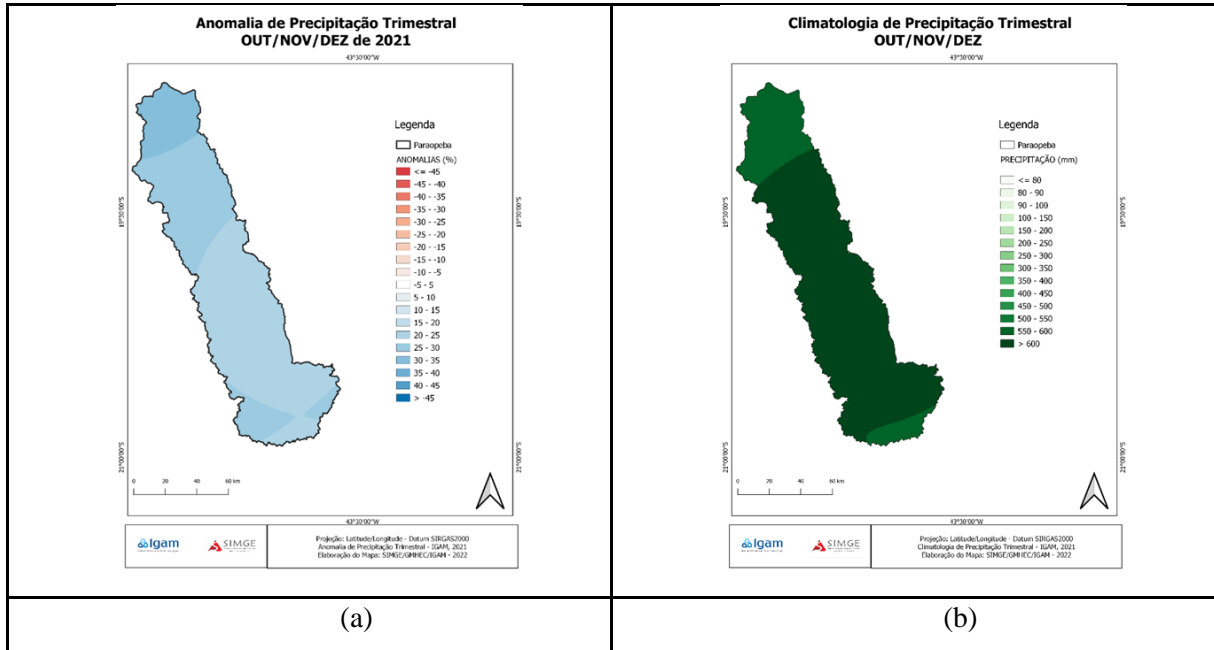
Figura 4 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre JAS de 2021; (b) climatologia da precipitação no trimestre JAS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

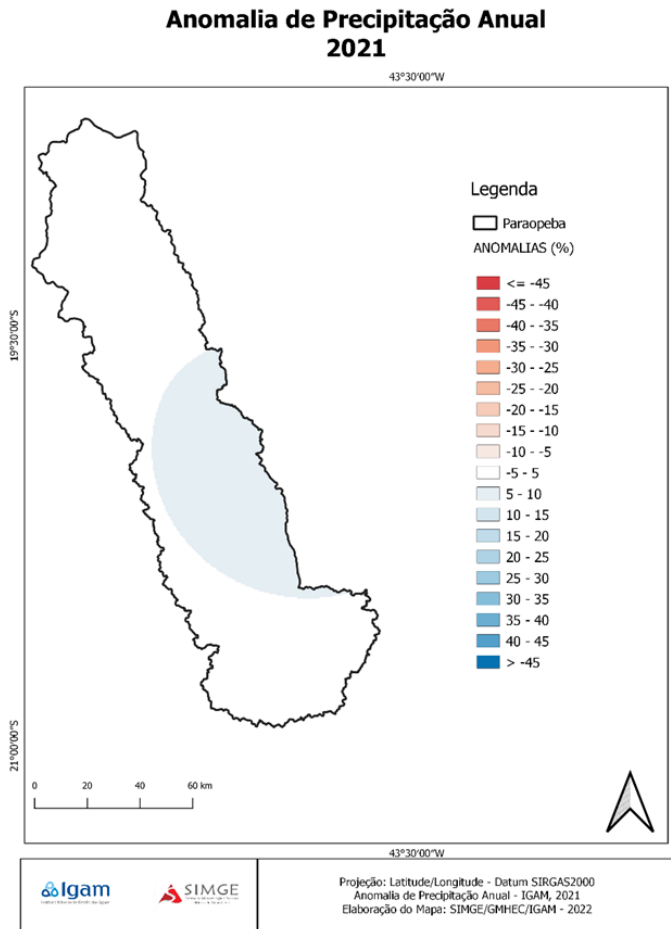
O quarto trimestre (OND) marca o início do período chuvoso em Minas. Nesse trimestre as precipitações, conforme a climatologia exibida na Figura 5(b) variam entre 530mm e 670mm. Para 2021, conforme exibido na Figura 5(a), o que se observa é que o último trimestre do ano se caracterizou por anomalias predominantemente positivas em todo o Paraopeba, registrando anomalias com valores entre 21% e 33% superiores à climatologia.

Figura 5 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre OND de 2021; (b) climatologia da precipitação no trimestre OND.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Figura 6 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação anual de 2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

A análise das anomalias referentes ao ano (calculadas entre janeiro e dezembro) mostra que o acumulado anual ocorreu acima da climatologia, conforme exibido na Figura 6. No entanto, devido aos baixos acumulados ocorridos no segundo semestre, 2021 foi um ano classificado como normal em grande parte do Paraopeba. Por outro lado, devido às chuvas abundantes ocorridas no primeiro e no segundo trimestre, o ano foi classificado como chuvoso no setor centro sul Paraopeba.

5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

5.1 Plano de amostragem – Metodologia

O plano de amostragem do Igam inclui a realização de coletas e análises da qualidade da água e sedimentos no rio Paraopeba, trabalho este que se iniciou no dia seguinte ao evento com o planejamento do roteiro e deslocamento da equipe para a área. O início do monitoramento seguiu uma sequência de montante para jusante, à medida que os rejeitos avançavam ao longo do rio.

A avaliação da qualidade da água superficial e dos sedimentos foi feita comparando-se os resultados do monitoramento emergencial com os resultados da série histórica de monitoramento do Igam entre 2000 a 2018. Os resultados do monitoramento emergencial também foram confrontados com os limites legais previstos na Deliberação Conjunta Copam/CERH-MG nº 01/2008 (COPAM; CERH, 2008) para água superficial; e na Resolução nº 454 de 1 de novembro de 2012 do Conselho de Meio Ambiente (CONAMA, 2012) para sedimentos.

5.2 Rede de monitoramento

Antes do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A da Vale, o Igam realizava, desde 1997, o monitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais em 37 pontos distribuídos na bacia do rio Paraopeba, que constitui a rede básica de monitoramento do estado no âmbito do Programa Águas de Minas, sendo 8 deles na extensão da calha do rio Paraopeba, que foi impactada pelo rompimento da Barragem.

Após o desastre, instituiu-se uma rede emergencial para o acompanhamento do impacto do rompimento da Barragem. A rede emergencial contemplou os 8 pontos de monitoramento da rede básica na calha do rio Paraopeba e foi continuamente ampliada ao longo do ano de 2019 (Tabela 1). Atualmente a rede emergencial possui 16 pontos monitorados pelo Igam, sendo 1 no rio Paraopeba a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão e, 14 a jusante até o

reservatório de Três Marias. A rede também foi acrescida de mais 1 ponto localizado em um afluente próximo ao reservatório de Três Marias. A existência de uma rede prévia permitiu comparar a condição do rio antes e após o rompimento da barragem.

Tabela 1 – Descrição das estações de monitoramento avaliadas no monitoramento do rio Paraopeba pelo Igam

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Distância até a Barragem B1 (km)	Descrição	Início da coleta
BP036	-20,197	-44,123	Brumadinho	10*	Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco	28/jan
BPE2	-20,135	-44,215	Brumadinho	19,7	Rio Paraopeba na captação da Copasa	26/jan
BP068	-20,093	-44,211	São Joaquim de Bicas	24,8	Rio Paraopeba 5 km a jusante da captação da Copasa em Brumadinho	26/jan
BP070	-20,04	-44,256	Betim, São Joaquim de Bicas	42	Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas	26/jan
BP072	-19,949	-44,305	Betim	59	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba	26/jan
BPE3	-19,709	-44,470	Esmeraldas	112,8	Rio Paraopeba a montante da captação de Pará de Minas	12/fev
BPE4**	-19,711	-44,497	Pará de Minas	115,9	Rio Paraopeba na captação de Pará de Minas	08/fev
BP082	-19,670	-44,480	Esmeraldas, São José da Varginha	123,1	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas	27/jan
BP083	-19,370	-44,530	Papagaios, Paraopeba	192,4	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba	27/jan
BP077	-19,33	-44,53	Papagaios,	203	Rio Paraopeba na	11/nov

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Distância até a Barragem B1 (km)	Descrição	Início da coleta
			Paraopeba		captação da Copasa entre os municípios de Paraopeba e Papagaios	
BP078	-19,170	-44,710	Curvelo, Pompéu	250,9	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Pardo em Pompéu	27/jan
BP087	-19,02	-44,73	Curvelo, Pompéu	279	Rio Paraopeba a montante da UHE Retiro baixo	11/nov
BPE5***	-18,987	-44,776	Pompéu	289	Rio Paraopeba logo a montante da UHE de Retiro Baixo, em seu remanso	08/mar
BP099	-18,871	-44,787	Felixlândia	318,3	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias	27/jan
BPE6	-18,816	-45,015	Felixlândia	Aprox. 353,1	Remanso da represa de Três Marias no Município de Felixlândia	02/mar
BPE7	-18,929	-45,241	Abaeté	Aprox. 400,1	Remanso da represa de Três Marias no Município de Abaeté	02/mar
BPE8	-18,493	-45,283	Três Marias	Aprox. 423,1	Corpo da represa de Três Marias no Município de Três Marias	02/mar
BPE9	17,13	43,23	Felixlândia	317****	Ribeirão do Gomes próximo a confluência com o rio Paraopeba	27/03

*Estações a montante do local do desastre. A distância medida se refere da estação até a confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba.

**Estação desativada. Última medição realizada em 11/03/19

***Estação desativada por dificuldade de acesso. Última medição realizada em 21/04/19

****Distância da foz do rio Paraopeba com o ribeirão dos Gomes

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

De forma a facilitar a visualização da localização dos pontos de monitoramento utilizados antes do rompimento (série histórica) e após o rompimento (2019), são apresentadas as Figuras 7 e 8, com a localização da Rede de Monitoramento Emergencial na bacia do rio Paraopeba.

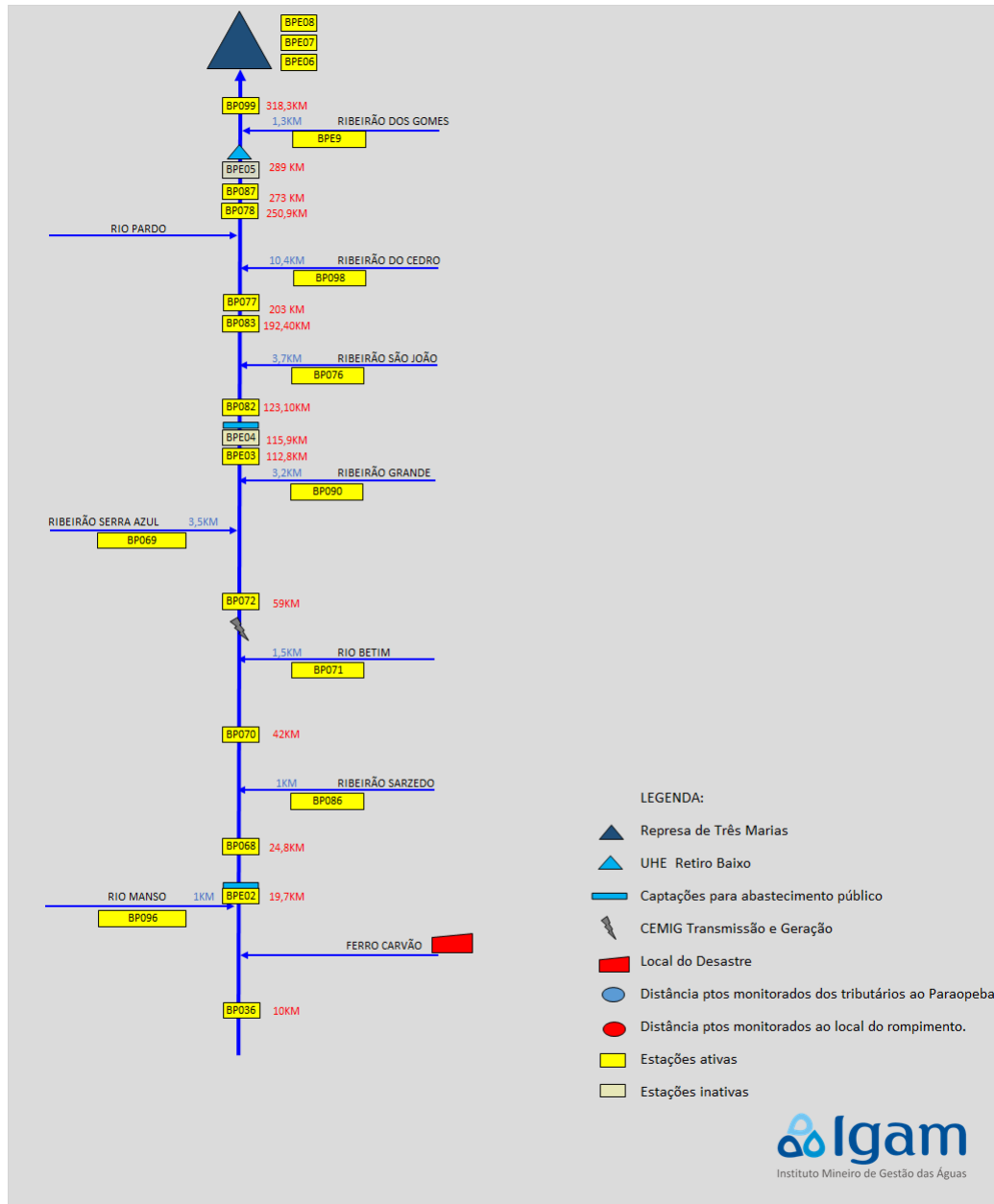
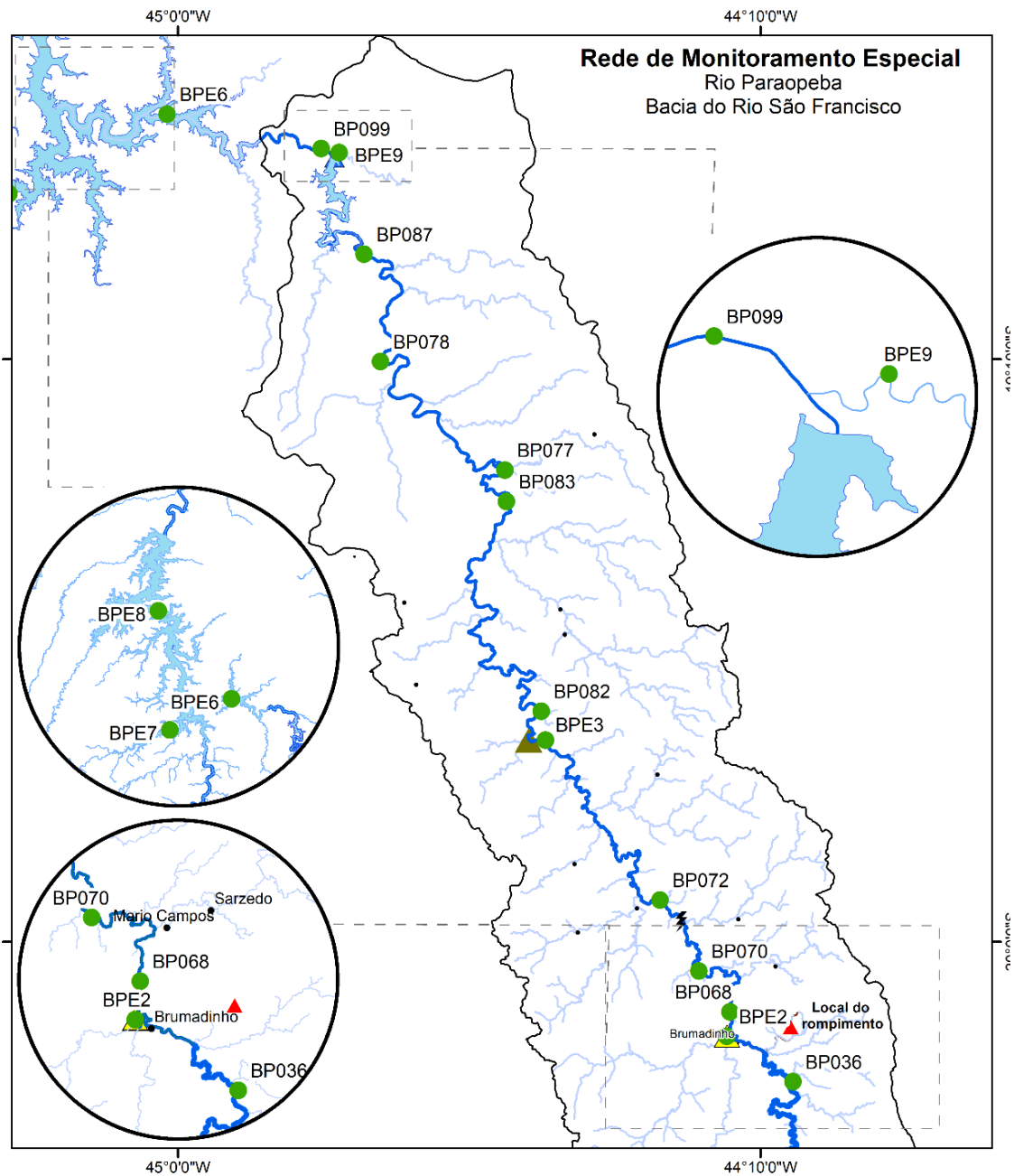


Figura 7 – Pontos de monitoramento da qualidade da água superficial – pré e pós-rompimento
 Fonte: Elaborado pelos autores (2020)



Legenda

- Estações IGAM
- ▲ Captação Copasa
- ▲ Captação Pará de Minas
- ⚡ CEMIG Geração e Transmissão
- Sedes Municipais
-  SF3
-  Hidrografia Rio Paraopeba
-  Hidrografia
-  Espelho d'água

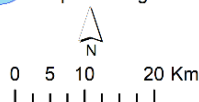


Figura 8 – Mapa com a localização geográfica da Rede de Monitoramento Emergencial do rio Paraopeba.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

5.3 Frequência de amostragem

Após o rompimento da Barragem 1, o Igam intensificou a frequência do monitoramento das águas superficiais na calha do rio Paraopeba, entre Brumadinho e Felixlândia (Quadro 1). Foi definida inicialmente, uma frequência de amostragem diária para as águas superficiais e semanal para os sedimentos em todos os pontos da calha do rio Paraopeba.

