

INFLUÊNCIA DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS E DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM I, DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO, NA QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAOPEBA

Influence of anthropogenic activities and rupture of dam I, Córrego do Feijão mine, on the water quality of the Paraopeba River watershed

Ana Luiza Cunha Soares¹

Silvia Corrêa Oliveira²

Lenora Nunes Ludolf Gomes³

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar a qualidade das águas superficiais da bacia do rio Paraopeba, a fim de identificar os possíveis impactos gerados pelo rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, da Mineradora Vale S.A., em Brumadinho e as demais fontes de poluição. Foram aplicados testes não paramétricos de *Kruskal-Wallis*, complementadas pela análise das desconformidades aos limites estabelecidos pela legislação ambiental, nos dados de monitoramento obtidos junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), do período de 2008 a 2021. De acordo com os resultados, dentre os afluentes do rio Paraopeba, os rios Maranhão e Betim foram os que apresentaram maior degradação da qualidade da água, que pode ser associada ao lançamento de esgotos domésticos não tratados ou insuficientemente tratados, além de serem influenciados pelas atividades minerárias e indústrias dos ramos metalúrgico, automobilístico e petroquímico e tipos de solos da região. Foram verificadas alterações nas concentrações em relação aos parâmetros alumínio dissolvido, chumbo total, cor verdadeira, ferro dissolvido, ferro total, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez, causados pelo rompimento da barragem I – Mina do Córrego do Feijão, no rio Paraopeba a partir da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, em Brumadinho. As maiores medições do parâmetro alumínio dissolvido ocorreram em maio de 2019, tanto nas estações próximas ao rompimento (BPE2 e BP072) como na mais a jusante (BP099), ou seja, quatro meses após o rompimento o rio Paraopeba já apresentava consequências em todo seu curso d'água.

¹ Engenheira ambiental, doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Especialista em Gestão de Projetos Ambientais e Gerenciamento de Recursos Hídricos. – e-mail: analulucunha@gmail.com *Autora correspondente.

² Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq nível 2. – e-mail: silvia@desa.ufmg.br

³ Bióloga, doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora voluntária do Núcleo de Estudos Ambientais/NEA, do Centro de Estudos Avançados Multidisciplinares/CEAM/Universidade de Brasília (UnB). – e-mail: lenoragomes@gmail.com

Palavras-chave: Segurança de barragens. Testes estatísticos não paramétricos. Indicador de contaminação fecal.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the quality of surface water in the Paraopeba River watershed, identifying possible impacts generated by the rupture of Dam I in Córrego do Feijão mine, of Vale SA, in Brumadinho, in addition to other sources of pollution. Non-parametric Kruskal-Wallis tests were applied, complemented by the analysis of monitoring data from 2008 to 2021 that showed non-compliance with the limits established by environmental legislation, which were obtained from Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) (Minas Gerais Water Management Institute). According to the results, among the tributaries of the Paraopeba River, Maranhão and Betim Rivers presented major degradation of water quality. That can be associated with the discharge of untreated or insufficiently treated domestic sewage, in addition to influence from mining and industrial activities (metallurgical, automobile and petrochemical) and soil types in the region. Changes in concentrations were verified concerning the following parameters: dissolved aluminum, total lead, true color, dissolved iron, total iron, total manganese, total suspended solid and turbidity caused by the collapse of dam I - Córrego do Feijão mine, which changed water quality in Paraopeba River from its confluence with Ferro Carvão stream, in Brumadinho. The largest measurements of dissolved aluminum parameter occurred in May 2019 and happened in the gauge stations close to the rupture (BPE2 and BP072) as well as in one further downstream (BP099). Hence, four months after the rupture, consequences were shown along the entire in Paraopeba River watercourse.

Keywords: Dam safety. Non-parametric tests. Faecal contamination Indicator.

Data de submissão: 29/10/2021

Data de aprovação: 15/02/2022

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba, localizada no estado de Minas Gerais e que integra a região do Alto Rio São Francisco, está sujeita a pressões antrópicas variadas que decorrem do crescimento populacional e da dinâmica de atividades econômicas. Destacam-se na bacia hidrográfica do rio Paraopeba as atividades minerárias e indústrias dos ramos metalúrgico, automobilístico e petroquímico. O potencial industrial está ligado à proximidade com a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH); e as atividades industriais destacam-se nos municípios de Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco, Congonhas, Sarzedo, Ibirité e, principalmente, em Contagem e Betim, onde reside a maior parte da população da bacia

(INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019; SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE - SISEMA, 2021).

Em função da intensa atividade minerária na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, há uma grande quantidade de barragens de contenção de rejeitos, localizadas em diferentes municípios, e que apresentam risco contínuo de falhas. Uma dessas falhas ocorreu na Barragem I de rejeitos de minério de ferro, da mina Córrego do Feijão, da Mineradora Vale S.A., em Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), que se rompeu em 25 de janeiro de 2019. O desastre causou a perda de 270 vidas humanas, danos ao meio ambiente e ao patrimônio público e privado, além de prejuízos socioeconômicos, se tornando preocupação não só na bacia hidrográfica do rio Paraopeba como também em toda a bacia hidrográfica do rio São Francisco (IGAM, 2020a). Na ocasião, o volume estimado de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro foi liberado por toda a calha do ribeirão Ferro-Carvão e atingiu o rio Paraopeba, que historicamente já apresentava a qualidade da água degradada pelo lançamento de esgotos domésticos não tratados e por diferentes atividades industriais (CALAZANS *et al.*, 2018; SABINO *et al.*, 2008; SOARES; PINTO; OLIVEIRA, 2020).

Nesse contexto, entende-se que para conhecimento da situação da qualidade das águas e das principais alterações ocorridas ao longo do tempo torna-se necessário o monitoramento da qualidade das águas superficiais (SANDERS, 1983). Geralmente são utilizadas técnicas estatísticas para compreensão das variações temporais e espaciais da qualidade da água e a identificação de possíveis fatores que influenciam os corpos d'água, de modo a contribuir para a gestão dos recursos hídricos (ALBERTO *et al.*, 2001; SIMEONOV *et al.*, 2003). Diversos estudos de avaliação da qualidade das águas em bacias hidrográficas no Brasil e no mundo já utilizaram essas técnicas (COSTA *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2016; GIAO; CONG; NHIEN, 2021; PINTO; CALAZANS; OLIVEIRA, 2019; TRINDADE *et al.*, 2017; SEN XU *et al.*, 2020). Métodos estatísticos multivariados foram utilizados por Calazans *et al.* (2018a) para analisar a qualidade das águas superficiais na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, identificando lançamentos de esgotos domésticos e efluentes industriais, responsáveis pela degradação dos corpos d'água.

Em decorrência do rompimento da Barragem I (mina Córrego do Feijão), monitoramentos especiais têm sido efetuados por vários órgãos públicos e pela empresa responsável pelo empreendimento a fim de aprimorar o acompanhamento da qualidade da água do rio Paraopeba (IGAM, 2019a). Os primeiros estudos já realizados sobre impactos do

rompimento reforçam a importância do monitoramento da qualidade da água e demonstram o avanço da pluma de rejeitos ao longo do rio Paraopeba (SILVA *et al.*, 2021; THOMPSON *et al.*, 2020; VERGILIO *et al.*, 2020).

O presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no estado de Minas Gerais (Brasil), no período de janeiro de 2008 a abril de 2021, identificando as principais pressões sofridas pelos corpos d'água e as áreas mais impactadas ao longo dos anos de monitoramento, tanto em decorrência das atividades econômicas e do crescimento demográfico da região, quanto devido ao rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados de monitoramento da qualidade da água

Para a avaliação da qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, foram utilizados os dados fornecidos pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Igam, referentes ao Monitoramento Básico do Programa Águas de Minas, realizado desde 1997, e ao Monitoramento Especial do rio Paraopeba, implantado na bacia hidrográfica logo após o rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, em 25 de janeiro de 2019.