O monitoramento diário em todos os pontos foi mantido durante os primeiros 60 dias após o rompimento. Com o desenvolvimento dos trabalhos, e a diminuição de alterações significativas nas concentrações dos parâmetros, esta frequência foi modificada. Nas águas superficiais passou a ser semanal, e depois mensal, e nos sedimentos passou a ser mensal.

Tendo em vista o início das atividades de dragagem do rio Paraopeba, na região próxima a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, desde o início do mês de agosto de 2019, além das obras para a contenção dos rejeitos no ribeirão Ferro-Carvão, realizadas pela Vale, o monitoramento nas estações BPE2, BP036, BP068 e BP070 (primeiros 50 km) foi intensificado, passando a ser realizado semanalmente pelo Igam, a partir de setembro de 2019.

Já a partir de novembro de 2019, com a chegada do período chuvoso, o Igam intensificou o acompanhamento sistemático dos resultados do monitoramento da qualidade da água das demais estações, incluindo a região do reservatório de Três Marias. O trabalho visa verificar quaisquer anomalias que possam indicar, na água, a presença de partículas do rejeito, provenientes do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, em Brumadinho.

Assim, o monitoramento das estações da calha do rio Paraopeba passou a ser realizado semanalmente, a exceção dos pontos localizados dentro da represa de Três Marias que permaneceram até o mês de dezembro com frequência mensal (BPE6, BPE7 e BPE8), bem como o monitoramento dos sedimentos em todos os pontos. A frequência de monitoramento semanal durou até o mês de abril de 2020, a partir de então, a frequência de monitoramento passou a ser mensal novamente.

Vale ressaltar que a frequência do monitoramento é continuamente avaliada, conforme os resultados obtidos, as ações implantadas pela Vale, o período climático do ano, dentre outros fatores.

Quadro 1 – Resumo das estações de monitoramento, frequências e períodos de alteração para o monitoramento emergencial.

Tipo de amostra / Estações	Antes do Desastre	Data a partir da qual houve alteração da frequência de coleta													
	1997 a 25/01/2019	26/01/19	13/03/19		18/03/19			03/06/19		01/07/19	03/09/19		01/11/19		01/05/20
Estações	8 pontos Todas da calha (BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BP078, BP083, BP099)	11 pontos Todas da calha (BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE4**, BP078, BP083, BP099)	BPE2, BP082, BP099 e BPE5*	Demais estações	BPE5, BPE9 ¹ e BP099	BPE2, BP072, BP082 e BP078	BP036, BP068, BP070, BPE3, BP083, BPE6, BPE7 e BPE8	BPE9 e BPE099	BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE3, BP078, BP083, BPE6, BPE7 e BPE8	Todos os 14 pontos	BPE2, BP036, BP068 e BP070	Demais estações	Todas da calha (BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE3, BP083, BP077 ² , BP078, BP087 ³ , BPE9, BP099)	Represa de Três Marias (BPE6, BPE7, BPE8)	Todos os 16 pontos
Frequência Água	Trimestral	Diária	Diária	Mensal	Diária	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal
Frequência Sedimentos	Trimestral	Semanal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal								Mensal

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade

As metodologias utilizadas para a coleta e a análise das amostras de água e de sedimentos são as preconizadas por manuais como:

- Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2011);
- *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, 2005).

As amostragens e análises foram realizadas pelo Instituto Senai de Tecnologia em Meio Ambiente, laboratório contratado pelo Igam, o qual possui acreditação, segundo os requisitos a Norma ABNT (NBR) ISO/IEC 17025:2017.

Os limites para os parâmetros físico-químicos e biológicos são definidos segundo um sistema de classificação com base na qualidade da água requerida para os usos prioritários dos recursos hídricos. As águas do rio Paraopeba, da confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias, é enquadrado como Classe 2, conforme a Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995 dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba.

No âmbito do Estado de Minas Gerais, a norma que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências é a Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH-MG nº 01, de 5 de maio de 2008. Os limites para os parâmetros físico-químicos definidos segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 dos limites para águas de Classe 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites para os parâmetros físico-químicos definidos segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 dos limites para águas de Classe 1, 2 e 3 avaliados

Parâmetro	LIMITE DN COPAM/CERH-MG – 01/2008			Unidade de Medida
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	
Turbidez	40	100	100	NTU
Cor Verdadeira	Cor Natural	75	75	UPt
Sólidos Dissolvidos totais	500	500	500	mg / L
Sólidos em Suspensão totais	50	100	100	mg / L
Nitrogênio amoniacal total	3,7 p/ pH <=7,5 2,0 p/ 7,5<pH<=8,0 1,0 p/ 8,0<pH<=8,5 0,5 p/ pH>8,5	3,7 p/ pH <=7,5 2,0 p/ 7,5<pH<=8,0 1,0 p/ 8,0<pH<=8,5 0,5 p/ pH>8,5	13,3 p/ pH <= 7,5 5,6 p/ 7,5<pH<=8,0 2,2 p/ 8,0<pH<=8,5 1,0 p/ pH>8,5	mg / L N
Nitrato	10	10	10	mg / L N
Nitrito	1	1	1	mg / L N
OD	> 6	> 5	> 4	mg / L
Cianeto Livre	0,005	0,005	0,022	mg / L CN
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,003	0,003	0,01	mg / L C6H5OH
Alumínio Dissolvido	0,1	0,1	0,2	mg / L Al
Arsênio total	0,01	0,01	0,033	mg / L As
Bário total	0,7	0,7	1	mg / L Ba
Boro total	0,5	0,5	0,75	mg / L B
Cádmio total	0,001	0,001	0,01	mg / L Cd
Chumbo total	0,01	0,01	0,033	mg / L Pb
Cobre Dissolvido	0,009	0,009	0,013	mg / L Cu
Cromo total	0,05	0,05	0,05	mg / L Cr
Ferro Dissolvido	0,3	0,3	5	mg / L Fe
Manganês total	0,1	0,1	0,5	mg / L Mn
Mercurio total	0,2	0,2	2	µg/L Hg
Níquel total	0,025	0,025	0,025	mg / L Ni
Selênio total	0,01	0,01	0,05	mg / L Se
Zinco total	0,18	0,18	5	mg / L Zn

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

No caso de sedimentos, considerou-se os limites estabelecidos pelo Conselho de Meio Ambiente (CONAMA) por meio de sua Resolução nº 454 de 8 de novembro de 2012 (TABELA 3). Essa resolução define limites de contaminantes em sedimentos para fins de dragagem de leitos de cursos d'água, bem como outras orientações. Os limites definidos nesta resolução, para os metais estudados, se basearam nas Diretrizes de Qualidade para a Análise de Sedimentos, emitidas pelo “*Canadian Council Of Ministers Of The Environment - CCME*”.

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade avaliados nos sedimentos de fundo

Parâmetros Sedimento de Fundo	Limites da Res. CONAMA nº 454/2012	
	Nível 1	Nível 2
Nitrogênio Total (mg/Kg N)	--	--
Alumínio Total (mg/Kg Al)	--	--
Arsênio Total (mg/Kg As)	5,9	17,0
Cádmio Total (mg/Kg Cd)	0,6	3,5
Chumbo Total (mg/Kg Pb)	35,0	91,3
Cobre Total (mg/Kg Cu)	35,7	197,0
Cromo Total (mg/Kg Cr)	37,3	90,0
Ferro Total (%)	--	--
Manganês Total (%)	--	--
Mercurio Total (mg/Kg Hg)	0,17	0,486
Níquel Total (mg/Kg Ni)	18,0	35,9
Selênio (mg/Kg Se)	--	--
Vanádio Total (mg/Kg V)	--	--
Zinco Total (mg/Kg Zn)	123,0	315,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Vale destacar que a Resolução Conama nº 454/2012 não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês. Dessa forma utilizou-se os valores orientadores obtidos por Costa (2015), que realizou um mapeamento geoquímico e estabeleceu os valores de referência (*Background*) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero. Portanto, os valores de referência de 28,10%, 4,52% e 0,33%, para ferro, alumínio e manganês, respectivamente, utilizando a técnica de análise fractal, estabelecidos por Costa (2015), foram utilizados no presente relatório como referência.

6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2021, NA CALHA DO RIO PARAPEBA

A seguir é apresentada uma análise dos resultados obtidos no monitoramento emergencial ao longo do rio Parapeba, para os dados obtidos entre 26/01/19 a 30/12/2021. Foram utilizados para complementar essa análise a Série Histórica com dados de águas superficiais do IGAM entre os anos de 2008 a 2018.

No presente relatório, são apresentados os gráficos em boxplot para os três anos de monitoramento, por ponto, para os parâmetros oxigênio dissolvido, pH in loco, turbidez, sólidos totais em suspensão, ferro dissolvido e total, alumínio dissolvido, manganês total, chumbo total, mercúrio total, arsênio total, cádmio total, cobre total, cromo total, níquel total, zinco total. Esses parâmetros foram selecionados com o objetivo de avaliar o grau de interferência dos recursos hídricos afetados, permitindo, ainda, a avaliação dos níveis de poluição e degradação ambiental dos corpos de água em função das características do rejeito e da capacidade de arraste e revolvimento de material de fundo com o deslocamento da pluma.

Os gráficos foram apresentados com as estações BP036, BPE2, BP068, BP070, BP072, BPE3, BP082, BP083, BP077, BP078, BP087, BP099, BPE6, BPE7, BPE8 de montante a jusante do rio Paraopeba. Na análise de águas superficiais os dados foram separados por períodos "seco" e "chuvoso", devido a diferença na amplitude dos resultados observados entre eles.

Os *boxplots* representam as estatísticas: máximos, mínimos, médias, medianas, 25º percentil, 75º percentil, limite inferior (LI), limite superior (LS) e *outliers* dentro dos diagramas. Em que,
 $LI = 25^{\circ}percentil - 1,5 * (75^{\circ}percentil - 25^{\circ}percentil);$ $LS = 75^{\circ}percentil + 1,5 * (75^{\circ}percentil - 25^{\circ}percentil);$
outliers são os valores registrados acima do LS ou abaixo do LI.

As visualizações representam a dispersão e variabilidade dos dados, além de comportamentos pontuais de cada diagrama. O *boxplot* também é utilizado para destacar diferença entre fatores.

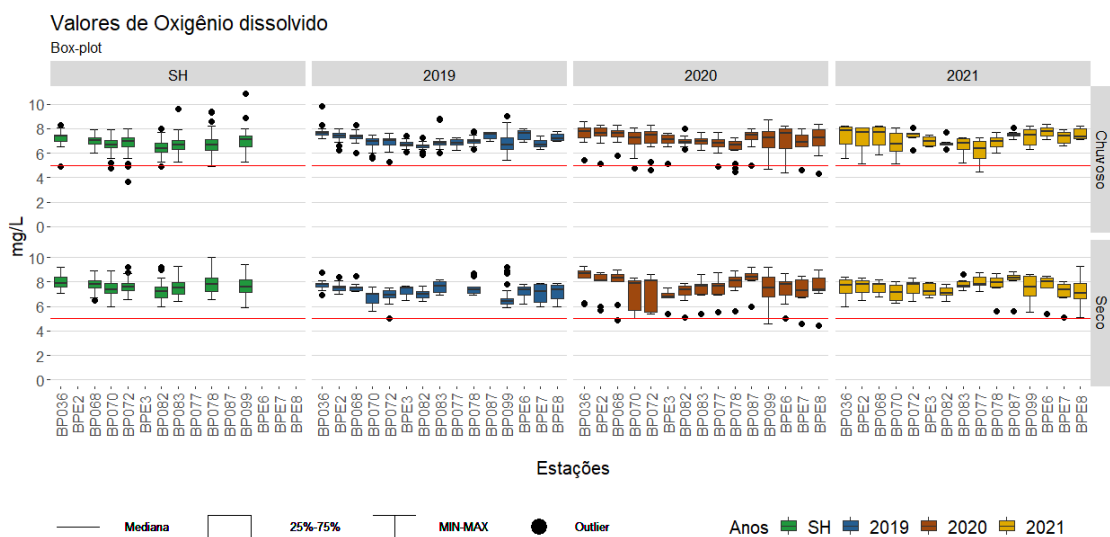
Nesses gráficos, também são considerados os padrões de qualidade para os corpos de água enquadrados como Classe 2, segundo Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH-MG nº 1 de 2008.

Oxigênio dissolvido

As análises de oxigênio dissolvido (OD) informam sobre os níveis de oxigenação das águas, bem como o consumo de oxigênio decorrente da oxidação de possíveis cargas de material orgânico carregadas ao sistema hídrico em questão.

Observa-se no gráfico 1 que, no monitoramento realizado em 2019 os valores de oxigênio dissolvido variaram entre 5,0 a 9,8 mg/L O₂, em 2020 entre 4,3 a 9,3 mg/L O₂ e em 2021 variaram entre 4,5 a 9,3 mg/L O₂, estando dentro da normalidade histórica (2000-2018) de cada ponto. Também não houve variação significativa ao longo de todo o curso do rio Paraopeba durante os primeiros dias após o desastre. Durante o monitoramento realizado em 2019, todos os resultados estiveram dentro dos limites legais (valores acima de 5 mg/L). No entanto, em 2020, foram registrados *outliers* ao limite legal para Classe 2 (abaixo de 5 mg/L) nos pontos BP070, BP072, BP077, BP078 e nos pontos localizados após UHE de Retiro Baixo (BPE7 e BPE8). No ano de 2021, no período chuvoso, observa-se que houve violação no ponto BP077, com valor abaixo de 5 mg/L, já no período seco, não houve valores inferiores ao limite.

Gráfico 1 – Gráfico de *boxplot* dos valores de oxigênio dissolvido na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



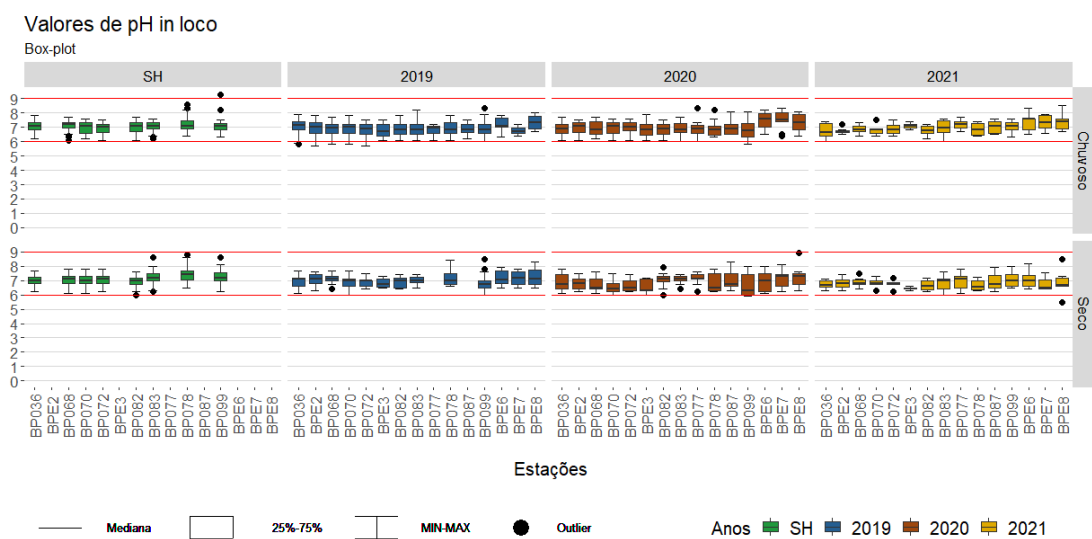
Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

pH in loco

As análises de pH visam balizar possíveis alterações no equilíbrio ácido-básico das águas. No caso em questão, tais alterações podem decorrer de possíveis aumentos dos teores orgânicos, o que acarreta na produção de CO₂ pelos processos de decomposição orgânica, bem como pela presença de compostos húmicos carregados dos solos orgânicos das áreas da bacia de drenagem.

Observa-se no gráfico 2 que, semelhante ao comportamento dos dados de oxigênio dissolvido, não houve variação significativa do pH no monitoramento realizado em 2019 a 2021. Os resultados estão dentro do intervalo aceitável para rios de Classe 2 (entre 6 e 9), que de acordo com os limites estabelecidos na legislação, são valores adequados para a proteção da vida aquática.

Gráfico 2– Gráfico de *boxplot* dos valores de pH na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

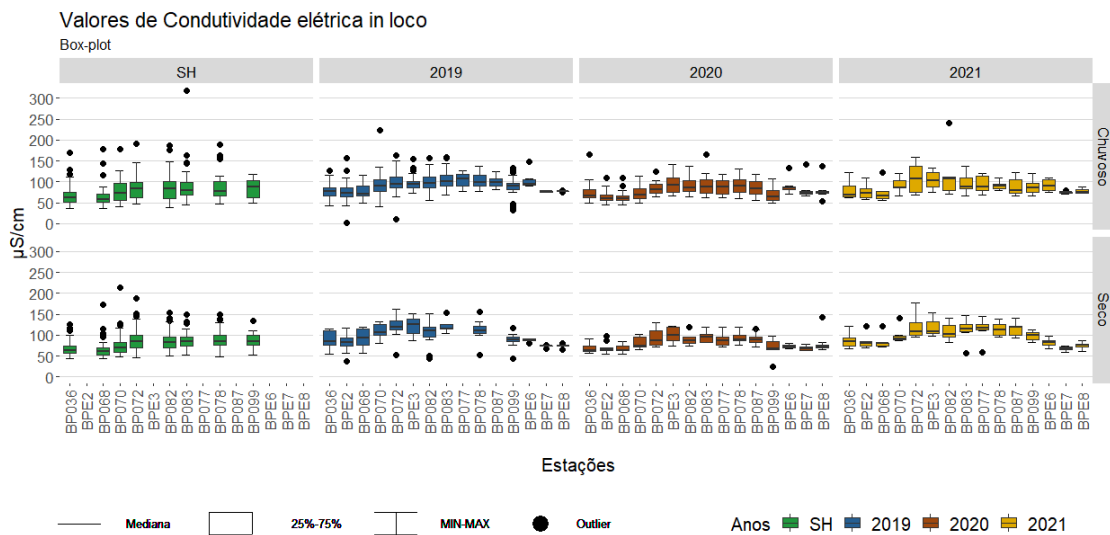
Condutividade elétrica

As medições de condutividade elétrica se referem à potencialidade de aportes de compostos solúveis em geral, uma vez que esse parâmetro indica o grau de condução elétrica de uma amostra de água, determinado pela sua concentração iônica. Com isso, esse parâmetro é uma importante indicação indireta para uma avaliação sobre a disponibilidade de micronutrientes para os processos produtivos. Informa também sobre o grau de mineralização das águas, decorrente da dissolução de compostos inorgânicos, bem como resultante da decomposição química e biológica de material orgânico.

No gráfico 3 pode ser observado que a condutividade elétrica apresentou resultados, de forma geral, próximos da normalidade histórica (2000-2018) no monitoramento realizado em 2019 a

2021. Contudo, observa-se um ligeiro aumento da condutividade nos períodos de estiagem, especialmente no ano de 2021, no trecho entre o município de Betim (BP072) e a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP087), onde as medianas estiveram acima 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esse comportamento pode ser explicado pela diminuição do aporte de sólidos para dentro do corpo de água nos períodos de estiagem, podendo acarretar no deslocamento do equilíbrio para o aumento da solubilização dos íons na coluna d'água, uma vez que há uma menor concentração de partículas em suspensão e isso pode favorecer o aumento da concentração dos íons. No entanto, é imprescindível o acompanhamento dos resultados ao longo dos anos para se confirmar ou não esse comportamento.

Gráfico 3 – Gráfico de *boxplot* dos valores de condutividade elétrica na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Turbidez

As análises de turbidez se reportam à magnitude de aportes de material particulado e solúvel, ao qual o sistema hídrico em questão está submetido. É uma medida da dificuldade da luz em atravessar a água causada por materiais suspensos como microrganismos e partículas sólidas. As águas que possuem alta turbidez apresentam uma elevação na temperatura e conseqüente diminuição do oxigênio dissolvido. A alta turbidez também diminui a incidência da luz, prejudicando a fotossíntese que contribui para oxigenar a água (ABU SHMEIS, 2018).

O parâmetro turbidez mostra-se como um dos principais indicativos da presença do impacto decorrente do avanço dos rejeitos. No gráfico 4, são apresentados os resultados de turbidez no período pré-rompimento e nos três anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (27 de janeiro de 2019 a 30 de dezembro de 2021), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

De forma geral, observa-se que, nos períodos chuvosos, há elevação dos valores de turbidez registrados, em todos os pontos. Esses resultados são esperados tendo em vista que, nesses períodos, o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio acarretam a remobilização do material depositado no leito do rio e nas margens.

Os pontos localizados nos primeiros 40 km após o rompimento foram os mais impactados e apresentaram os níveis mais elevados de turbidez. Os maiores valores máximos foram observados em fevereiro de 2019, com resultados iguais a 18.588 NTU, 17.148 NTU e 1.545 NTU, respectivamente. Valores que são superiores aos registrados na série histórica do Igam (2000-2018). A piora da qualidade da água do rio Paraopeba nesses pontos mais impactados (entre Brumadinho e Esmeraldas), durante o período chuvoso, também está relacionada às atividades de dragagem realizadas pela Vale no rio Paraopeba próximo a sua confluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

Esses resultados demonstram os impactos causados pelos rejeitos das barragens B1, BIV e BIV-A, e evidencia o amortecimento dos impactos nos trechos localizados a jusante dos barramentos presentes ao longo do curso de água (Termelétrica de Igarapé e UHE Retiro Baixo).

Nos períodos chuvosos de 2020 e 2021, foram observadas elevações nos valores de turbidez, ainda que inferiores àqueles observados no ano de 2019, exceto no trecho localizado a montante da foz com o ribeirão Ferro-Carvão.

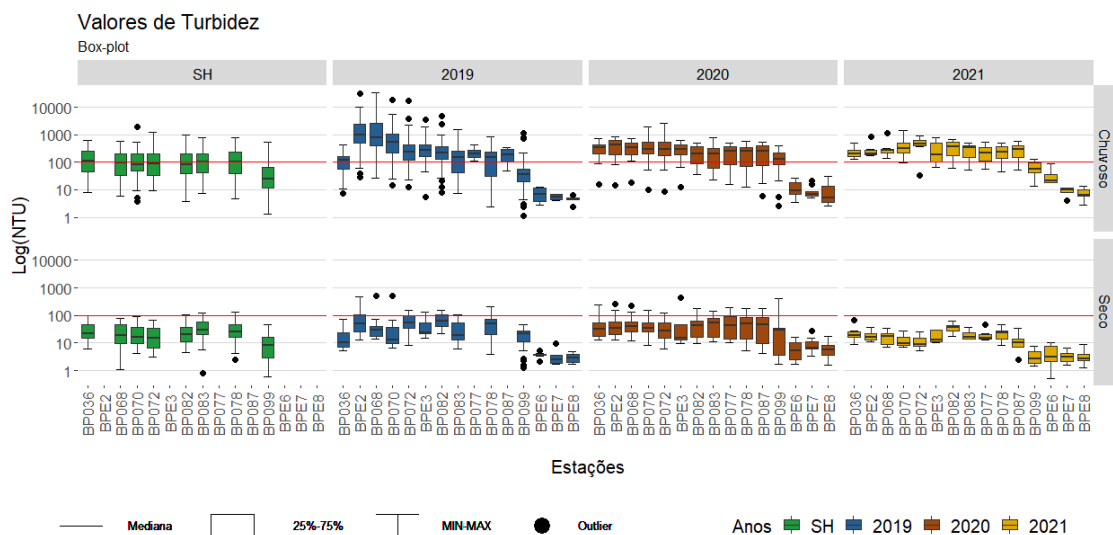
No período chuvoso de 2020, foi registrado o valor máximo de 2498 NTU no ponto BP072 localizado em Betim. No período seco, houve violação do limite legal de turbidez desde o trecho a montante do ribeirão Ferro Carvão até a jusante da UHE de Retiro Baixo (BP099). Já em

2021, no período chuvoso, o valor máximo foi de 1400 NTU e não houve valores acima do limite de 100 NTU no período seco desse ano.

Considerando os resultados analisados, até a data de 30 de dezembro de 2021, não foi possível identificar alterações nos níveis de turbidez que refletissem a chegada da lama no trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099).

Ressalta-se que este trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, o que pode explicar a ocorrência dos picos de turbidez nos períodos chuvosos.

Gráfico 4 – Gráfico de *boxplot* dos valores de turbidez na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Sólidos totais em suspensão

Entre os resíduos mais importantes estão o material em suspensão, que é constituído de pequenas partículas que se encontram suspensas na água, as quais têm uma fração mineral ou inorgânica e outra orgânica.

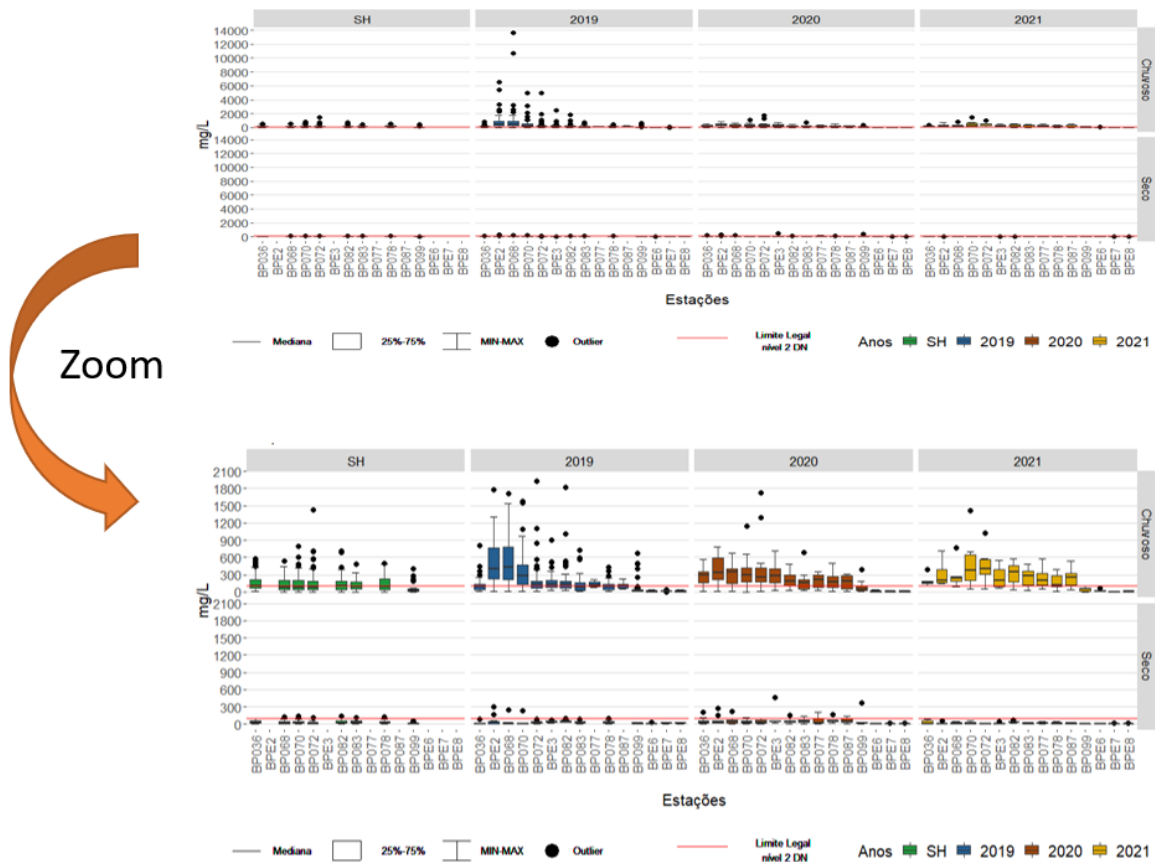
O gráfico 5 apresenta os resultados dos sólidos totais em suspensão, no período pré-rompimento e nos três anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Observa-se que os resultados apresentaram comportamento semelhante ao observado para turbidez, com valores superiores ao limite de Classe 2 (100 mg/L), sobretudo no período chuvoso. Os resultados de sólidos em suspensão, assim como os de turbidez, demonstraram que, no ano de 2019, os primeiros pontos localizados no rio Paraopeba, a jusante do ribeirão Ferro-Carvão, foram os que receberam maior impacto, seguido dos pontos subsequentes. O valor máximo registrado foi de 13.688 mg/L no município de Mário Campos.

Em 2020 e 2021, observa-se que os valores máximos foram menores que os resultados de 2019, nos períodos chuvosos e secos. Entretanto, as medianas e os valores máximos estiveram acima do limite desde a montante do rompimento (BP036) até antes da UHE de Retiro Baixo (BP087) no período chuvoso. O valor máximo registrado em 2020 foi de 1723 mg/L em Betim e em 2021, o registro máximo foi de 1420 mg/L em São Joaquim de Bicas.

Já no período seco, em 2019 houve valores acima do limite nos pontos BPE2, BP068, BP070 (de Brumadinho até São Joaquim de Bicas), em 2020 nos pontos BP036, BPE2, BP068 (de montante a Mário Campos) e BPE3, BP082, BP078 e BP099 (de montante da captação de água de Pará de Minas até depois da UHE de Retiro Baixo). Em 2021, por sua vez, não houve valores acima do limite para sólidos totais em suspensão.

Gráfico 5 – Gráfico de *boxplot* dos valores de sólidos totais em suspensão na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Ferro dissolvido e total

O Ferro (Fe) foi um dos primeiros metais utilizados pelo ser humano e na natureza pode ser encontrado associado a outros minerais, dentre eles muitos óxidos. Nos seres vivos tem papel fundamental, como constituinte de biomoléculas.

O ferro está diretamente relacionado às atividades de mineração desenvolvidas na área do desastre, pois são encontrados no rejeito de minério, sobretudo, no minério de ferro. Por ser o principal insumo da mina, o resultado deste metal é essencial para o entendimento do impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A. Assim, quando são encontradas variações significativas deste elemento, principalmente no período que sucedeu o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, estas podem ser um indicativo da contaminação do corpo d'água pelo rejeito.

O padrão normativo para o ferro prevê apenas a forma dissolvida. Porém, constatou-se que a liberação de ferro no rio Paraopeba seria melhor detectada, se fosse considerada a fração total desse parâmetro. Dessa forma, essas duas formas de ferro, dissolvida e total, foram analisadas pelo IGAM. É possível notar que, inicialmente, a lama de rejeitos teve um impacto reduzido para ferro dissolvido. O ferro, apesar de ser um dos principais constituintes do material proveniente do rompimento da barragem, os óxidos e hidróxidos de ferro possuem produtos de solubilidade (K_{ps}) extremamente baixos. O produto de solubilidade é uma constante de equilíbrio que relaciona um soluto pouco solúvel e seus íons em solução, e na prática é a capacidade de um sólido se dissolver na água. Assim espera-se que a maior parte do ferro esteja associado ao particulado em suspensão na forma de ferro total, e não na forma dissolvida como previsto no padrão normativo. Desta forma, o impacto reduzido logo após o desastre para o parâmetro ferro pode estar relacionada a baixa solubilidade dos óxidos e hidróxidos de ferro.

No gráfico 6 são apresentados os resultados de ferro dissolvido no período pré-rompimento e nos três anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (27 de janeiro de 2019 a 30 de dezembro de 2021), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

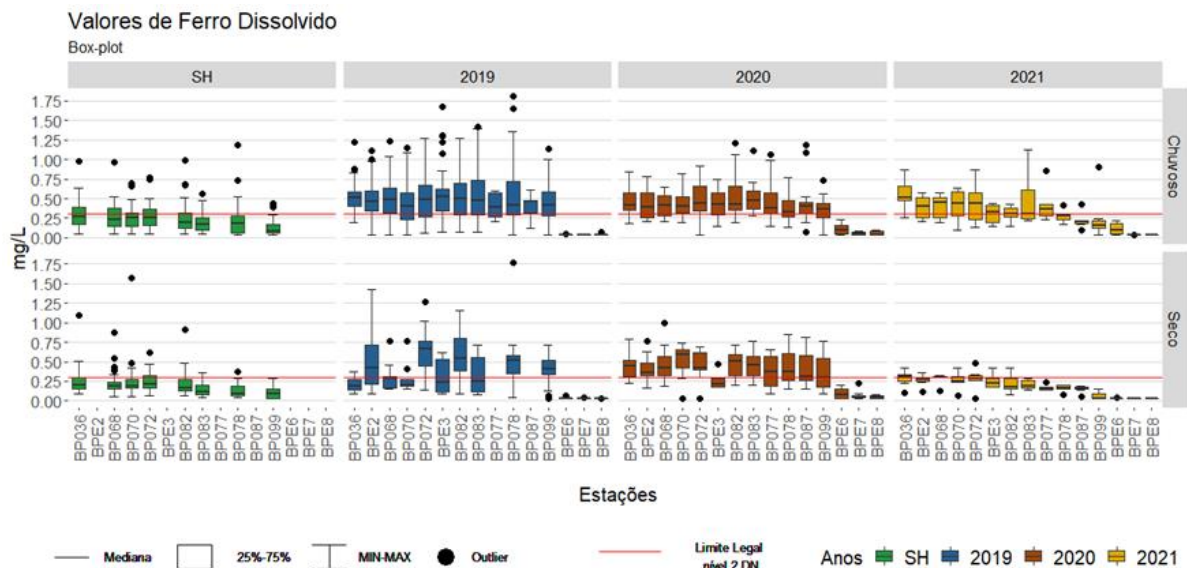
Na análise dos resultados de ferro dissolvido dos últimos três anos avaliados verifica-se que em toda a calha do rio Paraopeba, desde o ponto a montante do ribeirão Ferro Carvão (BP036), que não sofreu impacto da lama de rejeitos, até a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) as medianas de ferro dissolvido estiveram acima do limite legal, a exceção período de estiagem de 2021, em que as medianas sofreram uma redução, com valores bastante próximos ao limite de classe (0,3 mg/L).

Em todo o período chuvoso de 2019 e 2020, os valores máximos, bem como as medianas violaram o limite legal (0,3 mg/L), sendo o máximo registrado de 2019 igual a 1,82 mg/L e de 2020 igual a 1,21 mg/L. Em 2021, houve uma diminuição dos resultados de ferro dissolvido nos pontos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Entretanto, em 2021 continuaram extrapolando o limite de classe, o maior valor registrado foi de 1,13 mg/L em Paraopeba (BP083).

No período seco, também ocorreram violações ao limite legal de ferro dissolvido para águas de Classe 2. Observa-se que, na série histórica, já haviam registros desse parâmetro acima do limite legal. Em 2019, os limites superiores registrados violaram o limite legal de Brumadinho à UHE de Retiro Baixo. Em 2020, desde a montante do rompimento (BP036) até Betim (BP072) e de Esmeraldas (BP082) à UHE de Retiro Baixo, as medianas e os valores máximos foram superiores ao limite. Já em 2021, é possível observar uma diminuição dos resultados de ferro dissolvido e um *outlier* de 0,5 mg/L em Betim.

Considerando os resultados nos pontos a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), o maior valor máximo de ferro dissolvido registrado nesse trecho foi de 1,14 mg/L, no período chuvoso, em 2019. Observa-se que quase todos os resultados dos anos de 2019 e 2020, se apresentaram acima dos valores da série histórica do Igam (2000 a 2018). Em 2021, os resultados estiveram abaixo do limite legal nesse ponto, exceto o *outlier* de 0,91 mg/L no período chuvoso. Ressalta-se ainda, que este trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, o que pode explicar a ocorrência dos picos de concentração, principalmente nesses períodos chuvosos.

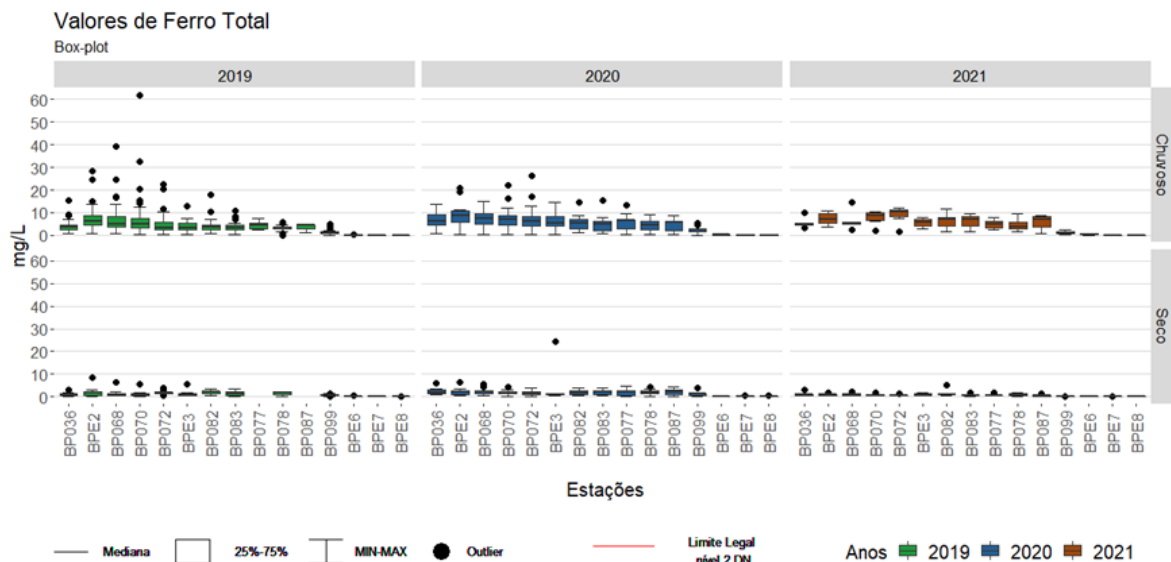
Gráfico 6 – Gráfico de *boxplot* dos valores de ferro dissolvido na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Ao avaliar os resultados de ferro total, gráfico 7, observa-se que os maiores registros de ferro foram obtidos nos pontos a jusante da foz com o ribeirão Ferro-Carvão (a partir do BPE2). Esses resultados demonstram que no material proveniente das barragens que romperam a maior parte do ferro está associada à fração total e não a dissolvida. Em complemento, os dados de ferro total alinham-se melhor à análise feita para turbidez, com valores mais altos mais próximos da barragem e redução a partir do município de Paraopeba (BP083), a 192 km do rompimento, sendo menos evidente a partir do reservatório da UHE de Retiro Baixo. Isso ocorre devido à sedimentação do ferro adsorvido a partículas sólidas, que avança em velocidade muito inferior à de matéria dissolvida.