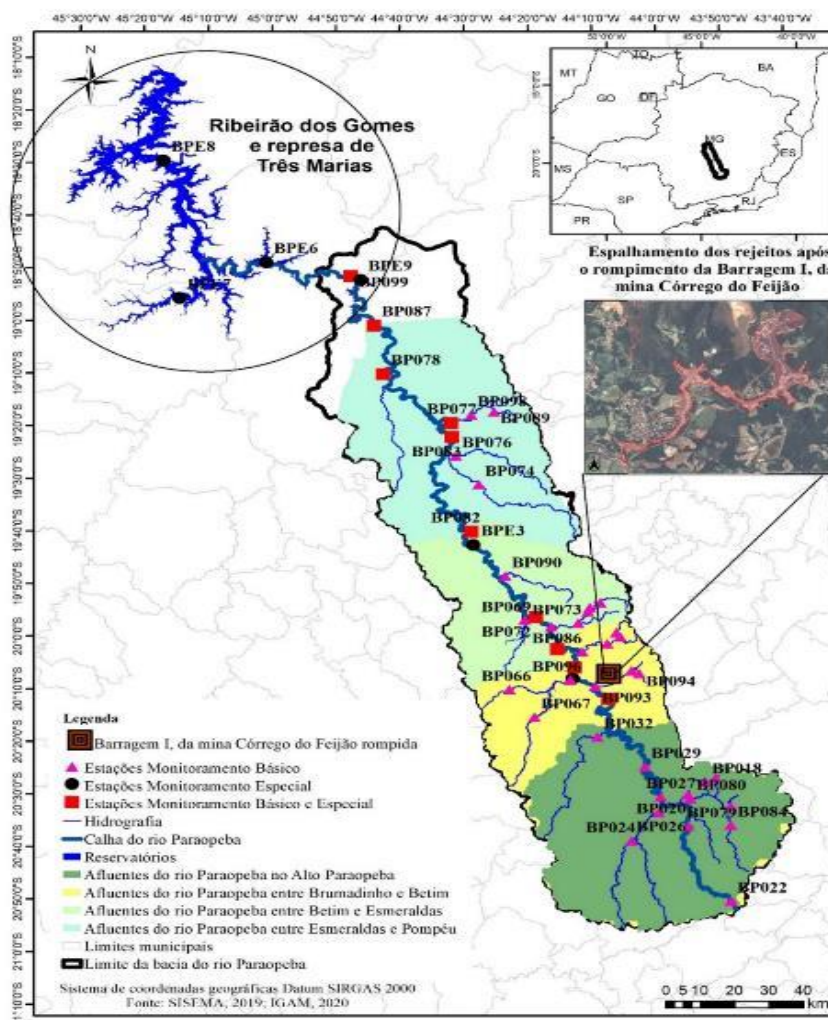
O Monitoramento Básico possui frequência trimestral ou semestral, e nesse estudo foi utilizado o período do 1º trimestre de 2008 ao 4º trimestre de 2020. O Monitoramento Especial possui frequência variada (diária, semanal, quinzenal e mensal) e abrange o período do dia 26 de janeiro de 2019 até 15 de abril de 2021. A Tabela 1, do Anexo A, apresenta a descrição das estações de monitoramento de qualidade de água na bacia hidrográfica do rio Paraopeba e na represa de Três Marias e o total de amostras por ponto de monitoramento.

Foram utilizados os dados do Monitoramento Básico de 44 pontos de monitoramento, sendo que 10 pontos também são abrangidos pelo Monitoramento Especial da qualidade da água do rio Paraopeba. Os dados de mais 6 pontos de monitoramento do Monitoramento Especial também foram utilizados e abrangem tanto a bacia do rio Paraopeba como a represa de Três Marias (IGAM, 2020a). Desta forma foram analisados os dados de 50 estações de monitoramento (FIGURA 1). O banco de dados utilizado neste estudo está

disponível no site do Igam⁴ e inclui amostras de 41 parâmetros de qualidade da água apresentados na Tabela 2, do Anexo A, que foram coletadas de 2008 a 2021.

Para melhor discussão dos resultados, os cursos d'água monitorados na bacia do rio Paraopeba foram agrupados em trechos, utilizando como referência os principais cursos d'água afluentes ao rio Paraopeba, os municípios e também os trechos propostos por Igam (2020b) após o rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, da Mineradora Vale S.A., em Brumadinho, que consideram a distância entre a foz do ribeirão Ferro Carvão no rio Paraopeba e as estações de monitoramento da qualidade da água.

Figura 1 – Localização das estações de monitoramento, local do rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão e delimitação dos trechos na bacia do rio Paraopeba e represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

⁴ <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>

2.2 Avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia do rio Paraopeba

A estatística descritiva foi utilizada para cada parâmetro de qualidade da água selecionado para todas as estações de monitoramento (dados não apresentados) e consistiu no cálculo dos valores mínimo e máximo, média, desvio-padrão e percentis (25, 50 – mediana e 75).

Os *outliers* identificados pelo método exploratório da amplitude interquartis (AIQ), foram analisados individualmente e nenhum dado foi excluído (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Os testes de normalidade de Shapiro e Wilk (1965) foram aplicados para cada parâmetro de qualidade da água e confirmaram a não aderência à distribuição normal, ao nível de significância (α) de 5%, indicando a aplicação de testes não paramétricos.

Sendo assim, para identificar diferenças significativas entre os valores medidos dos parâmetros de qualidade da água entre as estações de monitoramento, ao nível de significância (α) de 5%, foram utilizados os testes estatísticos não paramétricos de *Kruskal-Wallis* (KRUSKAL; WALLIS, 1952), seguido do teste de comparações múltiplas de *Dunn* (SIEGEL; CASTELLAN JR., 1988), quando aplicável. Dessa forma, foi possível identificar as estações mais impactadas e gráficos *box plots* foram gerados para melhor visualização dos resultados. Para efetuar a comparação espacial entre as estações de monitoramento localizadas na calha do rio Paraopeba, considerando os períodos antes e após o rompimento, foi empregada a análise exploratória dos dados, por meio da aplicação do teste não paramétrico de *Mann-Whitney*, ao nível de significância (α) de 5%.

Foi efetuada a análise das desconformidades aos limites preconizados pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para os parâmetros que possuem limite legal, de acordo com a classe de enquadramento de cada curso de água na bacia do rio Paraopeba (TABELA 2, ANEXO A). Os resultados obtidos foram analisados e discutidos por trecho da bacia avaliado e a qualidade das águas superficiais dos afluentes do rio Paraopeba foi discutida de montante para jusante, considerando os dados do monitoramento básico.

Para a discussão dos resultados foram utilizados os dados das seguintes fontes: (i) Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil – MapBiomas (MAPBIOMAS, 2020), para a contabilização das áreas relativas a cada classe de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Paraopeba; (ii) IDE-SISEMA, para informações sobre os

empreendimentos licenciados (SISEMA, 2021) e; (iii) Atlas Esgotos para obtenção dos índices de coleta e tratamento de esgotos em cada município (ANA, 2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na bacia do rio Paraopeba foi possível observar amplitude para a maioria dos parâmetros (TABELA 2, ANEXO A). Essa variação pode ser resultado dos impactos gerados pelo rompimento da barragem de rejeitos.

3.1 Avaliação da qualidade das águas superficiais dos afluentes do rio Paraopeba na região do Alto Paraopeba

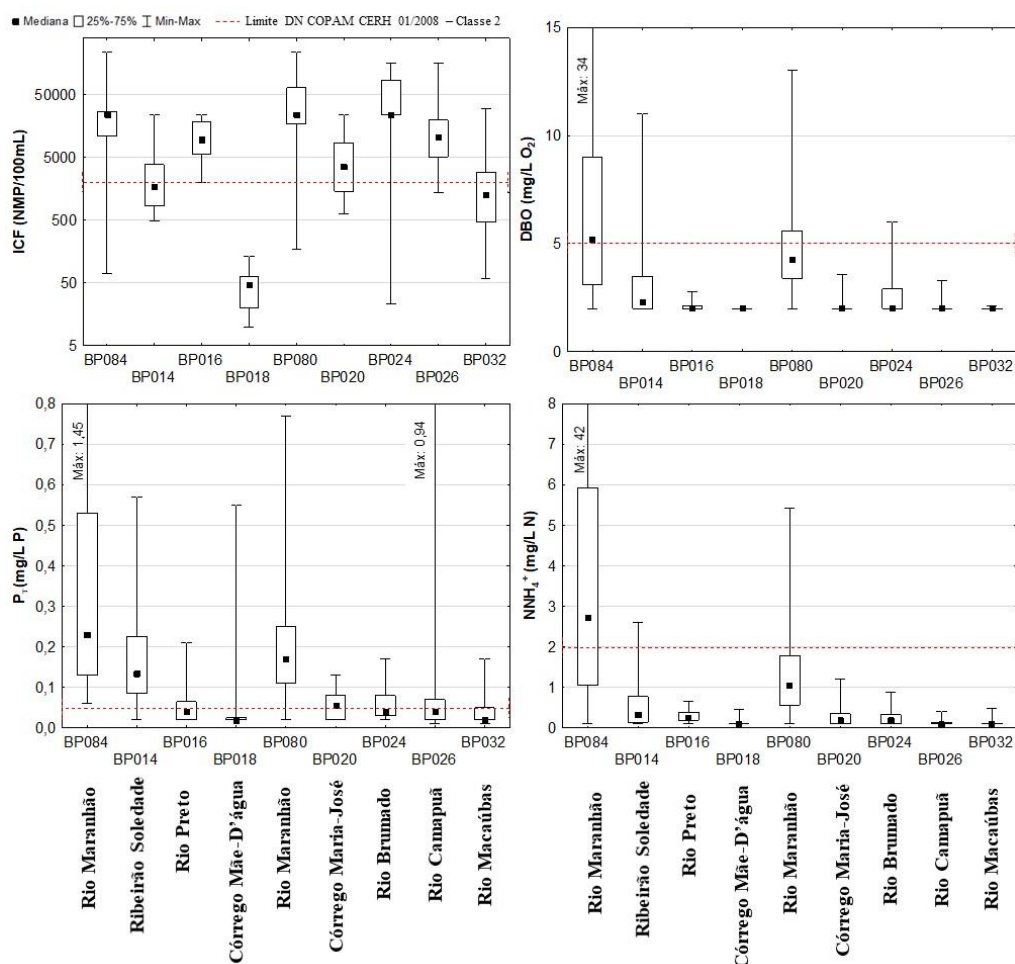
O Alto Paraopeba está situado a montante do local do rompimento da Barragem I de rejeitos de minério de ferro, da mina Córrego do Feijão, da Mineradora Vale S.A., em Brumadinho, não apresentando variações na qualidade da água que podem ser associadas ao desastre. No entanto, por estar localizado na região geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero, ocorre o predomínio das atividades minerárias, que podem alterar a qualidade das águas superficiais dos cursos d'água. Totalmente inserido no bioma Mata Atlântica, tem como uso e ocupação do solo predominante a pastagem (42%) (MAPBIOMAS, 2020). Os municípios de Congonhas e Conselheiro Lafaiete que possuem densidade demográfica acima de 100 hab/km², além de Belo Vale, Casa Grande, Cristiano Ottoni, Entre Rios de Minas, Jeceaba, Moeda, Piedade dos Gerais, Queluzito e São Brás do Suaçuí estão completamente inseridos nesse trecho, totalizando uma população de aproximadamente 355 mil habitantes (IBGE, 2019). No Alto Paraopeba foram analisados os dados de qualidade da água monitorados pelo Igam para os seguintes afluentes do rio Paraopeba: rio Maranhão (enquadramento: classe 2), rio Camapuã (enquadramento: classe 1) e rio Macaúbas (enquadramento: classe 1).

Na Figura 2 são apresentados os gráficos *box plots* dos parâmetros indicador de contaminação fecal (ICF), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (P_T) e nitrogênio amoniacal total (N-NH₄⁺) nas estações de qualidade da água dos afluentes do rio Paraopeba no Alto Paraopeba.

Os valores significativamente maiores, considerando o teste de *Kruskal-Wallis*, ao nível de significância de 5%, observados no rio Maranhão (BP084 e BP080) e seus afluentes

ribeirão Soledade (BP014), rio Preto (BP016) e córrego Maria José (BP020), para o indicador de contaminação fecal indicam a possível contaminação por esgotos domésticos dos municípios de Conselheiro Lafaiete e Congonhas, que não possuem nenhum tipo de tratamento (ANA, 2020). Também é possível observar que o rio Maranhão, na localidade de Gagé, próximo a Conselheiro Lafaiete (BP084), apresenta concentrações significativamente maiores, para DBO, fósforo total e nitrogênio amoniacal total.

Figura 2 – Variabilidade dos parâmetros indicador de contaminação fecal (ICF), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (P_T) e nitrogênio amoniacal total ($N-NH_4^+$) nas estações de qualidade da água e dos afluentes do rio Paraopeba no Alto Paraopeba



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

De acordo com Igam (2019b), Soares, Pinto e Oliveira (2020) outro afluente do rio Paraopeba, o rio Camapuã, também apresentou altas concentrações do ICF que já foram

identificadas anteriormente, e podem ser associadas aos lançamentos de esgotos domésticos sem tratamento de Entre Rios de Minas, lançado no seu afluente rio Brumado, e de Jeceaba, lançado no próprio rio Camapuã (ANA, 2020).

Na margem direita do rio Paraopeba, onde se encontra o rio Maranhão e seus afluentes, entre os municípios de Conselheiro Lafaiete e Congonhas, ocorreu o aumento ao longo dos anos das classes de uso e ocupação do solo de Infraestrutura Urbana (40%) e do Mosaico de Agricultura e Pastagem (377%) (MAPBIOMAS, 2020).

Desta forma, quando comparada a qualidade da água do rio Maranhão e seus afluentes aos rios Brumado, Camapuã e Macaúbas é possível observar diferenças significativas para todos os parâmetros de qualidade da água. As alterações na qualidade da água em decorrência da urbanização e das atividades econômicas desenvolvidas na sub-bacia do rio Maranhão foram confirmadas pela estatística descritiva e pelo teste de *Kruskal-Wallis*, onde os maiores valores de medianas para os parâmetros Ba_T (0,08 mg/L Ba), DBO (5,2 mg/L O_2 , como visto na Figura 2), DQO (24 mg/L O_2), P_T (0,23 mg/L P, como visto na Figura 2), Mn_T (1,7 mg/L Mn), $N-NO_2^-$ (0,3 mg/L N), $N-NH_4^+$ (2,7 mg/L N, como visto na Figura 2), $N-NO_3^-$ (0,7 mg/L N) e menores valores de medianas para OD (2,8 mg/L O_2) são identificadas no rio Maranhão.

O uso e ocupação do solo predominante de pastagem pode também ser associado com as maiores medianas encontradas para os parâmetros Ca_T (20 mg/L Ca), Cl_T (20 mg/L Cl), $ClO-a$ (4 mg/L Pt), CE (484 $\mu mho/cm$), Dur_T (65 mg/L $CaCO_3$), Mg_T (4,2 mg/L), $N-NO_3^-$ (4 mg/L N), K_{diss} (6,7 mg/L K), Na_{diss} (41 mg/L Na), SDT (267 mg/L), ST (320 mg/L), SO_4 (44 mg/L S) e Zn_T (0,04 mg/L Zn) no ribeirão Soledade (afluente do rio Maranhão), uma vez que escoamento superficial pode ser intensificado pela redução da vegetação.

À medida que sólidos dissolvidos são adicionados na água (como o cálcio, magnésio e sulfato) a condutividade aumenta. De acordo com CETESB (2018), níveis de condutividade superiores a 100 $\mu mho/cm$ indicam ambientes impactados. O ribeirão Soledade, apresentou uma mediana de CE quase 5 vezes maior que o valor de referência.

O rio Maranhão se destaca por apresentar a maior mediana (1,7 mg/L Mn na BP084) e o maior valor máximo (7,3 mg/L Mn na BP080) de manganês total entre as estações no Alto Paraopeba. Além disso, todos os afluentes do rio Maranhão monitorados também apresentaram valores acima do limite estabelecido pela legislação para Classe 2 (0,1 mg/L Mn). Os valores de manganês encontrados nos pontos de monitoramento do Alto Paraopeba podem ser

associados tanto às atividades minerárias como à lixiviação do solo, que possuem níveis de ferro e manganês naturalmente no solo da região do Quadrilátero Ferrífero (COSTA *et al.*, 2017). Em relação ao ferro dissolvido, o rio Maranhão, em Conselheiro Lafaiete, apresenta mediana (0,5 mg/L Fe) acima do limite estabelecido pela legislação, para corpos d'água classe 2 (0,3 mg/L Fe), assim como os rios Brumado, Camapuã e Macaúbas.

No rio Maranhão, próximo a sua foz no rio Paraopeba, a jusante do município de Congonhas, foram identificados valores acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental para os metais tóxicos arsênio total, chumbo total, cromo total, mercúrio total, níquel total, cobre dissolvido e zinco total, que podem ser associados às atividades minerárias e da indústria siderúrgica existente no município.

Em resumo, dos afluentes do rio Paraopeba monitorados no Alto Paraopeba, o que possui a maior degradação da qualidade da água é o rio Maranhão, que pode ser associada aos lançamentos de esgotos domésticos dos municípios de Congonhas e Conselheiro Lafaiete, além das atividades minerárias e metalúrgicas. Os parâmetros que apresentaram maiores valores e podem ser associados a essas fontes de poluição foram o indicador de contaminação fecal, DBO, nutrientes, ferro dissolvido, manganês total e metais tóxicos. Destaca-se também a degradação da qualidade da água do rio Brumado, podendo ser relacionada ao lançamento dos esgotos domésticos dos municípios de Entre Rios de Minas e Jeceaba.

3.2 Avaliação da qualidade das águas superficiais dos afluentes do rio Paraopeba entre Brumadinho e Betim

No trecho localizado no Médio Paraopeba entre os municípios de Brumadinho e Betim, está situado o local do rompimento da Barragem I de rejeitos de minério de ferro, da mina Córrego do Feijão, da Mineradora Vale S.A e o reservatório do Rio Manso, importante fonte de abastecimento humano da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a terceira maior aglomeração urbana do Brasil (IBGE, 2019). O reservatório do Rio Manso, juntamente com o reservatório Serra Azul, Vargem das Flores e a captação a fio d'água no rio Paraopeba (suspensa após o rompimento da barragem), compõem o Sistema Paraopeba, responsável pelo abastecimento de aproximadamente 3 milhões de habitantes (COPASA, 2020; IBGE, 2019).