Gráfico 7 – Gráfico de *boxplot* dos valores de ferro total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Manganês total

Nos ecossistemas aquáticos, o manganês proveniente do sulfato de manganês e do cloreto de manganês reage com a água formando um complexo (Mn_6H_2O) altamente biodisponível (ABU SHMEIS, 2018), e como o ferro total também está diretamente relacionado às atividades de mineração, sendo essencial para o entendimento do impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A.

A gráfico 8 apresenta os resultados de manganês total no período pré-rompimento e nos três anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (27 de janeiro de 2019 a 30 de dezembro de 2021), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Assim como ocorre com a turbidez e os sólidos totais em suspensão, os teores mais elevados de manganês total foram registrados nos pontos localizados nos primeiros 40 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, seguidos dos pontos subsequentes.

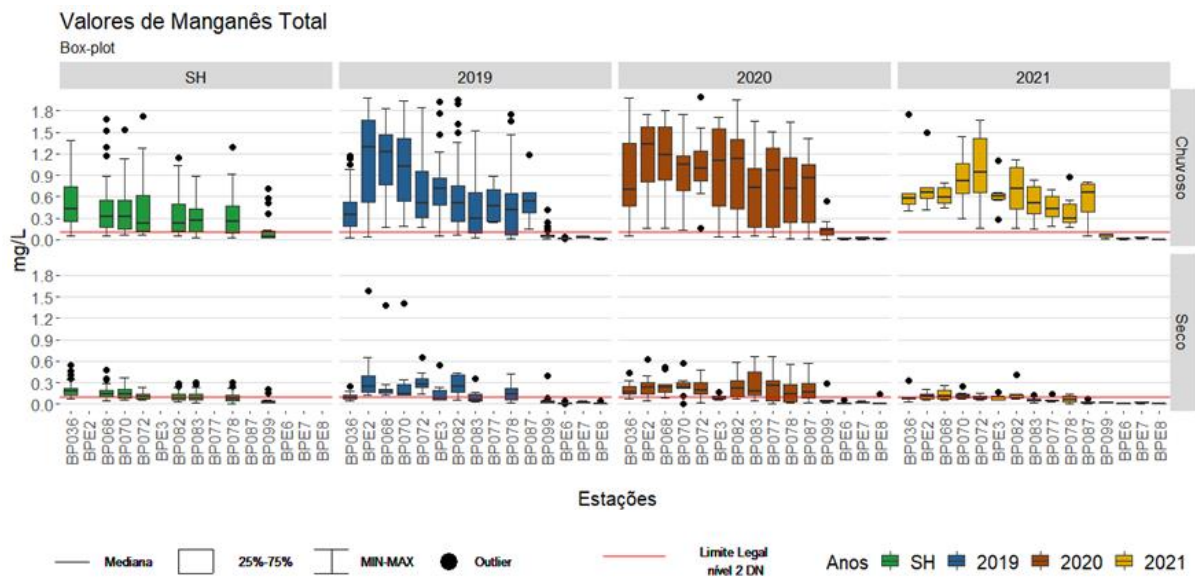
Observa-se que ao se comparar os resultados, no período chuvoso, de 2021 com os anos de 2019 e 2020, houve uma atenuação nos valores de manganês total. Os pontos (BP036 a montante), Betim (BPE2) e Mário Campos (BP068) tiveram reduções significativas dos limites superiores e da mediana. O valor máximo registrado foi um *outlier* de 1,75 mg/L no BP036 (trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão).

Os valores máximos mais elevados foram registrados nos anos de 2019 e 2020, se comparados à série histórica do Igam. Apesar do trecho localizado a montante (BP036) também apresentar valores de manganês total acima do limite legal (0,1 mg/L), eles são muito inferiores aos pontos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

No período seco, observa-se uma diminuição nos valores de manganês total, os maiores registros foram no ano de 2019, com *outliers* próximos a 1,5 mg/L, nos pontos BPE2, BP068 e BP070, localizados a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

No trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), o maior valor máximo de manganês total registrado foi de 0,72 mg/L, no período chuvoso, na série histórico do Igam. Esse trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, dessa forma a ocorrência dos picos de manganês total, principalmente nos períodos chuvosos, podem ser consequência dessa influência.

Gráfico 8 – Gráfico de *boxplot* dos valores de manganês total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Alumínio dissolvido

O alumínio (Al) é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre, estando presente em grandes quantidades no solo e na água. Em pH ácido, ocorre um aumento de sua solubilidade e, conseqüentemente da sua biodisponibilidade.

A gráfico 9 apresenta os resultados de alumínio dissolvido no período pré-rompimento e nos três anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (27 de janeiro de 2019 a 30 de dezembro de 2021), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

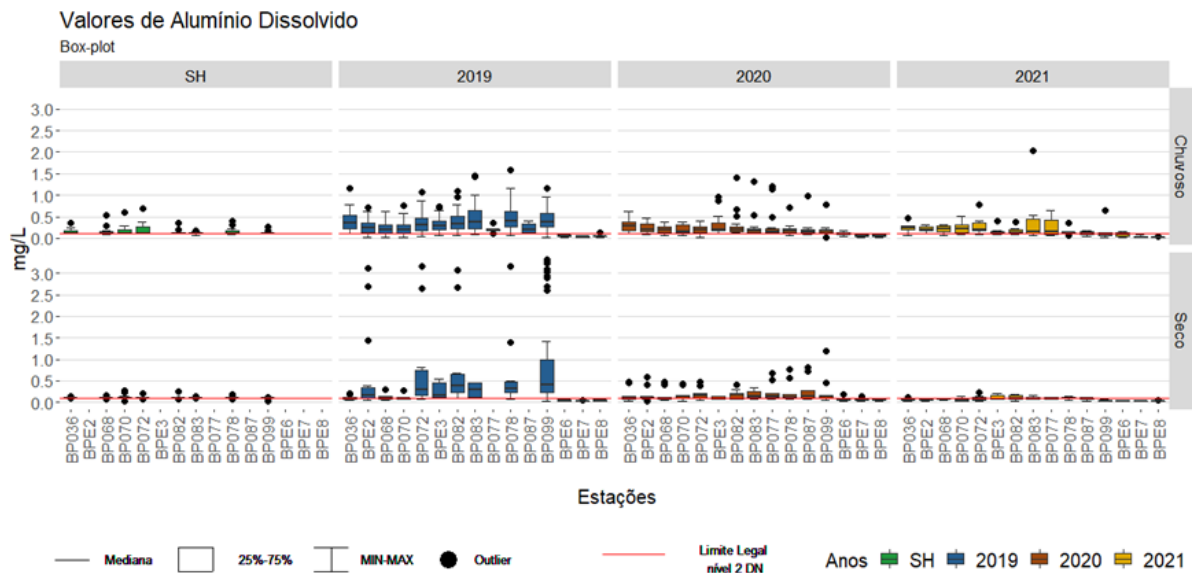
Observa-se no gráfico 9 que, de maneira geral, os maiores resultados de alumínio dissolvido ocorreram em 2019. No período chuvoso, o maior valor foi um *outlier* de 1,5 mg/L no ponto BP078, em Curvelo. Em 2020, o valor máximo foi de 1,40 mg/L e ocorreu em Esmeraldas (BP082), em 2021 o registro máximo foi em Paraopeba (BP083) igual a 2 mg/L.

A presença natural do alumínio dissolvido no corpo d'água está relacionada ao carreamento do solo nos períodos chuvosos. Ressalta-se que as variações de alumínio dissolvido na bacia não

foram correlacionadas diretamente com a presença do rejeito. O parâmetro alumínio dissolvido apresentou-se divergente ao comportamento geral de turbidez, ferro total e manganês total, ao revés, com valores próximos do máximo histórico, justamente nos primeiros 40 km a jusante da barragem, aumentando em todos os outros pontos ao longo da calha do rio Paraopeba, inclusive no ponto a montante.

No período seco, por sua vez, em todos os pontos do rio Paraopeba, a comparação dos resultados obtidos em 2021 em relação aos anos anteriores, revela que houve uma redução nos valores de alumínio dissolvido.

Gráfico 9 – Gráfico de *boxplot* dos valores de alumínio dissolvido na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Chumbo Total

O gráfico 10 apresenta os resultados do chumbo total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

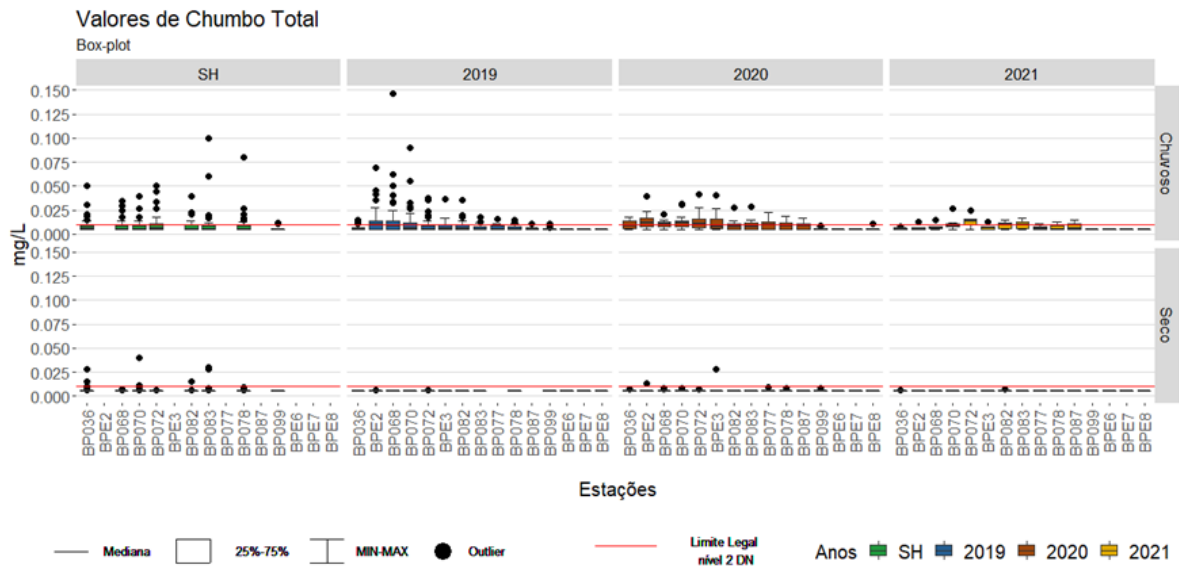
As concentrações de chumbo total no período chuvoso de 2021, apresentaram diminuição ao se comparar aos anos de 2019 e 2020. Os maiores valores foram registrados em 2019, logo após o desastre. Apesar de não fazer parte da composição do rejeito, a presença de chumbo na água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, e propiciaram o aumento das concentrações de alguns contaminantes no período após o rompimento.

Observa-se que os pontos do rio Paraopeba de montante do ribeirão Ferro Carvão até a montante da UHE de Retiro Baixo (BP036 a BP087) apresentaram resultados superiores ao limite de Classe 2 (0,01 mg/L) durante o período chuvoso nos três anos monitorados, 2019, 2020 e 2021. Cabe ressaltar que em 2020, ocorreram chuvas intensas, o que contribuiu com as ocorrências de chumbo total, acima do limite legal.

Os valores de chumbo no período seco dos anos avaliados após o desastre, por sua vez, ficaram abaixo do limite de classe, exceções se deram nas estações de amostragem localizadas em Brumadinho e Esmeraldas (BPE3), no ano de 2020.

Nos pontos a jusante da UHE Retiro Baixo, em Felixlândia, não foi identificada violação do limite de Classe 2 para chumbo total (0,01 mg/L) nas amostras coletadas em todo o monitoramento dos três anos, exceção ocorreu devido a um *outlier* no BPE8 no ano de 2020 no período chuvoso.

Gráfico 10 – Gráfico de *boxplot* dos valores de chumbo total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Mercúrio Total

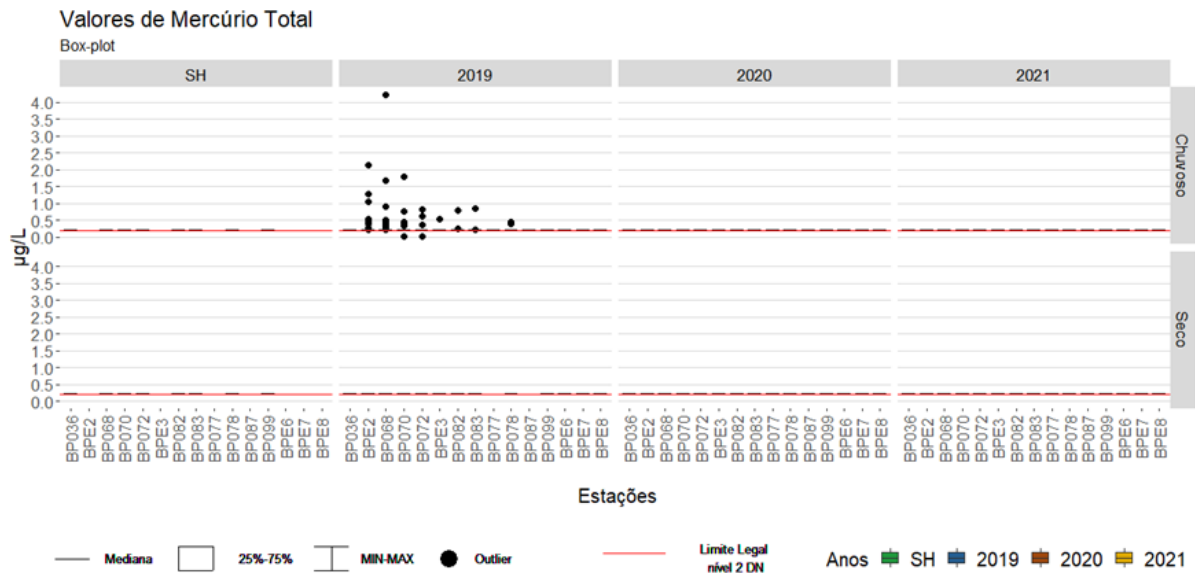
O mercúrio total, que não tinha sido detectado historicamente na bacia do rio Paraopeba, passou a ser identificado em valores acima do permitido pela legislação, logo após o rompimento da barragem. Assim como ocorre com o chumbo, a disponibilização do mercúrio para o corpo d'água não têm relação direta com o rejeito da barragem B1, uma vez que não faz parte da composição do rejeito. Contudo, a presença do mercúrio em água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, o que propiciou um aumento nas concentrações desse contaminante no período pós-desastre.

O gráfico 11 apresenta os resultados do mercúrio total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

No gráfico 11 pode-se observar que as violações de mercúrio total (valores acima de 0,2 µg/L) foram registrados em 2019 entre Brumadinho (BPE2) a São Joaquim de Bicas (BP078), pontos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Em 2020 e 2021, não houve registros de

mercúrio total na calha do rio Paraopeba (todos os resultados estiveram abaixo do limite do método analítico - 0,2 µg/L).

Gráfico 11 – Gráfico de *boxplot* dos valores de mercúrio total na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

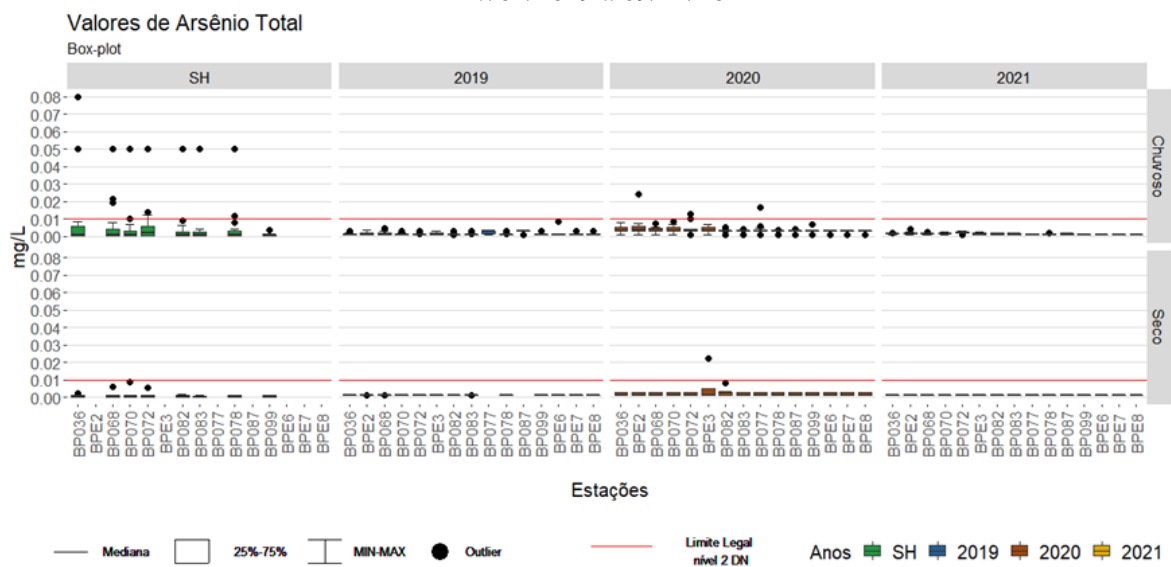
Arsênio total

O gráfico 12 apresenta os resultados do arsênio total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

No que se refere aos resultados de arsênio total, apresentados no gráfico 12, não foram registradas violações ao limite de Classe 2 (0,01 mg/L), durante o ano de 2019. Em 2020, valores de arsênio total acima do limite legal foram registrados no período chuvoso nas cidades de Brumadinho (BPE2), Betim (BP072) e Paraopeba (BP077) e no período seco em Pará de Minas (BPE3) e Esmeraldas (BP082). Em 2021, não houve valores acima do limite para arsênio total.

A ocorrência do arsênio no rio Paraopeba não tem relação direta com o rejeito proveniente da barragem 1, uma vez que não faz parte da sua composição. Além disso, os valores máximos da série histórica do Igam para cada ponto indicam que, mesmo antes do rompimento da barragem, o arsênio já havia sido detectado em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada antes da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. A presença do arsênio na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas.

Gráfico 12 – Gráfico de *boxplot* dos valores de arsênio total na água superficial, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Níquel total

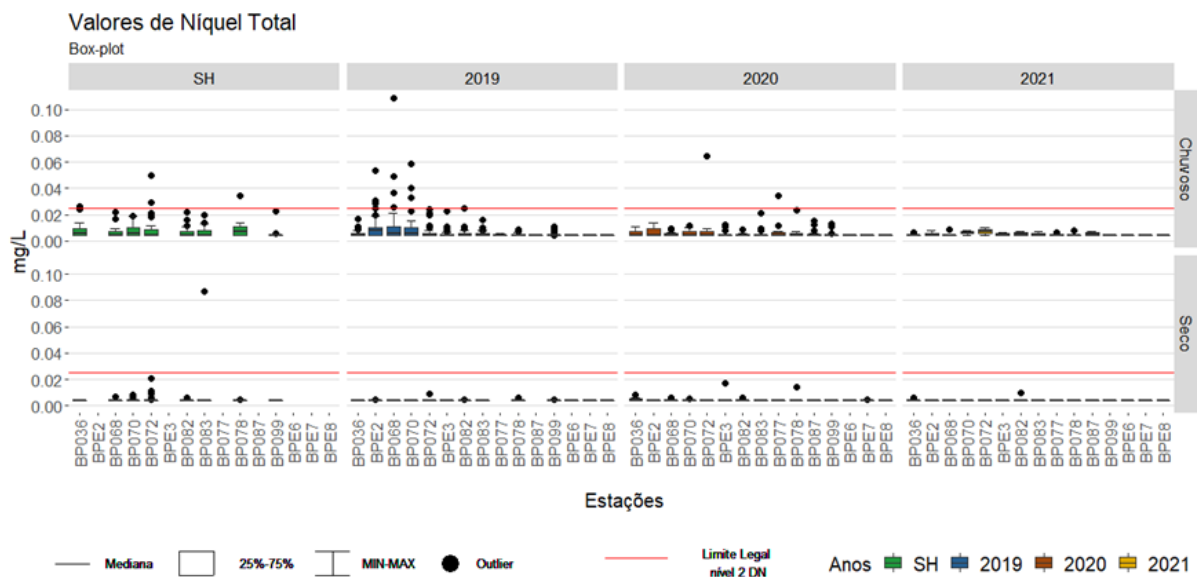
O gráfico 13 apresenta os resultados do níquel total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

Com relação ao parâmetro níquel total (gráfico 13), foram registradas violações ao limite de Classe 2 (0,025 mg/L) em 2019, logo após o rompimento das barragens. Essas violações ocorreram de Brumadinho (BPe2) a São Joaquim de Bicas (BP070), e atingiram valores

superiores aos máximos registrados para a série histórica. Para os pontos localizados em Betim até Felixlândia e o ponto a montante do desastre, não foram observados valores de níquel total acima do limite legal, estando os resultados próximos ou abaixo do máximo histórico.

Em 2020, o níquel total, que não era mais detectado desde o mês de fevereiro de 2019, no período chuvoso, registrou valores acima do limite legal entre os municípios de Betim e Paraopeba. Ressalta-se que o intenso período chuvoso no primeiro trimestre de 2020, tenha contribuído para o aumento das concentrações de níquel. Para os demais trechos não foram registrados resultados de níquel total acima do limite legal em 2020. Em 2021, não houve valores acima do limite para níquel total.

Gráfico 13 – Gráfico de *boxplot* dos valores de níquel total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Zinco total

Uma das fontes de contaminação do meio aquático pelo zinco é através de rejeitos da atividade de mineração e de efluentes indústrias.

O gráfico 14 apresenta os resultados do zinco total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

Para o zinco total, observa-se no gráfico 14, que em 2019 os valores de zinco total registrados foram superiores aos de 2020 e 2021, no entanto, todos os resultados indicam proximidade ou estão abaixo dos valores máximos da série histórica (2000-2018). Cabe destacar que no ano de 2019 foi registrada violação ao limite de Classe 2 (0,18 mg/L) somente nas estações de amostragem localizadas a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036) e em Mário Campo (BP068), sendo que no ponto a montante do desastre, em 2019, tendo atingido valor superior ao máximo da série histórica nesse ponto. Para os demais pontos da calha do rio Paraopeba não foram identificados valores de zinco total em desconformidade com o limite legal durante o monitoramento realizado nos últimos três anos.

Gráfico 14– Gráfico de *boxplot* dos valores de zinco total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



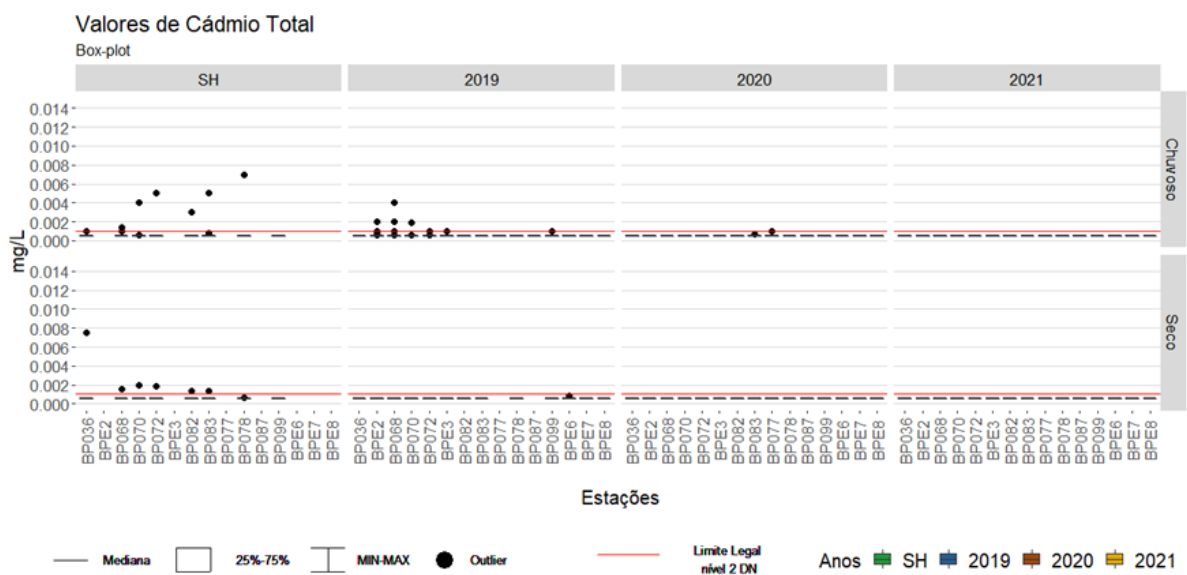
Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Cádmio total

O gráfico 15 apresenta os resultados do cádmio total na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

Os resultados de cádmio total (gráfico 15), observa-se que as violações ao limite de Classe 2 (0,001 mg/L) ocorreram em 2019, entre os municípios de Brumadinho (BPE2) e São Joaquim de Bicas (BP070). Entre os municípios de Betim (BP072) a Felixlândia (BP099) foi identificada a presença de cádmio próximo ao limite legal. Em 2020, houve apenas um registro de cádmio acima do limite de classe entre Paraopeba e Pompéu. Em 2021, não houve valores acima do limite para cádmio total nos pontos monitorados.

Gráfico 15 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cádmio total na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Cobre dissolvido

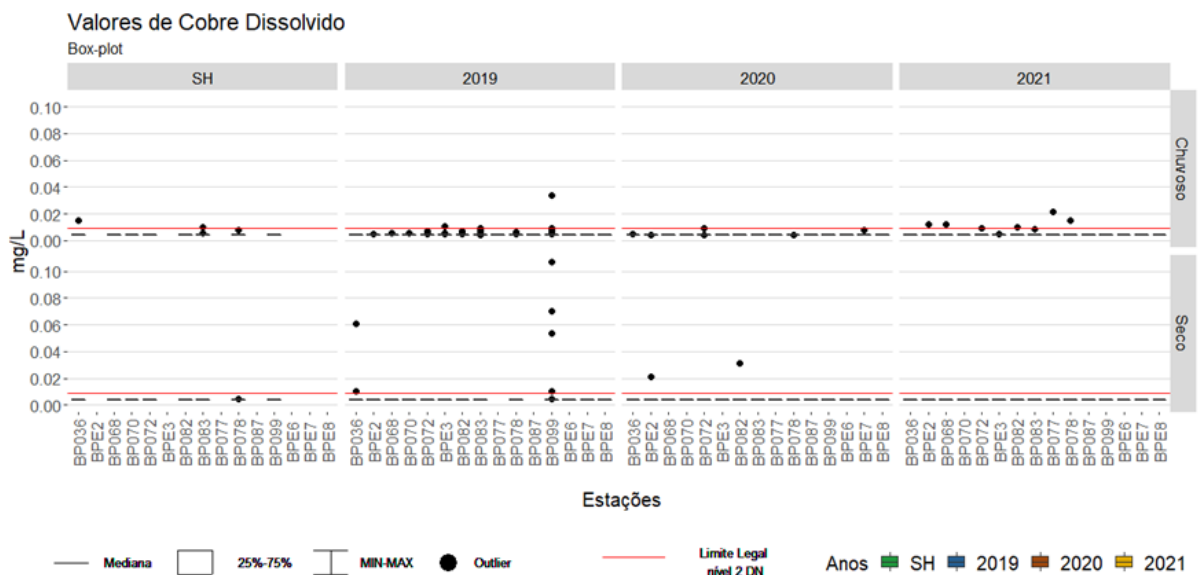
O gráfico 16 apresenta os resultados do cobre dissolvido na série histórica e no monitoramento realizado nos anos de 2019, 2020 e 2021.

Observa-se no gráfico 16 que no ano de 2019, as violações de cobre dissolvido ao limite de Classe 2 (0,009 mg/L) ocorreram entre Betim (BP072) a Felixlândia (BP099), bem como no trecho não impactado (antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão - BP036). Em 2020, as

violações de cobre dissolvido ocorreram de maneira pontual nos municípios de Brumadinho (BPE2), Betim (BP072) e Esmeraldas (BP082). No ano de 2021 foram registradas violações do limite apenas no mês de fevereiro nas estações localizadas em Brumadinho (BPE2), Mário Campos (BP068), Betim (BP072), Esmeraldas (BP082), Paraopeba (BP077) e Pompéu (BP078). Todos os demais registros de cobre dissolvido estiveram abaixo do limite de Classe 2 (0,009 mg/L) ou abaixo do limite de quantificação do método de análise (0,004 mg/L). Ressalta-se que o trecho de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, considerado como mais impactado, não sofreu variações significativas nos valores de cobre dissolvido que pudessem estar relacionados diretamente com o rejeito proveniente do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, visto que o cobre não faz parte da composição do rejeito.

Os valores máximos da série histórica do Igam indicam que a presença do cobre na bacia do rio Paraopeba é anterior ao rompimento da barragem. O cobre já havia sido detectado em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. A sua presença na coluna d'água pode ser favorecida por atividades antrópicas e, ocasionalmente, uma fração do cobre é disponibilizado para o curso d'água.

Gráfico 16 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cobre dissolvido na água superficial no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Para os demais metais avaliados: bário total, boro total, cromo total, selênio total, vanádio total, além dos parâmetros cianeto livre, fenóis totais, nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal não foram registradas violações do limite de classe, segundo a Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008, de Minas Gerais.

8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A DEZEMBRO DE 2021

A seguir é apresentada uma análise dos resultados de sedimentos coletados ao longo do rio Paraopeba, para os dados do monitoramento emergencial obtidos entre 27 de janeiro de 2019 a 09 de dezembro de 2021. Conforme detalhado no Item 5.3 Frequência de amostragem, o monitoramento da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba teve início logo após o rompimento das Barragens B1, BIV e BIV-A. Durante os primeiros 60 dias, o monitoramento de sedimentos foi semanal e a partir de então passou a mensal.

A seguir são apresentados os gráficos de *boxplot* de todos os valores registrados, por ponto de monitoramento, para os anos de 2019 a 2021, para os metais nos sedimentos de fundo. O *boxplot* é um gráfico que representa a variação dos dados obtidos por meio dos percentis, 25, 50 e 75%, além dos máximos e mínimos obtidos para cada ponto, bem como os *outlier*, definido como: valores extremos medidos, ou seja, valores que não estão dentro do seguinte intervalo:

$[(\text{percentil } 25 - 1,5 * (\text{percentil } 75 - \text{percentil } 25)) \text{ até } (\text{percentil } 75 + 1,5 * (\text{percentil } 75 - \text{percentil } 25))]$.

O presente estudo analisou além dos metais ferro, manganês e alumínio, os contaminantes: arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel, zinco, estrôncio, titânio e vanádio.

As concentrações dos metais e arsênio nos sedimentos foram comparadas com os Níveis 1 e 2, definidos para águas doces, da Resolução Conama nº 454 de 2012 (Tabela 3). A Resolução Conama nº 454/2012 não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês. Contudo, Costa (2015) em sua pesquisa intitulada “Mapeamento Geoquímico e

Estabelecimento de Valores e Referência (Background) de Sedimentos Fluviais do Quadrilátero Ferrífero”, encontrou os valores de referência de 28,10%, 4,52% e 0,33%, para ferro, alumínio e manganês, respectivamente, utilizando a técnica de análise fractal.

Ferro em sedimentos

No Gráfico 17 são apresentados os *boxplot* para ferro dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. No gráfico foram contemplados os resultados por ponto de monitoramento e por ano de análise (2019 a 2021). Os resultados desses metais são expressos em porcentagem de peso seco (%) dada a sua importância relativa do ferro quanto à composição dos sedimentos que geralmente é encontrado.

O material proveniente da Barragem 1, é originário da mineração de ferro, e por consequência esse é o elemento de maior abundância no rejeito. Por essa razão, o ferro juntamente com o manganês, foram considerados metais traçadores do avanço do rejeito sobre os sedimentos de fundo.

Ao avaliar o comportamento geral dos trechos estudados e os valores de ferro, observa-se um aumento expressivo no trecho localizado a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, entre a captação da RMBH em Brumadinho (BPE2) e São Joaquim de Bicas (BP070), quando comparado com a estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036), curso d'água diretamente afetado pelo rejeito das barragens que romperam. A partir da Termelétrica de Igarapé (BP072 - Betim) até a represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE9), observa-se uma redução gradual ao longo do rio. Destaca-se que após a UHE de Retiro Baixo (BP099), os valores de ferro em sua maioria foram inferiores aos registrados no trecho a montante do rompimento da barragem. Esses dados sugerem que o rejeito depositado nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba não transpôs o reservatório de Retiro Baixo.

Os teores mais elevados de ferro, acima do valor de referência de Costa (2015) (28,10%), inicialmente (2019) ocorreram nos trechos localizados logo a jusante da confluência com o

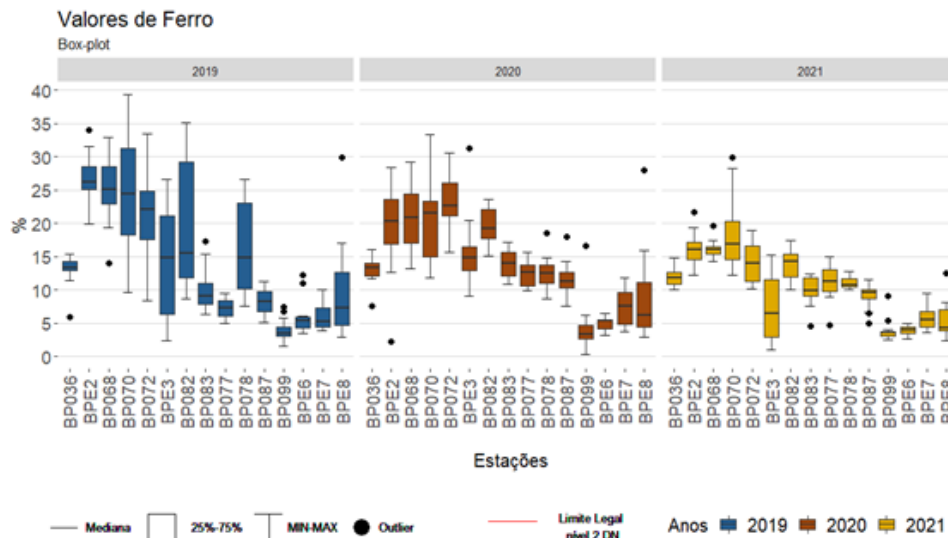
ribeirão Ferro Carvão (BPE2) até Esmeraldas (BP082). Em 2020 valores acima de 28,10% foram registrados no trecho entre captação de Brumadinho (BPE2) e Betim (BP072), primeiros 60km impactados. Já em 2021, apenas 2 registros foram superiores a 28,10%, somente na estação localizada em São Joaquim de Bicas (BP070), nos meses de maio e setembro.

Em 2021 os resultados de ferro nos sedimentos dos primeiros 60 km impactados, entre a captação de Brumadinho (BPE2) e Esmeraldas (BP082), ainda se apresentam superiores aos observados no trecho não impactado pelo rompimento das barragens (BP036). Contudo, já se observa uma aproximação dos teores de ferro entre os trechos a montante e logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão.

De acordo com os dados do Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo (25/01/2019 a 30/06/2019), disponibilizados pela Vale, o ferro presente nos rejeitos se encontra, principalmente, na forma do óxido Fe_2O_3 , conhecido como hematita. A hematita possui uma densidade elevada (4,9 a 5,3 g/cm³), contribuindo para uma deposição mais rápida, principalmente nos primeiros trechos a jusante do rompimento da barragem. Essa característica do rejeito ratifica os valores de ferro obtidos nos sedimentos e discutidos acima.

Na comparação entre os anos de 2019 a 2021 observou-se que os trechos onde os sedimentos de fundo não receberam impacto direto do rompimento das barragens, quais sejam a jusante de Retiro Baixo (BP099) e represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) os valores de mediana estiveram em torno de 4 e 7,5%, se mostrando inferiores às mediana do trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036), que esteve em torno de 13% nos três últimos anos avaliados. Desta forma, a região localizada a jusante da UHE Retiro Baixo, permanece sem indicativos de terem recebido o material extravasado proveniente das barragens B1, BIV e BIV-A nos sedimentos de fundo, uma vez que não apresentaram variação na mediana, máximos e mínimos de 2019 a 2020, e possuem porcentagem de ferro inferior à encontrada no trecho a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 17 – Gráfico de *boxplot* dos valores de ferro em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Manganês em sedimentos

No Gráfico 18 é apresentado o *boxplot* para manganês em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021, e pode ser observado que o manganês apresentou comportamento bastante semelhante ao do ferro, o que é esperado uma vez que são os metais de maior abundância na composição do rejeito.

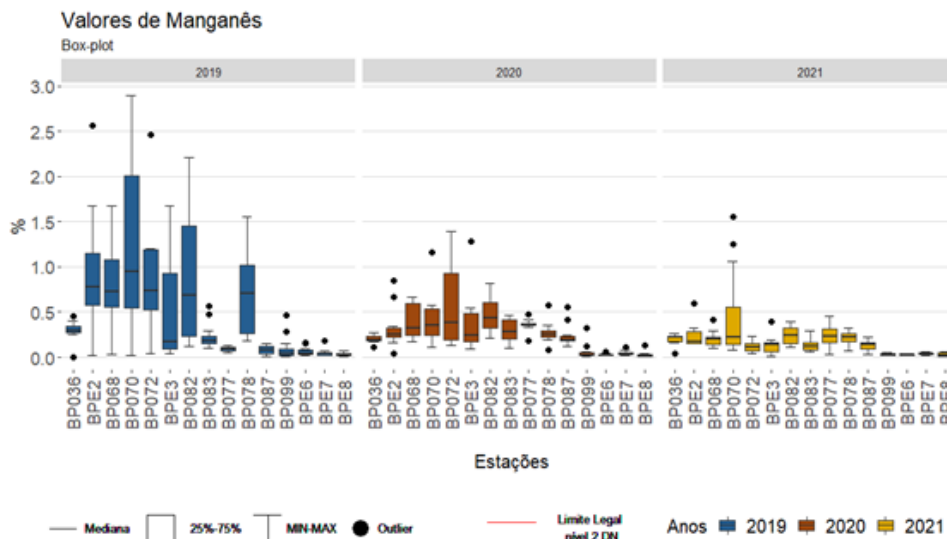
Ressalta-se que o maior valor encontrado para o manganês na estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036) no período todo avaliado foi de 0,45%. Observa-se que no ano de 2019 mais de 75% dos resultados estiveram superiores a esse valor nas 4 estações de amostragem localizadas logo após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão (60km mais próximos ao local do desastre). Reforçando o maior impacto observado nesse trecho. Contudo, reflexo do impacto dos rejeitos nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba foram registrados até no município de Curvelo (BP078), uma vez que foi observado o deslocamento dos valores de mediana em relação ao trecho não impactado

(BP036). Os valores das medianas das estações localizadas em Esmeraldas (BP082) e Curvelo (BP078) foram em torno de 0,7% de manganês, valores superiores ao máximo obtido na estação que não recebeu impacto do rejeito (BP036), que foi de 0,5%, conforme dito acima.