As atividades que predominam no trecho são os usos minerários, da indústria metalúrgica e química, além de usos agropecuários e da indústria alimentícia. Totalmente

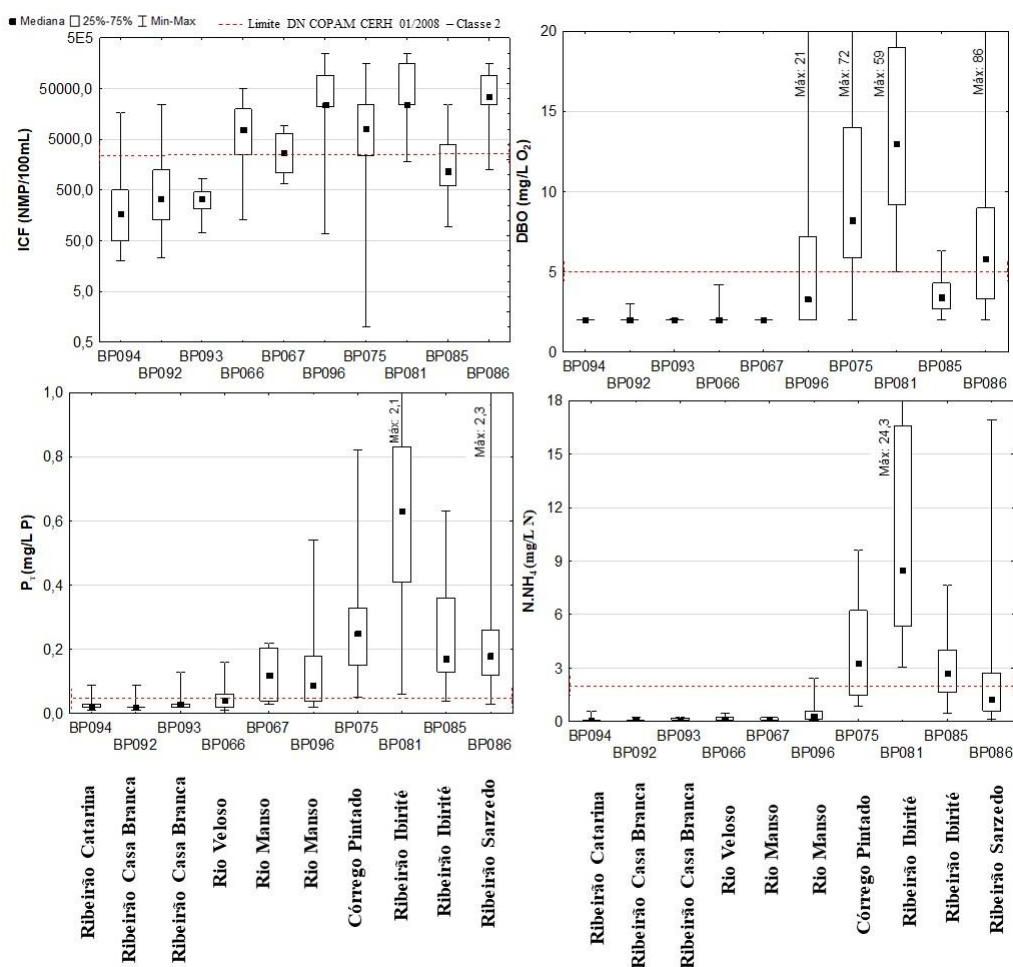
inserido no bioma Mata Atlântica, tem como uso e ocupação predominante a pastagem (34%) e as formações florestais (32%) (MAPBIOMAS, 2020). Os municípios completamente inseridos nesse trecho têm uma população de aproximadamente 282 mil habitantes (IBGE, 2019), são Brumadinho, Crucilândia, Ibitité, Mário Campos, Rio Manso e Sarzedo. Os afluentes do rio Paraopeba monitorados pelo Igam são o rio Manso (enquadramento: classe 1, das nascentes até o barramento do reservatório Rio Manso e classe 2, do barramento até a confluência com o rio Paraopeba), o ribeirão Sarzedo (enquadramento: classe 2) e o ribeirão Casa Branca (enquadramento: classe 1, até a confluência com o ribeirão Catarina e classe 2, da confluência com o ribeirão Catarina até a foz no rio Paraopeba). Ressalta-se que nenhum desses cursos d'água foi diretamente impactado pelo rompimento da barragem, que afetou principalmente a calha do rio Paraopeba.

Em Brumadinho, o ribeirão Casa Branca (BP092 e BP093) e seu afluente o ribeirão Catarina (BP094), se destacam por apresentarem melhores condições de qualidade da água, uma vez que apresentam os menores valores dos parâmetros analisados, na maior parte do tempo, e maiores valores de oxigênio dissolvido (FIGURA 3). A área de drenagem do ribeirão Casa Branca abrange também as áreas das unidades de conservação: APE Estadual Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Catarina, APA Estadual Sul RMBH, RPPN Ville Casa Branca e Parque Estadual da Serra do Rola Moça (SISEMA, 2021). A qualidade das águas desses cursos d'água pode ser justificada pela proteção que a vegetação natural promove contra a erosão do solo, a sedimentação e a lixiviação excessiva de nutrientes (ARCOVA; CICCIO, 1999).

O rio Manso tem qualidade da água monitorada em dois pontos: a montante do reservatório Rio Manso (BP067), implantado no ano de 2020 e próximo da confluência com o rio Paraopeba em Brumadinho (BP096), desde 2005. No ponto a montante do Reservatório (BP067), os parâmetros ferro dissolvido e indicador de contaminação fecal tiveram todas amostras acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental (0,3 mg/L Fe e 2000 NMP/mL). O ponto de monitoramento no rio Manso (BP096) apresentou qualidade da água influenciada pelas atividades que predominam na região, como os usos minerários, da indústria metalúrgica e química, além de usos agropecuários e da indústria alimentícia e lançamentos de esgotos domésticos não tratados. Conforme apresentado na Figura 3, os parâmetros que apresentaram maiores percentuais de desconformidade com a legislação ambiental foram indicador de contaminação fecal (94% das amostras apresentaram medições maiores que 2000 NMP/mL), manganês total (63% das amostras apresentaram concentrações maiores que 0,1

mg/L Mn), ferro dissolvido (41% das amostras apresentaram concentrações maiores que 0,3 mg/L Fe), fósforo total (39% das amostras apresentaram concentrações maiores que 0,1 mg/L P_T) e demanda bioquímica de oxigênio (33% das amostras apresentaram concentrações maiores que 5 mg/L O₂).

Figura 3 – Variabilidade dos parâmetros indicadores de contaminação fecal (ICF), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (P_T) e nitrogênio amoniacal total (N-NH₄⁺) nas estações de qualidade da água e dos afluentes do rio Paraopeba entre Brumadinho e Betim



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

O reservatório Rio Manso recebe o rio Veloso, que a jusante do município de Itatiaiuçu (BP066), tem a qualidade da água influenciada pelo indicador de contaminação fecal (90% das amostras apresentaram medições maiores que 2000 NMP/mL – Figura 3), ferro dissolvido (59% das amostras apresentaram concentrações maiores que 0,3 mg/L Fe) e manganês total (41% das amostras apresentaram concentrações maiores que 0,1 mg/L Mn). A

contaminação fecal do rio Veloso pode estar associada ao lançamento sem tratamento dos esgotos sanitários de Itatiaiuçu, bem como às atividades de suinocultura (ANA, 2020; SISEMA, 2021). Já as maiores concentrações de ferro dissolvido e manganês total podem ser associadas às atividades minerárias presentes na região, com pilhas de estéril e barragens de contenção de rejeitos da mineração de ferro licenciadas junto ao órgão ambiental (SISEMA, 2021).

Os maiores valores de concentrações para os metais arsênio total, cromo total, cobre dissolvido e níquel total ocorreram no rio Veloso. Embora não tão recorrentes, podem ser tóxicos à saúde humana e merecem atenção já que se trata de afluente de um reservatório com fins de abastecimento público.

Na Figura 3 é possível observar maiores medianas para o ICF no ribeirão Sarzedo, próximo de sua foz no rio Paraopeba em Mário Campos (BP086), no rio Manso, próximo de sua confluência com o rio Paraopeba, em Brumadinho (BP096) e no ribeirão Ibirité, a jusante do município de Ibirité (BP081). Esses valores podem ser associados a esgotos domésticos tratados e não tratados dos municípios de Sarzedo, Mário Campos, Rio Manso, Brumadinho, Betim e Ibirité (ANA, 2020). No ribeirão Ibirité (BP081), destacam-se também as maiores medianas em relação ao fósforo total, DBO e nitrogênio amoniacal total, indicando o enriquecimento orgânico nesse curso d'água (FIGURA 3). Essa degradação pode estar associada ao recebimento dos efluentes de indústria de abate de bovinos existente no município, uma vez que os efluentes desse tipo de indústria caracterizam-se principalmente por alta carga orgânica, alto conteúdo de gordura, flutuações de pH, altos conteúdos de nitrogênio, fósforo e sal e flutuações de temperatura (PACHECO; YAMANAKA, 2006).

Em resumo, entre os municípios de Brumadinho e Betim, destaca-se a melhor qualidade da água do ribeirão Casa Branca, podendo ser associada às áreas de proteção existentes no município de Brumadinho. Em contrapartida, o ribeirão Ibirité e seu afluente córrego Pintado apresentaram águas com pior qualidade e contaminação associada aos lançamentos de esgotos domésticos, principalmente dos municípios de Betim, Ibirité, Sarzedo e Mário Campos. Os parâmetros que apresentaram maiores valores e podem ser associados a fonte de poluição de indicador de contaminação fecal, DBO e nutrientes. Além disso, destacam-se as concentrações de metais encontradas no rio Veloso, afluente do rio Manso, decorrentes das atividades de mineração e da indústria química em Itatiaiuçu.

3.3 Avaliação da qualidade das águas superficiais dos afluentes do rio Paraopeba entre Betim e Esmeraldas

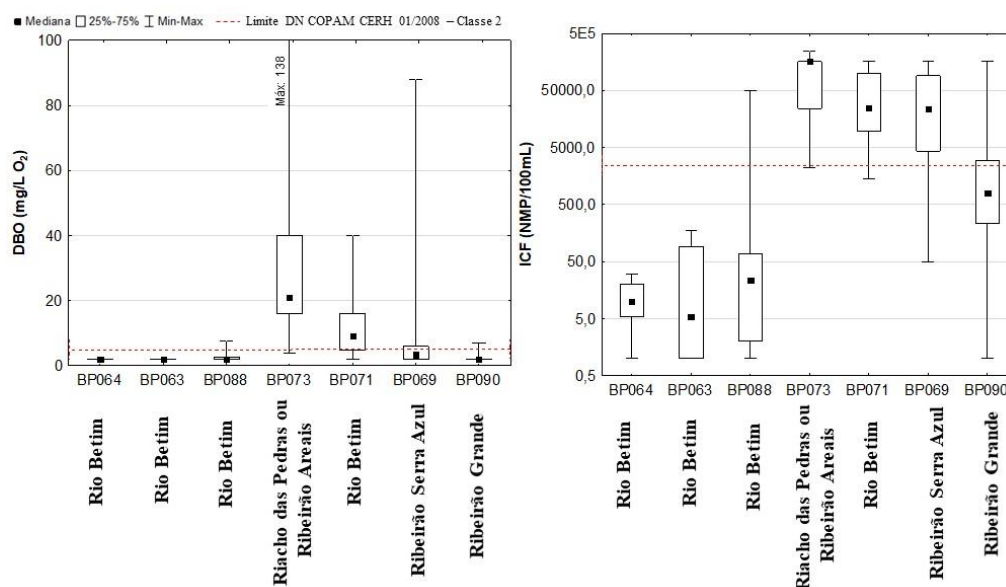
Também localizado no Médio Paraopeba, entre os municípios de Betim e Esmeraldas, neste trecho estão situados os reservatórios de Serra Azul e Vargem das Flores, que representam uma importante fonte de abastecimento humano da RMBH. Inserido na transição entre os biomas de Mata Atlântica e Cerrado, têm como uso e ocupação predominante a pastagem (49%) (MAPBIOMAS, 2020). Os municípios completamente inseridos nesse trecho, com população de aproximadamente 110 mil habitantes são Florestal, Igarapé, Juatuba e Mateus Leme (IBGE, 2019). Além disso, a mancha urbana dos municípios com maior população na bacia do rio Paraopeba, Betim e Contagem (444.784 e 668.949 habitantes, respectivamente), é caracterizada pela diversidade de atividades econômicas, com destaque para a indústria metalúrgica e química, além de atividades minerárias e agrossilvipastoris (IBGE, 2019; SISEMA, 2021). Nesse trecho, os afluentes do rio Paraopeba monitorados pelo Igam são: rio Betim (enquadramento: classe 1 nas estações de monitoramento BP063, BP064 e BP088 e classe 3 na estação BP071), ribeirão Serra Azul (enquadramento: classe 1) e ribeirão Grande (enquadramento: classe 2).

O monitoramento do rio Betim, a montante (BP064) e a jusante (BP063) do reservatório de Vargem das Flores, entre os municípios de Contagem e Betim, foi iniciado pelo Programa Águas de Minas do Igam no ano de 2020. Durante o período do monitoramento ocorreram medições acima dos valores máximos permitidos (VMP) pela legislação ambiental para a Classe 1 dos parâmetros clorofila-*a* (VMP: 10 µg/L) nos dois pontos, para fósforo total (VMP: 0,1 mg/L P) a montante, e manganês total (VMP: 0,1 mg/L Mn) e substâncias tensoativas (VMP: 0,5 mg/L LAS) a jusante. A qualidade da água dos afluentes do reservatório de Vargem das Flores vem sendo degradada em decorrência de mudanças no uso do solo na bacia hidrográfica (SOARES *et al.*, 2021). Ao longo dos anos foi identificado o crescimento da Infraestrutura Urbana na área de drenagem do rio Betim até o exutório do reservatório de Vargem das Flores, mesmo dentro dos limites da APA Estadual de Vargem das Flores (MAPBIOMAS, 2020). Logo após o exutório do reservatório Vargem das Flores, o rio Betim recebe o afluente riacho das Pedras/ribeirão das Areias (BP073), que fica a jusante do município de Betim e apresenta a maior parte do solo (30,1%) ocupado pela Infraestrutura Urbana, que tem a densidade demográfica de 1.102,80 hab/km² (MAPBIOMAS, 2020; IBGE, 2019).

Outro curso de água desse trecho é o riacho das Pedras/ribeirão das Areias (enquadramento: classe 2) que se mostrou degradado em relação a maioria dos parâmetros analisados. Destaque para o indicador de contaminação fecal que teve todas as amostras acima do limite máximo da legislação ambiental para classe 2 (2000 NMP/mL) que pode ser associado ao lançamento de esgotos domésticos, assim como os parâmetros DBO (98% das amostras acima de 5 mg/L O₂), P_T (100% das amostras acima de 0,1 mg/L P) e NNH₄⁺ (88% das amostras acima de 3,7 mg/L N), que são indicativos de enriquecimento orgânico.

Como pode-se observar na Figura 4, nesse trecho destacam-se o ponto situado no rio Betim (BP071), a jusante da confluência com o riacho das Pedras/ribeirão das Areias, e o ponto BP073 situado no riacho das Pedras/ribeirão das Areias, apresentando medianas para DBO e ICF significativamente superiores às medianas encontradas para as demais estações desse trecho. O valor da mediana na estação BP073 (21 mg/L O₂) chega a ser mais de 4 vezes superior ao limite da legislação para cursos d'água enquadrados na classe 2 que é de até 5 mg/L O₂. Ou seja, mesmo os municípios de Betim e Contagem apresentando 75% e 80%, respectivamente, de esgoto coletado e com tratamento, conforme ANA (2020), a qualidade dos cursos d'água da região pode estar fortemente impactada pela não universalização do tratamento, seja pelo tratamento insuficiente das ETEs do município. As desconformidades para os parâmetros ICF e DBO já são apontadas em outros estudos como indicadores de lançamento de esgoto doméstico sem tratamento adequado como a principal fonte de poluição das águas superficiais de bacias localizadas próximas a RMBH (COSTA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2019; PINTO; CALAZANS; OLIVEIRA, 2019; DANTAS *et al.*, 2020).

Figura 4 – Variabilidade dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e indicador de contaminação fecal (ICF) nas estações de qualidade da água e dos afluentes do rio Paraopeba entre Betim e Esmeraldas



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

Tanto o ribeirão Serra Azul, em Juatuba (BP069), a jusante do reservatório de Serra Azul, como o ribeirão Grande (BP090), a montante de sua foz no rio Paraopeba, em Esmeraldas, apresentaram concentrações de SDT acima de 500 mg/L, que é o limite máximo estabelecido pela legislação ambiental para todas as classes de enquadramento. Nas áreas de drenagem de ambos cursos d'água ocorre a predominância de pastagem tornando o solo mais susceptível ao carreamento de sólidos (MAPBIOMAS, 2020). Além disso, somente 8,9% dos esgotos domésticos do município de Juatuba são tratados, sendo que o restante é lançado sem tratamento no ribeirão Serra Azul (ANA, 2020).

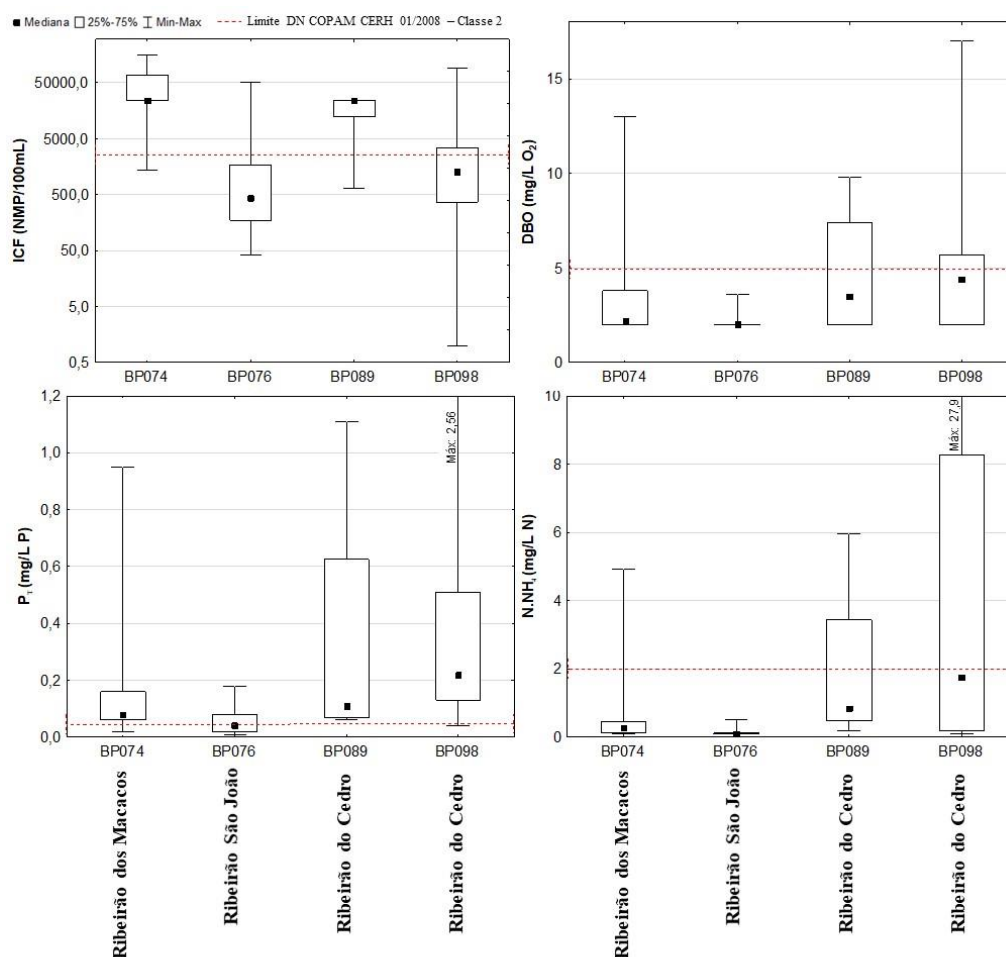
Dos afluentes do rio Paraopeba monitorados entre os municípios de Betim e Esmeraldas, o rio Betim próximo de sua foz no rio Paraopeba e seu afluente riacho das Pedras/ribeirão das Areias apresentaram a pior qualidade de água tendo em vista os parâmetros analisados.