Nos anos de 2020 e 2021 observa-se uma redução dos teores de manganês nos sedimentos nos pontos de monitoramento que receberam impacto direto dos rejeitos provenientes das barragens B1, B4 e B4-A, tendendo a uma aproximação dos teores registrados no trecho de montante ao ribeirão Ferro Carvão (BP036). Contudo, apesar dessa redução observa-se que no ano de 2021 os valores máximos ainda se encontram acima do valor de referência (0,33%) citado por Costa (2015) nos trechos que receberam pluma de rejeito do rompimento das Barragens da Vale, até o município de Paraopeba (BP077).

Já nos pontos localizados a jusante da UHE de Retiro Baixo (BP099) e na represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) os valores obtidos foram bastante inferiores, inclusive inferiores aos encontrados no trecho a montante do rompimento, com 75% dos dados abaixo de 0,2% de manganês, reforçando que os sedimentos de fundo não apresentaram alterações de qualidade devido ao impacto dos rejeitos provenientes das barragens da Vale até o momento.

Gráfico 18 – Gráfico de *boxplot* dos valores de manganês em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Alumínio em sedimentos

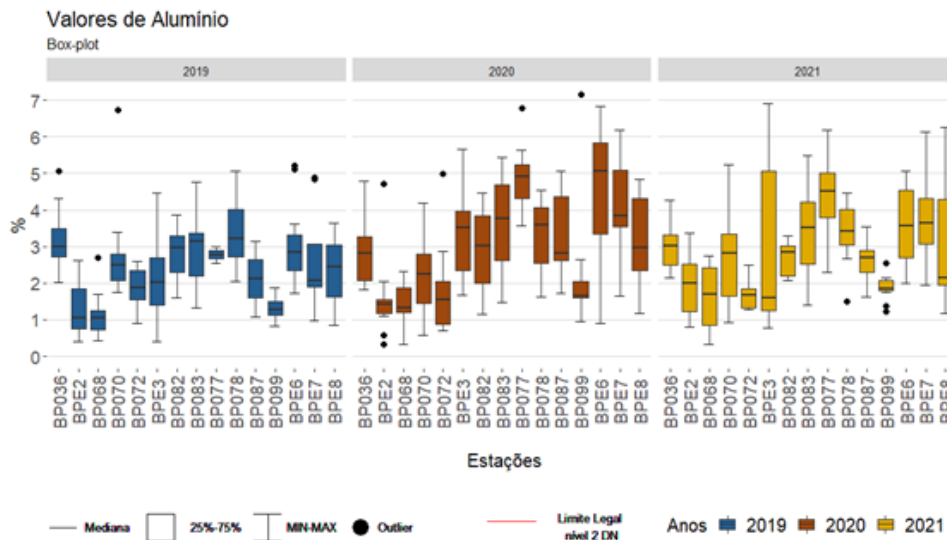
No Gráfico 19 é apresentado o *boxplot* para alumínio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba. Os resultados de alumínio também são expressos em porcentagem de peso seco (%) dada a sua importância relativa quanto à composição dos sedimentos que geralmente são encontrados, tal como o ferro e o manganês.

Para os valores de alumínio pode-se observar um comportamento bastante distinto ao observado para o ferro e o manganês, uma vez que os valores mais elevados de alumínio foram registrados nos trechos mais afastados do rompimento, a jusante da captação de Pará de Minas (BPE3) em diante. Inclusive, observa-se que o trecho de montante apresenta valores mais elevados que o trecho mais impactado pelo rompimento (primeiros 60km). No ponto de montante, a mediana foi de 3%, em 2019; já nos pontos logo a jusante do ribeirão Ferro Carvão (BPE2, BP068, BP070 e BP072), as medianas em 2019, estiveram entre 1 e 2,5%. Já os pontos entre Esmeraldas (BP082) e Pompéu (BP087) as medianas estiveram entre 2,2 e 3,3%, demonstrando valores superiores ao trecho mais próximo ao local do rompimento das barragens. Esses resultados, discordantes aos observados para o manganês e o ferro, evidenciam que o alumínio nos sedimentos não está associado à presença do rejeito ao longo da calha do rio Paraopeba.

Destaca-se que os resultados de qualidade da água bruta superficial também acompanham este comportamento, ou seja, o parâmetro alumínio dissolvido apresentou-se de forma inconsistente com o comportamento geral de ferro total e manganês total, ao revés, com valores próximos da normalidade histórica justamente a jusante da barragem, aumentando muito além dessa normalidade em todos os outros trechos, inclusive em trechos não impactados, como o trecho após a UHE Retiro Baixo.

Registra-se ainda que, ao observar o terceiro quartil de 2019, mais de 75% dos resultados de todos os pontos estiveram abaixo da referência indicada por Costa (2015), que é de 4,52%. Em 2021, o mesmo não foi observado em alguns pontos do médio curso do rio Paraopeba (BPE3 e BP077) e nos pontos do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), nos quais os percentis 75 superam ou estão próximos ao indicado por Costa (2015), de 4,52%.

Gráfico 19– Gráfico de *boxplot* dos valores de alumínio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Chumbo em sedimentos

No Gráfico 20 é apresentado o *boxplot* para alumínio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (35 e 91,3 $\mu\text{g/g}$, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012.

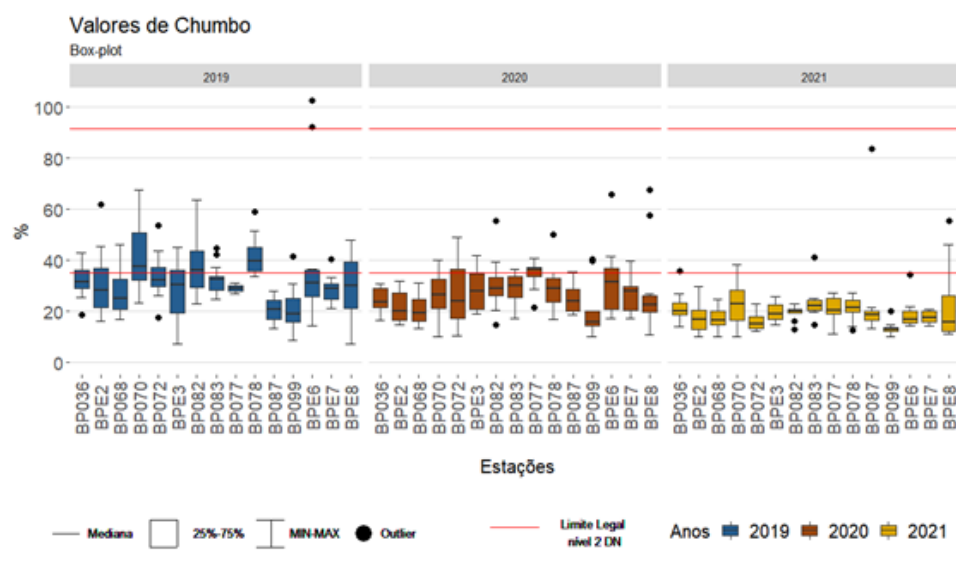
Observa-se que em 2019 foram obtidos registros de chumbo acima do Nível 1 ao longo de toda a calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036 - trecho não impactado pelo rompimento das barragens) até o corpo da represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8). Registra-se que os maiores valores das medianas foram observados nos pontos localizados em São Joaquim de Bicas (BP070), Esmeraldas (BP082) e em Curvelo (BP078), acima do Nível 1 da Conama 454. Destaca-se que as estações de amostragem localizadas mais próximas à confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BPE2 e BP068) apresentaram medianas inferiores ao trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, no entanto registraram máximos superiores ao trecho de montante.

Valores de chumbo acima do Nível 2 não foram observados na calha do rio Paraopeba, sendo que os dois únicos registros acima do Nível 2 ocorreram na represa de Três Marias. Como até o momento não foi constatada a chegada do rejeito no trecho a jusante do reservatório de Retiro Baixo, os registros de chumbo acima do Nível 1 e 2 no reservatório de Três Marias tem relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes antrópicas presentes na bacia e que drenam para o reservatório.

Nos anos seguintes ao desastre (2020 e 2021) registra-se uma redução gradual das concentrações de chumbo ao longo da calha do rio Paraopeba. Em 2021 foram registrados 4 valores de chumbo acima do Nível 1 na calha do rio Paraopeba e 2 dentro do Reservatório de Três Marias.

Esses resultados indicam que a presença de chumbo pode estar associada não somente com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, mas também a outras fontes antrópicas presentes nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco. É importante lembrar que chumbo não é comumente encontrado em mineralização de ferro (Rodriguez, 2012).

Gráfico 20 – Gráfico de *boxplot* dos valores de chumbo em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Mercúrio em sedimentos

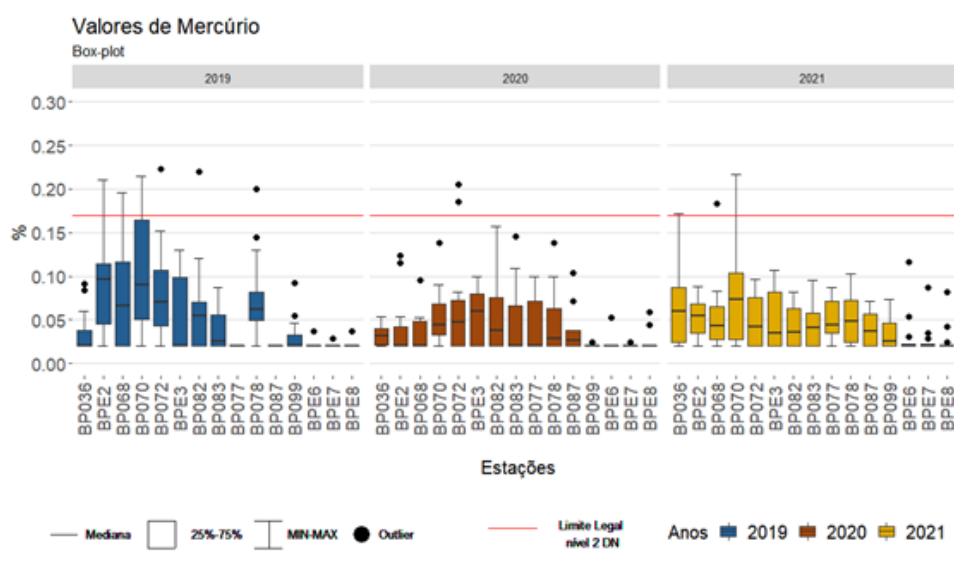
No Gráfico 21 é apresentado o *boxplot* de mercúrio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (0,17 e 0,486 $\mu\text{g/g}$, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012. Também foi citado um valor na Tabela 4, discrepante dos demais valores observados, e que complementa o Gráfico 98.

Ao analisar os dados do ano de 2019, observa-se uma elevação das medianas e da amplitude dos valores no trecho a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, demonstrando que a elevação dos teores de mercúrio nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, pois apresentaram elevação apenas no trecho localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão.

Ao longo dos três anos monitorados registrou-se valores acima do Nível 1 para 11 resultados em 2019, 2 no ano de 2020 e 4 registros na calha do rio Paraopeba em 2021, sendo esses últimos nos pontos localizados a montante do Ferro Carvão (no mês de julho de 2021) e em Betim (BP070 - nos meses de maio e setembro de 2021), e em São Joaquim de Bicas (BP068 – em julho). Nenhum valor de mercúrio encontrado foi superior ao Nível 2 em toda a calha do rio durante os anos analisados.

Ressalta-se que a estação localizada a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) e na represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) apresentaram valores de mercúrio inferiores aos obtidos no trecho localizados a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036).

Gráfico 21 – Gráfico de *boxplot* dos valores de mercúrio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Tabela 4 – Valor obtido para o mercúrio que ultrapassou 0,3 $\mu\text{g/g}$ no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

Mercúrio – $\mu\text{g/g}$		
Valores que ultrapassaram os limites gráficos		
Estação	Data da amostragem	Valor observado
BP070	18/11/2019	3,40

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Níquel e Cobre em Sedimentos

Nos Gráficos 22 e 23 são apresentados os *boxplot* de níquel e cobre em sedimentos de fundo do rio Paraopeba dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (18 e 35,9 $\mu\text{g/g}$, para níquel, e 35,7 e 197 $\mu\text{g/g}$ para cobre, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012.

Em 2019 os valores acima do Nível 1 foram registrados para ambos os metais em todos os pontos da calha do rio Paraopeba, inclusive a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, trecho que não recebeu impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A. Contudo, foi observado aumento dos valores de níquel e cobre nos trechos 1, 2 e 3, em comparação com o trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trecho Montante), sobretudo no primeiro ano logo após o rompimento da barragem (2019).

Apesar desses metais não fazerem parte da composição do rejeito, esses resultados demonstram que a elevação dos níveis de níquel e cobre nos sedimentos podem estar relacionados de maneira indireta com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, bem como com a presença de outras atividades antrópicas na bacia do rio Paraopeba.

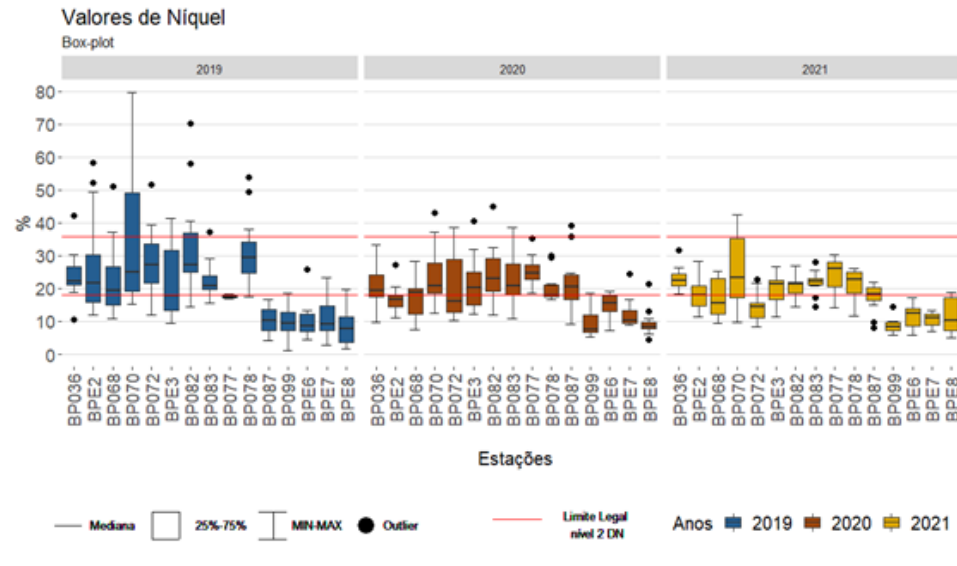
Observa-se uma redução em todos os percentis (25, 50 e 75) para todos os pontos de monitoramento localizados na calha do rio Paraopeba, especialmente para aqueles localizados mais próximos da área do rompimento das barragens. Já os trechos localizados a jusante da UHE Retiro Baixo apresentaram pouca variação entre os percentis observados no período entre 2019 e 2021.

No que se refere a extrapolação do Nível 2, para o níquel, observa-se que os pontos de monitoramento localizados entre Brumadinho (BPE2) e Curvelo (BP078) o maior número de resultados acima de 35,9 $\mu\text{g/g}$ foram observados no ano de 2019, já em 2020 e 2021 somente valores máximos e/ou outliers atingiram o Nível 2. No que se refere aos valores de cobre o Nível 2 (35,7 $\mu\text{g/g}$) foi atingido apenas os *outliers* dos pontos localizados em Brumadinho (BPE2) e em São Joaquim de Bicas (BP070).

As estações de amostragem localizadas a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), ao contrário dos demais, apresentaram 75% dos resultados de níquel e 50% dos resultados de cobre abaixo do Nível 1 e abaixo dos valores obtidos no trecho a montante do rompimento da barragem, o qual não recebeu rejeito. Ressalta-se que durante o monitoramento emergencial executado em 2019 e 2020 não se observou interferência do material proveniente da barragem B1 nos trechos 4 e 5. Desta forma, os registros de cobre e níquel nesses trechos sugerem ter relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que

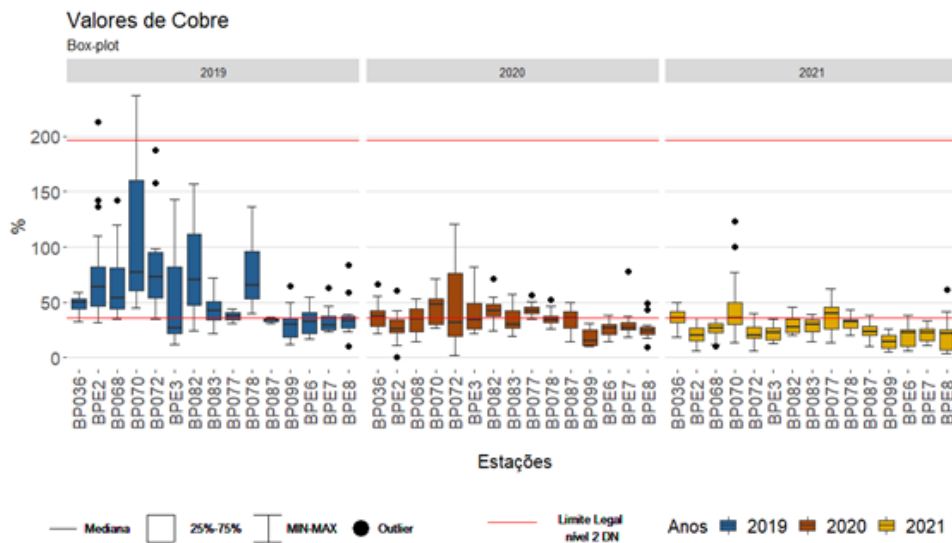
drenam para o reservatório. Nesses trechos, os pontos máximos de 2019 e 2020 apresentaram pouca ou nenhuma variação para o níquel, enquanto o cobre apresentou redução de 33,9 mg/g para o trecho 4 e 5,8 mg/g para o trecho 5.