3.4 Avaliação da qualidade das águas superficiais dos afluentes do rio Paraopeba entre Esmeraldas e Pompéu, a montante da UHE Retiro Baixo

No trecho localizado entre os municípios de Esmeraldas e Pompéu, no Médio e Baixo Paraopeba, a montante da UHE Retiro Baixo, os afluentes do rio Paraopeba monitorados pelo Igam são o ribeirão São João (enquadramento: classe 2) e seu afluente ribeirão dos Macacos (enquadramento: classe 1) e o ribeirão do Cedro (enquadramento: classe 2), em dois pontos. Totalmente inserido no bioma Cerrado, tem como classe de uso e ocupação do solo predominante a pastagem (60%) (MAPBIOMAS, 2020). Os municípios completamente inseridos nesse trecho são Cachoeira da Prata, Caetanópolis, Fortuna de Minas, Inhaúma e Pequi, que em conjunto têm a população de aproximadamente 30 mil habitantes (IBGE, 2019). O município de Sete Lagoas, parcialmente inserido neste trecho, possui população de aproximadamente 240 mil habitantes e é onde as principais atividades econômicas ocorrem, com destaque para as indústrias produtoras de cimento e o coprocessamento de resíduos em forno de clínquer (SISEMA, 2021).

Conforme apresentado na Figura 5, O ribeirão dos Macacos (BP074), em Cachoeira da Prata, foi o curso d'água que apresentou os maiores valores para o parâmetro ICF entre as estações analisadas e 100% das amostras ultrapassaram o limite estabelecido na legislação para cursos d'água de classe 1, que é de 200 NMP/mL, possivelmente pelo lançamento dos esgotos domésticos sem tratamento dos municípios de Cachoeira da Prata e Fortuna de Minas (ANA, 2020). O estudo desenvolvido por Soares; Pinto; Oliveira (2020), já havia identificado essa região do ribeirão Macacos (estação BP074) como crítica, por estar entre as estações de monitoramento da bacia do rio Paraopeba que apresentaram as maiores medianas para o parâmetro indicador de contaminação fecal ao longo da série histórica de 2008 a 2015.

Figura 5 – Variabilidade dos parâmetros indicadores de contaminação fecal (ICF), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total (P_T) e nitrogênio amoniacal total ($N-NH_4^+$) nas estações de qualidade da água e dos afluentes do rio Paraopeba entre Esmeraldas e Pompéu, a montante da UHE Retiro Baixo



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

De acordo com ANA (2020), o ribeirão do Cedro, entre os municípios de Paraopeba e Caetanópolis (BP089 e BP098), recebe esgotos domésticos tratados e não tratados desses municípios, o que pode estar contribuindo com a degradação da qualidade da água, uma vez que apresentou as maiores medianas para os parâmetros fósforo total, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato e nitrogênio amoniacal total, indicando contaminação por matéria orgânica e nutrientes (FIGURA 5). Além disso, foram identificadas atividades de abate de animais e agrossilvipastoris na região (SISEMA, 2021).

Na área de drenagem do ribeirão São João, na cidade de Paraopeba (BP076), estão concentrados empreendimentos da indústria metalúrgica, atividades minerárias e de gerenciamento de resíduos. Os valores máximos encontrados para os metais Al_{diss} (0,5 mg/L Al), As_T (0,007 mg/L As), Cr_T (0,049 mg/L Cr), Pb_T (0,029 mg/L Pb) e Zn_T (0,352 mg/L Zn), podem estar relacionados a essas atividades, uma vez que esses elementos podem atingir o curso d'água através da lixiviação do solo ou dos efluentes industriais (CETESB, 2018).

Em resumo, entre os municípios de Esmeraldas e Pompéu, o ribeirão dos Macacos apresentou a qualidade da água com indicativo de contaminação fecal que pode ser associado aos lançamentos de esgotos domésticos dos municípios de Cachoeira da Prata e Fortuna de Minas. Já o ribeirão do Cedro apresentou os maiores valores para parâmetros indicativos de enriquecimento orgânico (DBO, PT, $N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$), impactado pelo lançamento de esgotos dos municípios de Paraopeba e Caetanópolis, além das atividades de abate de animais e agrossilvipastoris na região. Já o ribeirão São João apresentou indicativos de contaminação por metais tóxicos.

3.5 Avaliação da qualidade das águas superficiais na calha do rio Paraopeba

Na avaliação da qualidade das águas do rio Paraopeba próximo de sua nascente (BP022), enquadrado como classe 1, em Cristiano Otoni, 100% das amostras analisadas apresentaram valores do indicador de contaminação fecal acima de 200 NMP/mL, que é limite estabelecido pela legislação ambiental. Provavelmente, os elevados valores do ICF são decorrência do lançamento dos esgotos sanitários sem tratamento do município de Cristiano Otoni que tem uma população de aproximadamente 5 mil habitantes.

Em seguida, no ponto de monitoramento em São Brás do Suaçuí (BP079), onde o rio Paraopeba também é enquadrado como classe 1, esse trecho recebe os esgotos sanitários tratados do município de Queluzito, que opera com um sistema de reatores anaeróbios (ANA, 2020). O parâmetro fósforo total apresentou 8% das amostras acima do limite da legislação ambiental que é 0,1 mg/L P, ao passo que para ICF, 94% das amostras foram acima do limite de 200 NMP/mL, indicando a necessidade de aprimoramento do tratamento para garantir a remoção do indicador de contaminação fecal, associado a presença de microrganismos prejudiciais à saúde humana. Ressalta-se que mesmo se enquadrado em Classe 2, esse ponto continua apresentando desconformidades para o indicador de contaminação fecal.

A partir da confluência com o rio Maranhão, o rio Paraopeba é enquadrado como classe 2. A jusante da cidade de Jeceaba, logo após a foz dos rios Maranhão e Camapuã, o rio Paraopeba (BP027) continua apresentando valores acima dos permitidos pela legislação para o indicador de contaminação fecal, sendo que 96% das amostras se encontravam em desconformidade com o limite estabelecido pela legislação ambiental para classe 2. Além disso, 94% das amostras também estavam acima do limite da legislação para o parâmetro manganês total. Uma vez que esse local está a jusante das confluências dos rios Maranhão e Camapuã, as desconformidades podem ser relacionadas aos lançamentos de esgotos domésticos e atividades minerárias, como visto no item 3.1.

Após a foz do rio Macaúbas, na localidade de Melo Franco, em Brumadinho (BP036), a análise dos parâmetros de qualidade da água do rio Paraopeba mostra que os parâmetros alumínio dissolvido, cor verdadeira, ferro dissolvido, fósforo total, apresentaram maiores medianas no período após o rompimento (2019-2021), quando comparados com os dados do período anterior (2008-2018). Como a estação está situada a 10 km a montante do local do rompimento da barragem, a alteração na qualidade pode estar associada à presença das atividades minerárias existentes no Alto Paraopeba.

No mês de maio de 2019, ocorreram as maiores concentrações médias de alumínio dissolvido no ponto de monitoramento (BPE2) do rio Paraopeba, situado a 19,7 km a jusante do rompimento da barragem, onde encontra-se instalada a captação de água da COPASA, em Brumadinho. Entre 26/01/2019 e 08/04/2021, 77% das 109 amostras apresentaram valores de alumínio dissolvido acima do limite estabelecido pela legislação ambiental para a classe 2. No mesmo ponto de amostragem, foi observado no período chuvoso (janeiro/2020), o valor máximo de arsênio total (0,024 mg/L As) na calha do rio Paraopeba que pode ser consequência da lixiviação do solo, uma vez que o elemento arsênio também pode ser encontrado em grandes quantidade nos solos da região do Quadrilátero Ferrífero (VIGLIO, 2018).

Ainda no ponto BPE2, entre 26/01/2019 e 08/04/2021, 40% das 108 amostras de chumbo total se encontraram em desconformidade com o limite da legislação, indicando contaminação do curso d'água após o rompimento. O registro máximo de chumbo total em toda a série de monitoramento analisada foi de 0,147 mg/L Pb e ocorreu no dia 26/01/2019, um dia após o rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão no local denominado Fecho do Funil, entre os municípios de Mário Campos e São Joaquim de Bicas, a jusante da confluência do rio Manso (BP068), localizado a 24,8 km do rompimento. No mesmo dia e local, ocorreu o

valor máximo de 13.688 mg/L para o parâmetro sólidos em suspensão totais, assim como o máximo para sólidos totais de 13.792 mg/L e turbidez (34.500 UNT), indicando o impacto direto do rompimento da barragem nos primeiros quilômetros a jusante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão.

A jusante da foz do rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba, 59 km após o local do rompimento da barragem (BP072), após o rompimento da barragem, foram observados os maiores valores máximos para os parâmetros alumínio dissolvido (valor máximo amostrado: 3,16 mg/L Al), cobre dissolvido (valor máximo amostrado: 0,01 mg/L Cu), ferro dissolvido (valor máximo amostrado: 1,27 mg/L Fe), manganês total (valor máximo amostrado: 12,26 mg/L Mn), mercúrio total (valor máximo amostrado: 0,82 mg/L Hg), sólidos em suspensão totais (valor máximo amostrado: 4984 mg/L) e turbidez (valor máximo amostrado: 17148 UNT), possivelmente associados aos impactos da pluma de contaminação resultante do rompimento da barragem. Além dos impactos do rompimento, a afluição do rio Betim nessa região também pode contribuir para a degradação da qualidade da água, em decorrência do recebimento de esgotos domésticos e efluentes industriais, discutido anteriormente.

Quando comparados os dados do período antes (2008-2018) e depois (2019-2021) do rompimento da barragem no rio Paraopeba, foi possível identificar maiores medianas para os parâmetros alumínio dissolvido (0,28 mg/L Al), bário total (0,05 mg/L Ba), cor verdadeira (59 UPt), ferro dissolvido (0,45 mg/L Fe), manganês total (0,39 mg/L Mn), sólidos em suspensão totais (89 mg/L), sólidos totais (162 mg/L) e turbidez (136,8 UNT) no período após o rompimento. Destaca-se que mesmo antes do rompimento esses parâmetros também já apresentavam violações que podem estar associados à diferentes fontes de poluição pontual, como o lançamento de esgotos domésticos ou a poluição difusa, podendo estar também associado à atividade minerária.

Apesar do aumento da mediana das concentrações para o bário total, não foram identificadas desconformidades ao limite estabelecido pela legislação ambiental para a classe 2. Como pode ser visto na Tabela 3, todas as estações de monitoramento localizadas na calha do rio Paraopeba situadas a jusante do rompimento apresentaram percentuais de violações para o alumínio dissolvido, acima de 69% no período após o rompimento da barragem (limite máximo estabelecido para a classe 2: 0,1 mg/L Al), com maior concentração do alumínio dissolvido no mês de maio de 2019, tanto nas estações próximas ao rompimento (BPE2 - valor máximo: 3,12 mg/L Al) e BP072 (valor máximo: 3,16 mg/L Al) como a jusante (BP099 - valor

máximo: 3,32 mg/L Al). Quatro meses após o rompimento da barragem, o rio Paraopeba ainda apresentava consequências na qualidade da água. Nos locais amostrados ao longo do rio Paraopeba (de 6 a 464 km a jusante do rompimento da barragem) em maio de 2019, por Thompson *et al.* (2020), formaram um grupo fortemente separado na análise de componentes principais, sugerindo a migração do rejeito de minério pelo rio ao longo do tempo.

Tabela 3 – Percentual de violação aos limites preconizados pela Resolução CONAMA nº 357/2005, para as estações de monitoramento da calha do rio Paraopeba localizadas a jusante do local do rompimento da barragem I de contenção de rejeitos, no período de janeiro de 2019 a abril de 2021

Estação	Al _{diss}	Pb _T	Cor	Fe _{diss}	Mn _T	Ni _T	SST	Turb.
BPE2	● 77%	● 40%	● 33%	● 74%	● 98%	● 3%	● 69%	● 73%
BP068	● 73%	● 33%	● 29%	● 70%	● 99%	● 4%	● 72%	● 74%
BP070	● 69%	● 29%	● 33%	● 65%	● 99%	● 3%	● 64%	● 73%
BP072	● 85%	● 20%	● 40%	● 76%	● 99%	● 1%	● 47%	● 68%
BPE3	● 90%	● 25%	● 45%	● 67%	● 87%	● 0%	● 60%	● 76%
BP082	● 94%	● 20%	● 41%	● 73%	● 85%	● 1%	● 54%	● 66%
BP083	● 93%	● 14%	● 38%	● 72%	● 76%	● 0%	● 43%	● 61%
BP077	● 82%	● 29%	● 26%	● 65%	● 82%	● 3%	● 56%	● 65%
BP078	● 91%	● 12%	● 32%	● 66%	● 72%	● 0%	● 40%	● 51%
BP087	● 75%	● 25%	● 39%	● 59%	● 78%	● 0%	● 55%	● 58%
BP099	● 88%	● 2%	● 28%	● 72%	● 15%	● 0%	● 7%	● 13%

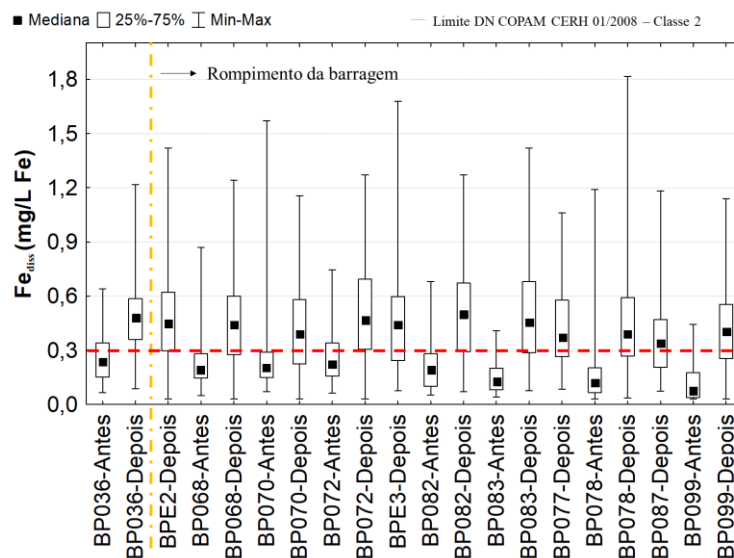
● Parâmetros que apresentaram percentual de violação de até 25% ● Parâmetros que apresentaram percentual de violação entre 50% e 74%
 ● Parâmetros que apresentaram percentual de violação entre 26% e 49% ● Parâmetros que apresentaram percentual de violação superior a 75%

Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

Em relação ao parâmetro cor verdadeira, altas concentrações podem gerar um efeito repulsivo na população, no entanto, em geral, não causa danos à saúde (CETESB, 2018). A maior mediana para cor verdadeira (73 UPt) foi observada a montante da captação de água de Pará de Minas (BPE3), 112 km do local do rompimento. Todas as estações de monitoramento apresentaram violações à legislação ambiental para cor verdadeira (limite máximo estabelecido para a classe 2: 75 UPt) acima de 26% no período após o rompimento (TABELA 2, ANEXO A). Os percentuais de violações após o rompimento foram maiores que os calculados para o período anterior ao rompimento, indicando os efeitos dos rejeitos no rio Paraopeba após o rompimento da barragem I, da Mina do Córrego do Feijão.

Conforme pode ser visto na Figura 6, as medianas para o ferro dissolvido estiveram acima do limite legal no período após rompimento (26 de janeiro de 2019 a 15 de abril de 2021), refletindo em desconformidades aos limites máximos estabelecidos pela legislação ambiental ao longo do rio Paraopeba (0,3 mg/L Fe para Classe 2).

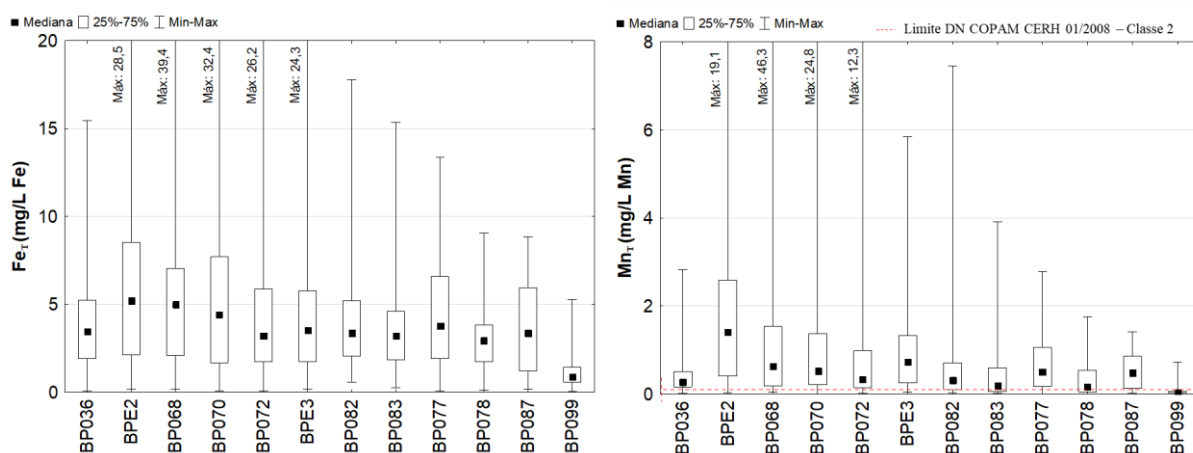
Figura 6 – Variabilidade do parâmetro ferro dissolvido (Fe_{diss}) considerando as estações de qualidade da água da calha do rio Paraopeba no período antes (2008-2018) e após (2019- 2021) o rompimento da Barragem I