Gráfico 22 – Gráfico de *boxplot* dos valores de níquel em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Gráfico 23 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cobre em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Arsênio em Sedimentos

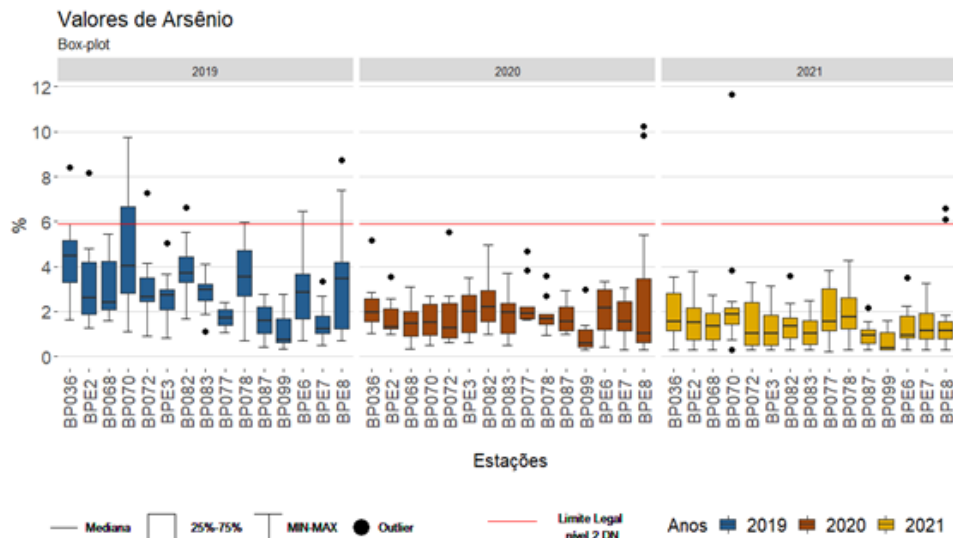
No Gráfico 24 é apresentado o *boxplot* de arsênio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (6 e 17 $\mu\text{g/g}$), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012.

Observa-se que os valores de arsênio estiveram acima do Nível 1 (5,9 $\mu\text{g/g}$) em ao menos uma medição realizada no ano de 2019 em vários pontos da calha do rio Paraopeba e no corpo da represa de Três Marias. Salienta-se que os valores de arsênio obtidos acima do Nível 1 incluem o trecho a montante da influência do ribeirão Ferro Carvão, trecho que não recebeu impacto do rompimento da barragem B1. Desta maneira, pode-se associar a presença de arsênio nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba, antes do rompimento da barragem B1.

Em 2020 e 2021, nota-se uma queda de todos os percentis avaliados (25, 50 e 75%) e máximos em todos os pontos. Além disso, destaca-se a proximidade entre os valores de mediana da calha do rio Paraopeba entre os pontos a montante e a jusante da área diretamente impactada pelo rompimento das barragens da Vale. Por fim, vale destacar que nos anos de 2020 e 2021 foram registrados resultados acima do Nível 1 na estação de amostragem localizada dentro do reservatório de Três Marias, já no município de Três Marias. Esse fato tem relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

Durante o monitoramento especial do rio Paraopeba não foram registrados resultados de arsênio acima do Nível 2 (17 $\mu\text{g/g}$) em toda a calha do rio Paraopeba e no corpo do reservatório de Três Marias.

Gráfico 24 – Gráfico de *boxplot* dos valores de arsênio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Cromo em Sedimentos

No Gráfico 25 é apresentado o *boxplot* de cromo nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (37,3 e 90 $\mu\text{g/g}$), definidos pela Resolução Conama n° 454 de 2012. Também foram citados alguns valores na Tabela 5, discrepantes dos demais valores observados, e que complementam o Gráfico 25.

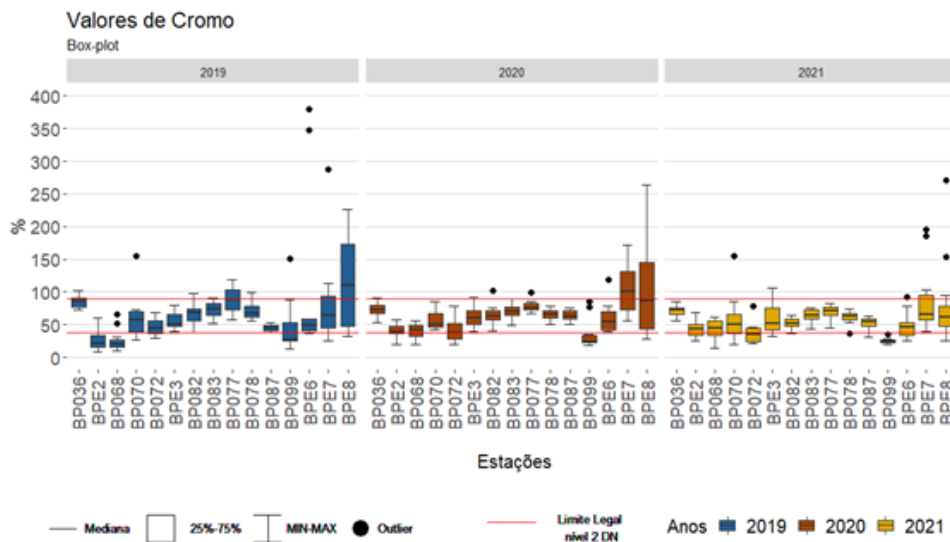
Observa-se que durante todo o período monitorado pelo IGAM, 2019 a 2021, o trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, onde não recebeu impacto do rompimento das barragens da Vale todos os registros de cromo estiveram acima do Nível 1 (37,3 $\mu\text{g/g}$). Esse comportamento também foi observado na região do médio e baixo curso, nas estações localizadas no trecho entre o município de Esmeraldas (BP082) e a montante da UHE Retiro Baixo (BP087). Já as estações de amostragem localizadas mais próximas da foz do ribeirão Ferro Carvão (BPE2, BP068, BP070 e BP072) apresentaram os menores valores de mediana, inclusive no ano de 2019, sendo que as 2 estações mais próximas à área do desastre,

quais sejam: BPE2 e BP068, mais de 75% dos seus resultados estiveram abaixo do Nível 1 no ano de 2019. Esses resultados indicam que a presença de cromo nos sedimentos do rio Paraopeba está associada a fontes antrópicas existentes na bacia, tais como atividades de siderurgia desenvolvidas especialmente nas regiões a montante do ribeirão Ferro Carvão, em municípios tais como: Jeceaba, Congonhas e Ouro Branco.

Nas medições realizadas dentro da represa de Três Marias foram encontrados teores anômalos de cromo (acima de 200 µg/g), em 2019, 2020 e 2021, chegando a registrar o valor de 1.074 µg/g no mês de abril de 2019. Isso sugere que as alterações de cromo têm relação com algum fator externo ao material proveniente da Barragem B1 da Vale, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para a represa de Três Marias.

Segundo os dados do Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco da CPRM (Viglio, 2018), valores de cromo nos sedimentos no entorno do reservatório de Três Marias foram registrados entre 12 e 1.046 µg/g, no ano de 2009.

Gráfico 25 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cromo em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Tabela 5 – Valores obtidos para o cromo que ultrapassaram 400 µg/g no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

Cromo – µg/g		
Valores que ultrapassaram os limites gráficos		
Estação	Data da amostragem	Valor observado
BPE8	11/04/2019	1.074,2
	12/12/2019	741,2
	13/02/2020	729,0
	13/08/2020	419,9
BPE7	15/12/2020	876,2

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Cádmio em Sedimentos

No Gráfico 26 é apresentado o *boxplot* de cádmio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. A linha vermelha é referente ao Nível 1 (0,6 µg/g) definido pela Resolução Conama nº 454 de 2012, o Nível 2 é de 3,5 µg/g. Registra-se que não foram identificados valores de cádmio acima do Nível 2 (3,5 µg/g) da Resolução CONAMA 454/12.

As análises de cádmio realizadas entre janeiro de 2019 até novembro de 2020 possuíam um limite de detecção² igual a 1 µg/g, que é superior ao limite do Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 (0,6 µg/g). A partir de dezembro de 2020, visando melhorar a sensibilidade do método analítico, o limite de quantificação desse parâmetro foi reduzido para 0,25 µg/g.

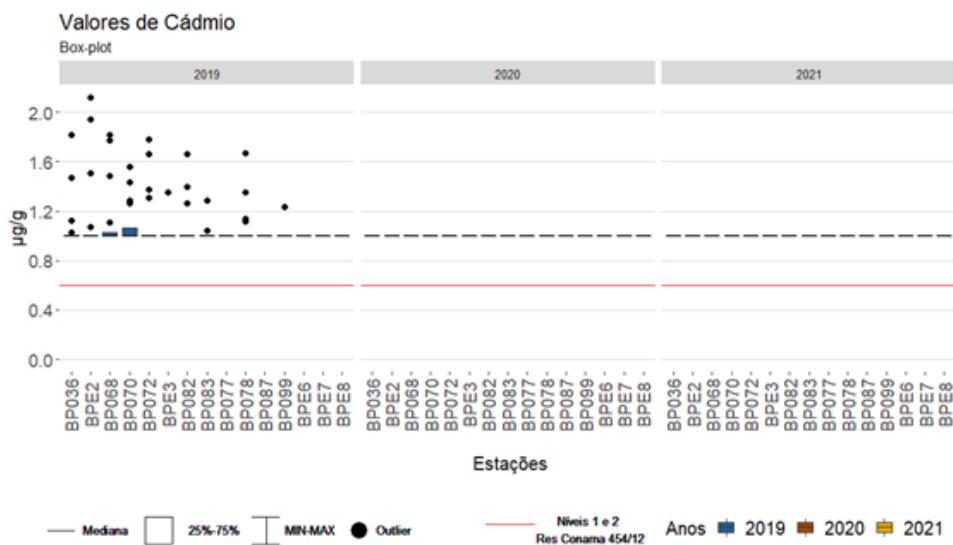
Foi observada extrapolação do Nível 1 para o cádmio, apenas no ano de 2019, em praticamente todos os pontos da calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036) até a jusante da UHE de Retiro Baixo (BP099). Exceções ocorreram nos pontos localizados nos municípios de Paraopeba (BP077) e Pompéu (BP087), e nos pontos do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), nesses pontos todos os registros foram inferiores ao limite de quantificação do método analítico. Há que se considerar que todas as

² Limite de quantificação é a menor quantidade ou concentração do parâmetro, que pode ser determinada pelo método de análise empregado.

extrapolações do Nível 1 ocorreram nos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2019. Inclusive no trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BP036), podendo esses resultados estarem associados a alguma interferência da metodologia analítica e não com o desastre do rompimento das barragens.

Nos anos de 2020 e 2021, nenhum trecho apresentou valor acima do limite de quantificação.

Gráfico 26 – Gráfico de frequência dos valores acima do Nível 1 de cádmio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Zinco em Sedimentos

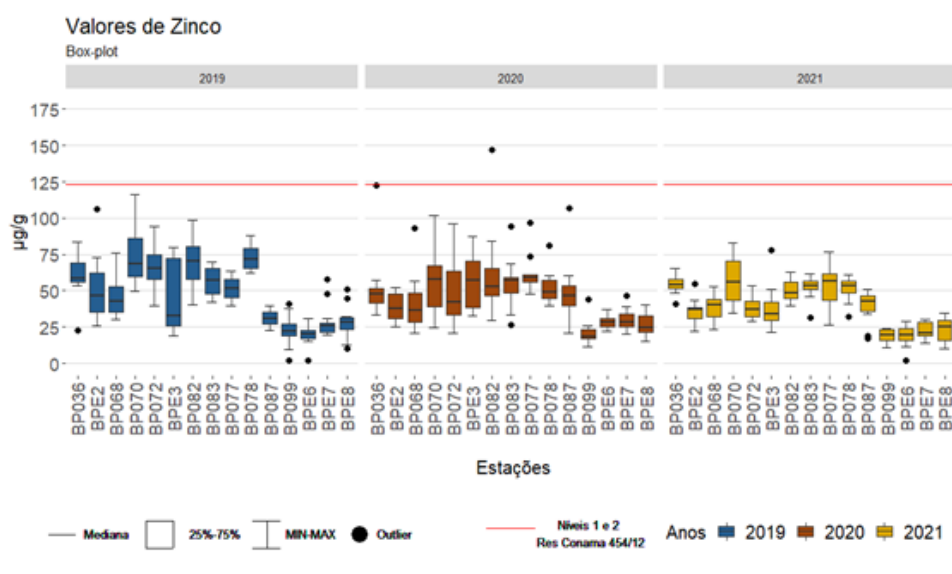
No Gráfico 27 é apresentado o *boxplot* de zinco nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. As linhas em vermelho representam os Níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA 454/12 (123 e 315 $\mu\text{g/g}$, respectivamente).

Durante todo o período do monitoramento especial do rio Paraopeba foi registrado um único valor acima do Nível 1 (123 µg/g Zn), na estação de amostragem localizada em Esmeraldas (BP082), no ano de 2020 (o valor registrado foi de 147 µg/g Zn, no mês de janeiro).

Nota-se que durante os anos de 2019, 2020 e 2021 as estações de amostragem localizadas no rio Paraopeba logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BPE2 e BP068) os percentis estiveram inferiores aos obtidos na estação de amostragem localizada a montante da área afetada pelos rejeitos.

Destaca-se que nas estações localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) os valores para zinco, no período entre 2019 e 2021, foram inferiores aos reportados a montante com a foz do ribeirão Ferro Carvão e não sofreram alteração significativa entre os anos.

Gráfico 27 – Gráfico de *boxplot* dos valores de zinco em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Estrôncio em sedimento

No Gráfico 28 é apresentado o *boxplot* de estrôncio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. Esse metal não possui limites de acordo com a Resolução CONAMA 454/12.

Observa-se que os valores de estrôncio seguiram o padrão apresentado pelo manganês e ferro, com elevação dos teores especialmente nos primeiros 60 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BPE2, BP036, BP070 e BP072). Já nas estações de amostragem localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) os valores foram próximos ou inferiores aos obtidos no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, que não sofreu impactos do rejeito provenientes das barragens da Vale.

Registra-se que o trecho localizado nos primeiros 60km logo após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão apresentou os maiores valores percentis avaliados (25, 50 e 75%) no ano de 2019, dentre os trechos avaliados, os valores de medianas por exemplo estiveram entre 12 e 33 $\mu\text{g/g}$, sendo que no trecho a montante a mediana foi de 12,14 $\mu\text{g/g}$. Já nos anos de 2020 e 2021 observa-se uma redução dos valores nas estações mais próximas ao rompimento, em 2021 as medianas dessas estações estiveram entre 9 e 18 $\mu\text{g/g}$, se aproximando consideravelmente da estação de montante (BP036) quando em 2021 foi registrada a mediana de 16 $\mu\text{g/g}$.

Registra-se que a elevação dos níveis de estrôncio nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, pois apresentou elevação mais evidente a partir da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, sobretudo no ano do rompimento (2019), trecho esse que foi atingido diretamente pelo impacto dos rejeitos das barragens da Vale.

Destaca-se que nas estações localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099, BPE6, BPE7 e BPE8), os valores para estrôncio, nos anos de 2019 a 2021, foram inferiores aos obtidos no trecho localizado a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão e não sofreram alteração significativa entre os anos. Os resultados da avaliação composicional de óxidos nos sedimentos apresentados no Capítulo 2, do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba da Vale, também apontaram que os óxidos de estrôncio se destacaram proporcionalmente no

trecho de maior impacto, entre a confluência com o ribeirão Ferro Carvão e a termoeletrica de Igarapé, corroborando com os resultados obtidos no monitoramento especial do Igam.

Gráfico 28 – Gráfico de *boxplot* dos valores de estrôncio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

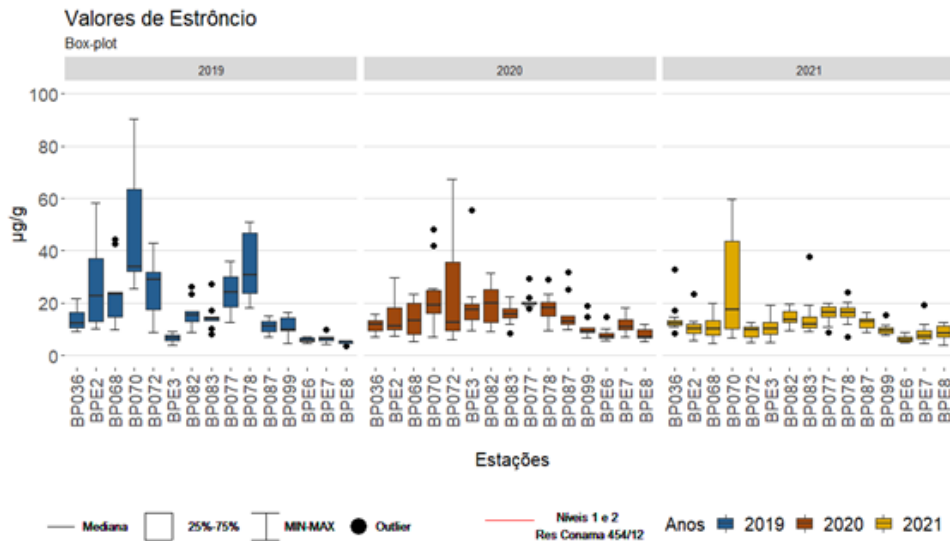


Tabela 5 – Valores obtidos para o estrôncio que ultrapassaram 100 µg/g no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

Estrôncio – µg/g		
Valores que ultrapassaram os limites gráficos		
Estação	Data da amostragem	Valor observado
BPE7	05/12/2020	141,7
BP077	09/02/2021	151,5

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Titânio e Vanádio em sedimentos

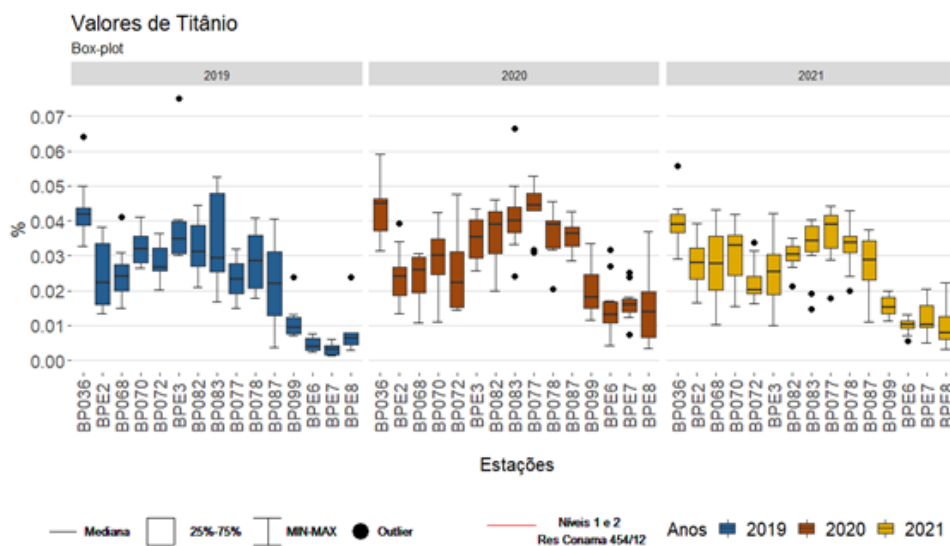
Nos Gráficos 29 e 30 são apresentados os *boxplot* de titânio e vanádio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 09/12/2021. Esses metais não possuem limites estabelecidos na Resolução CONAMA 454/12. Os resultados de titânio e vanádio apresentaram um comportamento bastante similar. Ambos os parâmetros apresentaram redução dos teores a partir do trecho localizado a jusante da confluência do ribeirão Ferro Carvão até a jusante da UHE Retiro Baixo. A estação de amostragem localizada a montante da área do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A apresentou os maiores valores de todos os percentis avaliados (25, 50 e 75%), na comparação

com os demais trechos da calha do rio Paraopeba, durante os três anos avaliados (2019, 2020 e 2021). No corpo do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), registrou-se os menores teores de titânio, nos três anos consecutivos.

Já para os resultados de vanádio, registrou-se teores anômalos na estação de amostragem localizada no corpo do reservatório de Três Marias, já no município de mesmo nome (BPE8), chegando a registrar o valor de 690 $\mu\text{g/g}$ em fevereiro de 2020. Assim, como não se observou interferência do material proveniente da barragem B1 nos trechos Montante e 5, sugere-se que esses resultados tenham relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para a represa de Três Marias e para o rio Paraopeba, na porção alta da bacia.

Esse comportamento do titânio e do vanádio também foi registrado no Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo da Vale (25/01/2019 a 30/06/2019), uma vez que indicou que os resultados desses parâmetros, também avaliados nos sedimentos, não apresentaram relação com o rompimento das barragens.

Gráfico 29 – Gráfico de *boxplot* dos valores de titânio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Gráfico 30 – Gráficos de *boxplot* dos valores de vanádio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

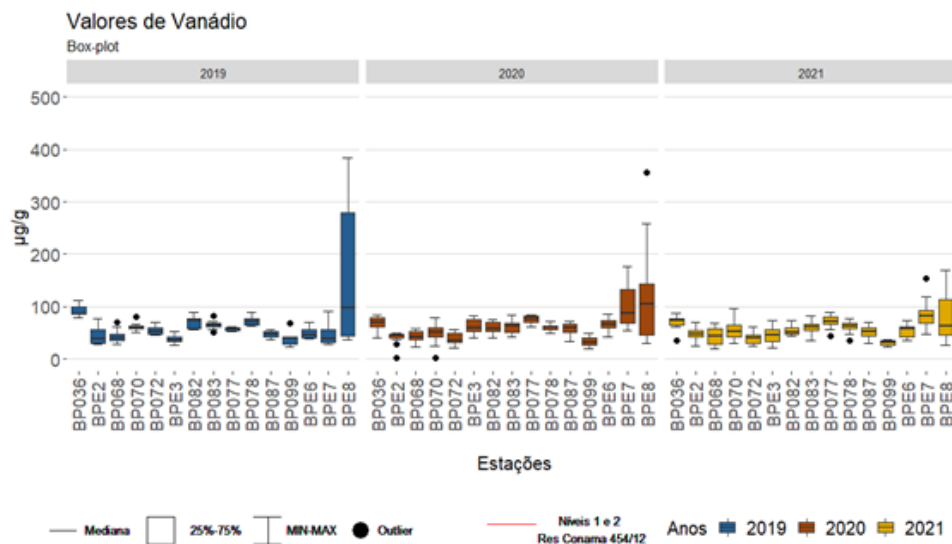


Tabela 5 – Valores obtidos para o vanádio que ultrapassaram 500 µg/g no período de 27/01/2019 a 09/12/2021

Vanádio – µg/g		
Valores que ultrapassaram os limites gráficos		
Estação	Data da amostragem	Valor observado
BPE8	03/02/2020	690,56

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

9 CONCLUSÕES

O rompimento da barragem B1 operada pela Vale causou impactos na qualidade hídrica da bacia hidrográfica em diferentes graus de intensidade. Em relação à qualidade da água superficial do rio Paraopeba, baseado no monitoramento efetuado pelo Igam após o rompimento, as maiores alterações foram observadas, principalmente, nos valores de turbidez e nas concentrações dos metais ferro total e manganês total.

Nos 60 dias subsequentes ao rompimento (final de janeiro a abril de 2019) aconteceram as maiores alterações sobre a qualidade das águas do ribeirão Ferro-Carvão e rio Paraopeba. O

trecho mais próximo ao rompimento das barragens, aproximadamente 40 km de extensão (distância medida desde a barragem que rompeu), localizado entre os municípios de Brumadinho e São Joaquim de Bicas, ficou totalmente impactado inviabilizando o uso da água para as mais diversas finalidades, pois encontrava-se com valores significativos de turbidez, ferro e manganês e presença de metais como chumbo e mercúrio. Nas semanas subsequentes ao rompimento o impacto sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba se estendeu ao longo da calha, sendo observada até o município de Pompéu (a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo).

De forma geral, após três anos de monitoramento, observou-se que o ano de 2019 foi o de maior impacto sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba, quando foram sentidos os efeitos imediatos da passagem dos rejeitos. Uma redução gradual dos valores dos parâmetros associados ao desastre foi observada ao longo desse período. Contudo, nos períodos chuvosos de 2020 e 2021 foram observadas elevações nos valores de turbidez e nas concentrações dos principais parâmetros, mas com valores inferiores àqueles observados no ano de 2019.

Durante os períodos chuvosos com o aumento das vazões ocorre o revolvimento do material que ainda se encontra depositado no leito dos corpos de água diretamente impactados (ribeirão Ferro Carvão e rio Paraopeba), principalmente nas áreas próximas ao rompimento. A piora da qualidade da água do rio Paraopeba no trecho mais impactado (entre Brumadinho e Esmeraldas), durante o período chuvoso, também está relacionada às atividades de dragagem realizadas pela Vale no rio Paraopeba nas imediações da confluência com o ribeirão Ferro Carvão.

Ao avaliar os resultados dos parâmetros físico-químicos observou-se que a turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro e manganês total foram aqueles que apresentaram relação direta com o material que extravasou das barragens da Vale. Os valores mais elevados desses parâmetros foram observados no trecho localizado nos primeiros 40 km a partir da barragem B1, especialmente no período chuvoso de 2019. Ao longo dos anos de 2020 e 2021 houve uma atenuação nos valores de turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro total e manganês total. Contudo, especialmente durante os períodos chuvosos, as medianas desses parâmetros ainda se encontram acima do esperado para a série histórica de monitoramento. Com relação ao limite de classe, as medianas históricas desses parâmetros já se apresentavam acima do estabelecido

para rios de classe 2. Os valores nos períodos de estiagem se encontram dentro da normalidade histórica desses parâmetros.

Com relação as ocorrências de chumbo total observaram-se que os maiores valores foram registrados em 2019, logo após o desastre. Apesar de não fazer parte da composição do rejeito, a presença de chumbo na água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, e propiciaram o aumento das concentrações de alguns contaminantes no período após o rompimento. Essa elevação, especialmente no momento logo após o desastre, foi observada para os metais: mercúrio total, níquel total, zinco total e cádmio total. Destaca-se que os valores de chumbo vêm reduzindo paulatinamente e no ano de 2021 os valores estiveram abaixo do esperado para a série histórica do monitoramento, contudo com alguns registros de violação do limite de classe, durante o período chuvoso, ao longo de toda a calha do rio Paraopeba, no trecho após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão (BPE2) até a montante da UHE Retiro Baixo (BP087). Para os demais metais citados: mercúrio total, níquel total, zinco total e cádmio total não foi registrada nenhuma extrapolação do limite de classe no ano de 2021 na calha do rio Paraopeba.

No que se refere as ocorrências de arsênio total, cobre dissolvido e zinco total no rio Paraopeba observou-se que estas não têm relação direta com o rejeito proveniente da barragem B1, uma vez que o trecho de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, considerado como mais impactado, não sofreu variações significativas nos valores desses elementos que pudessem estar relacionados diretamente com o rejeito proveniente do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, visto que os mesmos não fazem parte da composição do rejeito e os valores máximos da série histórica do Igam para cada ponto indicam que, mesmo antes do rompimento da barragem, esses elementos já haviam sido detectados em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada antes da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. Assim, sua presença na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas. Destaca-se que em 2021 não foram registradas desconformidades com o limite de classe para o arsênio e o zinco. Já para o cobre dissolvido foram registradas violações do limite apenas no mês de fevereiro nas estações localizadas em Brumadinho (BPE2), Mário Campos (BP068), Betim (BP072), Esmeraldas (BP082), Paraopeba (BP077) e Pompéu (BP078).

No que se refere aos resultados da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba e represa de Três Marias, conclui-se que após 3 anos do acidente da empresa Vale os valores dos metais analisados em sedimento de fundo apresentaram redução da concentração em relação a 2019, ano do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A.

Pela análise dos dados foi observada alteração nas concentrações de metais no sedimento de fundo do rio Paraopeba no trecho desde a jusante da confluência do ribeirão Ferro Carvão até a montante da represa de Retiro Baixo. Esse trecho apresentou ainda em 2021 alteração dos valores de qualidade dos sedimentos relativa ao impacto do rejeito proveniente dos rompimentos das barragens B1, BIV e BIV-A. Em contrapartida, nas estações de amostragem localizadas no trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) e reservatório de Três Marias não foi observada presença de material com características do rejeito nos sedimentos de fundo.

Observou-se que os metais ferro e o manganês nas águas superficiais destacam-se como os metais traçadores da chegada dos rejeitos, e apesar de apresentarem quedas em relação a mediana e aos valores máximos entre 2019 e 2021, ainda é evidente que, entre o trecho localizado logo após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a montante Retiro Baixo, apresentem valores discrepantes com os demais trechos, não impactados. O alumínio apresentou um padrão de comportamento distinto dos metais supracitados, apresentou queda nas estações localizadas mais próximas ao local do rompimento das barragens da Vale, seguido de um aumento gradual até a montante de Retiro Baixo. Além disso, não foi registrada redução dos valores de alumínio ao longo dos anos subsequentes ao rompimento, 2020 e 2021.

Em relação aos metais nos sedimentos que a Resolução Conama nº 454 de 2012 apresenta limites para águas doce de Nível 1 e 2, destaca-se que o mercúrio, arsênio, cádmio e zinco, praticamente não apresentaram valores superiores ao Nível 1 nos dados de 2021. Os valores de chumbo, cobre e níquel superaram o Nível 1 em praticamente todos os pontos da calha do rio Paraopeba, inclusive no trecho que não sofreu impacto dos rejeitos provenientes das barragens da Vale. Além disso, os valores das medianas dos metais chumbo, cobre e níquel, no trecho que sofreu o maior impactado pelo rompimento das barragens (primeiros 60 km), no ano de 2021, apresentaram valores de mediana inferiores aos obtidos na estação de amostragem localizada a

montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, trecho que não sofreu impacto dos rejeitos das barragens que romperam.

Há que se destacar que os resultados dos metais mercúrio, cobre e estrôncio demonstraram que a presença dos seus teores nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, uma vez que apresentaram elevação mais evidente no trecho localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. Para os metais chumbo, níquel, zinco e cádmio os resultados indicaram que sua presença pode estar associada não somente com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, mas também a outras fontes antrópicas presentes nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco. Apesar da elevação dos teores terem ocorrido, principalmente, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, os trechos não impactados pelo rejeito proveniente da Barragem B1, tais como a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão e no corpo do reservatório de Três Marias, também apresentaram valores em desconformidade, principalmente, com o Nível 1 da Resolução CONAMA 454/11. Já os resultados dos parâmetros arsênio, cromo, titânio e vanádio não demonstraram relação de seus teores com a presença dos rejeitos nos sedimentos de fundo, ou seja, pode-se associar a presença desses parâmetros nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba e represa de Três Marias, antes do rompimento das barragens da Vale.

Ressalta-se que diversas ações estão sendo tomadas no intuito de atenuar os impactos ambientais ocasionados pelo rompimento das barragens da Vale, dentre elas estão:

- As intervenções promovidas de forma emergencial no ribeirão Ferro Carvão que visam cessar o carregamento de rejeitos e sedimentos ao rio Paraopeba (barreiras de estabilização das calhas -BECs, barreiras hidráulicas -BH-0 e BH-1, o Dique 2 e as Cortinas Metálicas em Estaca Prancha 1);
- A ETAF 1 é responsável por tratar as águas do ribeirão Ferro-Carvão, de forma que seu efluente é direcionado ao ribeirão Casa Branca, que por sua vez deságua no Rio Paraopeba. Durante o ano de 2021, verificou-se a eficiência desta estrutura, sendo que o efluente de saída da estação apresentou turbidez média de 6,4 NTU;
- O Marco Zero é considerada a área piloto para a recuperação da Bacia do ribeirão Ferro-Carvão, de forma que as ações empreendidas nesta área são norteadoras para as demais áreas da bacia;

- Remoção total dos rejeitos intra e extra calha que foram carreados para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Essa premissa vem sendo cumprida à medida em que avançam as buscas pelo Corpo de Bombeiros, liberando as áreas para a remoção total do rejeito;
- Dragagem rio Paraopeba no trecho imediatamente após a confluência do ribeirão Ferro-Carvão (2 km). No período de 15/08/2019 a 30/12/2021, as operações de dragagem removeram um total de 82.871 m³ de rejeito do rio Paraopeba.

O Igam continuará realizando o acompanhamento dos impactos às águas do rio Paraopeba por meio da manutenção do monitoramento sistemático ao longo de todo o rio Paraopeba até o corpo do reservatório de Três Marias, podendo o programa ser revisto de acordo com a necessidade, bem como, todas as ações para remoção dos rejeitos e recuperação da bacia do rio Paraopeba, pela empresa Vale S/A, frente ao desastre ambiental ocorrido em Brumadinho.

O Igam reforça que ainda se mantêm a recomendação de não utilização da água bruta do rio Paraopeba para qualquer fim, como medida preventiva, no trecho que abrange os municípios de Brumadinho até o limite da UHE de Retiro Baixo em Pompéu (aproximadamente 250 km de distância do rompimento). O uso da água nos trechos que estão antes do município de Brumadinho (antes do trecho afetado pelo rompimento) e depois da UHE Retiro Baixo, estão liberados para os mais diversos fins e não existe nenhuma restrição pelos órgãos públicos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: APHA, 2005.

BARBIERI, C. B. **Caracterização de crime ambiental de poluição por meio de abordagem multiparamétrica e incorporando incerteza de amostragem**. 2015. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995. Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, 29 dez. 1995.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (Minas Gerais). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. 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. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, 13 maio 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios para a classificação de águas destinadas à recreação de contato primário. As águas doces, salobras e salinas terão sua condição avaliada por parâmetros e indicadores específicos, de modo a assegurar as condições de balneabilidade. **Diário Oficial [da] União**: Seção 1, Brasília, ano 18, p. 70-71, 25 jan. 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, ano 216, 8 nov. 2012.

COSTA, Raphael de Vicq Ferreira da. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. 185 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo hidrometeorológico de acompanhamento do deslocamento da pluma no percurso do rio Paraopeba**. 2019a. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/inf

ormativos_hidrometeorol%C3%B3gicos/20190222_Informativo_Paraopeba_N25.pdf. Acesso em 30 mar 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do rio Paraopeba**. 2019b. http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/informativos_qualidade_agua/Informativo_18_IGAM_COPASA_CPRM_2.pdf. Acesso em 30 mar 2020:

MINAS GERAIS. Decreto nº 41.578, de 08 de março de 2001. Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [do] Estado de Minas Gerais**: Diário do Executivo, Belo Horizonte, 9 março. 2001.

VEJA antes e depois de Brumadinho e imagens aéreas da lama na cidade. **Veja**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/veja-antes-e-depois-de-brumadinho-e-imagens-aereas-de-lama-na-cidade/>. Acesso em: 22 fev. 2019.

VIGLIO, Eduardo Paim; CUNHA, Fernanda Gonçalves da. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco**: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

ABU SHMEIS, R. M. **Water Chemistry and Microbiology**. 1. ed. [s.l.]: Elsevier B.V., 2018. v. 81. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.001>.

ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. **Journal of Chemistry**, v. 2019, n. Cd, 2019. DOI 10.1155/2019/6730305.

BAUTISTA, E.; VERGARA, P.; SEGOVIA, J. Iron-induced oxidative stress activates AKT and ERK1/2 and decreases Dyrk1B and PRMT1 in neuroblastoma SH-SY5Y cells. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 34, p. 62–69, 2016. DOI 10.1016/j.jtemb.2015.11.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.11.005>.
BERNHOF, R. A. Cadmium toxicity and treatment. **The Scientific World Journal**, v. 2013, 2013. DOI 10.1155/2013/394652.

BJØRKLUND, G. *et al.* The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. **Environmental Research**, v. 159, n. July, p. 545–554, 2017. DOI 10.1016/j.envres.2017.08.051. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.051>.
CAI, L. *et al.* Essentiality, Toxicology and Chelation Therapy of Zinc and Copper. **Current Medicinal Chemistry**, v. 12, n. 23, p. 2753–2763, 2005. DOI 10.2174/092986705774462950.

DAS, K. K. *et al.* Primary concept of nickel toxicity - An overview. **Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology**, v. 30, n. 2, p. 141–152, 2019. DOI 10.1515/jbcpp-2017-0171.

ESPARZA, J. L.; GÓMEZ, M.; DOMINGO, J. L. Role of Melatonin in Aluminum-Related Neurodegenerative Disorders: a Review. **Biological Trace Element Research**, v. 188, n. 1, p. 60–67, 2019. DOI 10.1007/s12011-018-1372-4.

GAD, S. C. Acute and chronic systemic chromium toxicity. **Science of the Total Environment**, The, v. 86, n. 1–2, p. 149–157, 1989. DOI 10.1016/0048-9697(89)90201-5. .
GIDLOW, D. A. Lead toxicity. **Occupational Medicine**, v. 65, n. 5, p. 348–356, 2015. DOI 10.1093/occmed/kqv018.

JUNEJO, S. H. *et al.* Cadmium and Lead Hazardous Impact Assessment of Pond Fish Species. **Biological Trace Element Research**, v. 191, n. 2, p. 502–511, 2019. DOI 10.1007/s12011-018-1628-z.

LAMPERT, W.; SOMMER, U. Limnoecology: The ecology of lakes and streams. **Oxford: Oxford University Press**, n. 2, p. 324 pp, 2007.

LUO, H.; CHENG, Q.; PAN, X. Photochemical behaviors of mercury (Hg) species in aquatic systems: A systematic review on reaction process, mechanism, and influencing factor. **Science of the Total Environment**, v. 720, p. 137540, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.137540.

MICHALKE, B.; FERNSEBNER, K. New insights into manganese toxicity and speciation. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 28, n. 2, p. 106–116, 2014. DOI 10.1016/j.jtemb.2013.08.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2013.08.005>.

PRADO, I. G.; POMPEU, P. S. Vertical and seasonal distribution of fish in Três Marias reservoir. **Lake and Reservoir Management**, v. 30, n. 4, p. 393–404, 2014. DOI 10.1080/10402381.2014.955221.

RATNAIKE, R. N. Acute and chronic arsenic toxicity. **Postgraduate Medical Journal**, v. 79, n. 933, p. 391–396, 2003. DOI 10.1136/pmj.79.933.391.

RODRIGUES, A. S. L. **Caracterização da bacia do rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: avaliação geoquímica ambiental e proposição de valores de background**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco: Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

ZHANG, S. *et al.* Dynamic sulfur–iron cycle promoted phosphorus mobilization in sediments driven by the algae decomposition. **Ecotoxicology**, 2020. DOI 10.1007/s10646-020-02316-y.

Foto: Antoniel Fernandes