Fonte: Elaborado pelas autores (2021)

A partir da divisa dos municípios de Betim e Juatuba (BP072), a 59 km do local do rompimento da barragem, observa-se uma redução dos valores de ferro total (FIGURA 7). Esse comportamento, diferente do ferro dissolvido que apresentou valores elevados, pode ocorrer devido à sedimentação do ferro adsorto à partículas sólidas, que avança em velocidade inferior a de matéria dissolvida, que se dissemina na mesma velocidade da água (IGAM, 2020a). O parâmetro manganês total (MnT) violou o limite da legislação (0,1 mg/L Mn) em todas as estações da calha do rio Paraopeba após o rompimento da barragem, e atingiu valores máximos nas mesmas estações que o ferro total, seguindo o mesmo comportamento de redução da concentração do curso do rio Paraopeba (FIGURA 7).

Figura 7 – Variabilidade dos parâmetros ferro total (Fe_T) e manganês total (Mn_T) considerando as estações de qualidade da água da calha do rio Paraopeba no período de 2019 a 2021 de montante para jusante



Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)

Como pode ser observado na Tabela 3, 279 km a montante da UHE Retiro Baixo (BP087), entre os municípios de Curvelo e Pompéu, foram verificados valores acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental em 75% das amostras de Al_{diss} , 25% das amostras de Pb_T , 39% das amostras de cor, 59% das amostras de Fe_{diss} , 78% das amostras de Mn_T , 55% das amostras de SST e 85% das amostras de Turb. Esses resultados sugerem a contaminação da água em consequência do rompimento da Barragem I da mina Córrego do Feijão e das atividades minerárias na área da bacia. Apesar de na estação a jusante UHE Retiro Baixo (BP099), localizada a 318 km de distância do local do rompimento, os parâmetros chumbo total, cor verdadeira, manganês total, níquel total, sólidos em suspensão totais e turbidez apresentarem menores percentuais de violação quando comparados com as estações a montante. Para o alumínio dissolvido e ferro dissolvido os percentuais de violação foram maiores, indicando que o reservatório atuou como uma barreira da movimentação da pluma de rejeitos ao longo do curso d'água, mas mesmo assim os impactos gerados pelo rompimento atingiram toda a calha do rio Paraopeba.

Nas estações BPE6, BPE7 e BPE8, localizadas na represa de Três Marias, amostras foram coletadas na superfície, sendo que os parâmetros alumínio dissolvido, chumbo total (BPE8), cor verdadeira (BPE6), manganês total (BPE8) e oxigênio dissolvido apresentaram desconformidade com os limites da legislação ambiental. As medições acima dos valores máximos permitidos pela legislação ambiental na chegada do rio Paraopeba ao reservatório de

Três Marias (BPE6) podem estar associadas ao fato desse local receber diretamente a contribuição de toda a carga de sólidos dissolvidos da bacia do rio Paraopeba.

De forma geral, com base nos dados do Monitoramento Especial do rio Paraopeba realizado pelo Igam após o rompimento da barragem, no período de janeiro de 2019 a abril de 2021, é possível afirmar que o rompimento da barragem causou impactos na qualidade hídrica. Os principais parâmetros que confirmam a mudança da qualidade da água foram alumínio dissolvido, chumbo total, cor verdadeira, ferro dissolvido, ferro total, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez. Resultados semelhantes foram reportados por Thompson *et al.*, 2020 e Vergílio *et al.*, 2020. Apesar de no período de maio a outubro de 2020 (período seco), ter sido observada a redução dos valores de turbidez nas estações analisadas, devido à diminuição do escoamento superficial e da vazão, é importante a implementação de frentes de contenção, remoção e destinação do rejeito, uma vez que chuvas de maior intensidade podem reinserir os impactos desses rejeitos na qualidade da água, por meio do material extravasado proveniente da barragem e a remobilização dos sedimentos do rio Paraopeba.

5 CONCLUSÃO

A utilização dos testes estatísticos não paramétricos de *Kruskal-Wallis*, seguido do teste de comparações múltiplas de *Dunn*, quando aplicável, permitiu a avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no período de janeiro de 2008 a abril de 2021, possibilitando a identificação das principais pressões sofridas pelos corpos d'água e as áreas mais impactadas ao longo dos anos de monitoramento, tanto em decorrência das atividades econômicas e do crescimento demográfico da região, quanto devido ao rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho.

A contaminação da bacia do rio Paraopeba se deve a uma série de fatores, incluindo processos naturais e, principalmente, atividades antrópicas, como a suscetibilidade da bacia hidrográfica à erosão; contaminação por metais pesados associados às atividades econômicas e solos da região; e lançamento de esgotos domésticos não tratados ou insuficientemente tratados nos corpos d'água. As desconformidades em relação aos limites estabelecidos pela legislação ambiental para os parâmetros indicador de contaminação fecal e fósforo total apontaram condições sanitárias que impossibilitam os usos aos quais águas enquadradas como Classe 2 são destinadas na bacia do rio Paraopeba, como ao abastecimento para consumo humano, após

tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação de hortaliças, à aquicultura e à atividade de pesca. Concentrações dos parâmetros manganês total e ferro dissolvido foram potencializados pelas atividades econômicas da bacia.

O rompimento da barragem I – Mina do Córrego do Feijão alterou a qualidade da água da calha rio Paraopeba a partir da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, em Brumadinho. Os principais parâmetros que confirmam essa mudança da qualidade da água foram alumínio dissolvido, chumbo total, cor verdadeira, ferro dissolvido, ferro total, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez. Os parâmetros alumínio dissolvido, cor verdadeira e ferro dissolvido apresentaram um padrão de comportamento ao longo do rio Paraopeba, com valores elevados ao longo de todo o curso, enquanto o manganês total, sólidos em suspensão totais, sólidos totais e turbidez apresentaram maior variação dos valores medidos nos pontos de monitoramento próximos ao local do rompimento da barragem (até 42 km) com diminuição gradativa ao longo do percurso do rio.

Além dos impactos causados na calha do rio Paraopeba pelo rompimento, também se destacam os impactos gerados pelo lançamento de esgotos domésticos não tratados ou insuficientemente tratados dos municípios de Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Entre Rios de Minas, Jeceaba, Queluzito, Betim, Juatuba, Ibitité, Itatiaiuçu e Rio Manso. Os afluentes da margem direita do Paraopeba, rio Maranhão em Congonhas e riacho das Pedras e rio Betim, em Betim, apresentaram a maior degradação da qualidade da água, próximos da RMBH.

Também foi observado que para alguns parâmetros houve pouca ou nenhuma desconformidade aos limites estabelecidos pela legislação ambiental, isso pode ter acontecido em função de uma frequência de monitoramento insuficiente para possibilitar a identificação de cargas de poluição que variam em curto prazo.

De forma geral, conclui-se que a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Paraopeba é influenciada pelo lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, atividades de mineração, áreas de agricultura e pastagens.

REFERÊNCIAS

ALBERTO, W. D. *et al.* Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality a case study: Suquía river basin (Córdoba-Argentina). **Water Research**, Amsterdam, v. 35, n. 12, p. 2881-2894, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00592-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00592-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135400005923?via%3Dihub> Acesso em: 30 ago. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas esgotos: poluição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em: 30 set. 2021.

ARCOVA, F.; CICCIO, V. de. Qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo na região de Cunha, estado de São Paulo: water quality in small watersheds with different land. **Scientia florestals**, Piracicaba, v. 56, p. 125134, 1999. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr56/cap09.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2020.

CALAZANS, G. M. *et al.* The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Switzerland, v. 190, n. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6873-2> . Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-018-6873-2>. Acesso em: 16 ago. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo: apêndice E - Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo: Cetesb, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wpcontent/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-E-Significado-Ambiental-eSanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade-2016.pdf> Acesso em: 25 ago. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). **Release de Resultados 1T20**. Belo Horizonte: Copasa, 2020. Disponível em: <https://ri.copasa.com.br/servicos-aos-investidores/central-de-resultados/> Acesso em: 25 ago. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução Conama n. 357 de 17 de março de 2005**. 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. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 25 ago. 2020.

COSTA, E. P. da. *et al.* Evaluation of violations in water quality standards in the monitoring network of São Francisco river basin, the third largest in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Switzerland, v. 189, n. 11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6266-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-017-6266-y>. Acesso em: 20 ago. 2020.

DANTAS, M. S. *et al.* Impact of fecal contamination on surface water quality in the São Francisco river hydrographic basin in Minas Gerais, Brazil. **Journal of Water and Health**, London, v. 18, n. 1, p. 48-59, 1 fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2019.153>. Disponível em: <https://iwaponline.com/jwh/article/18/1/48/71303/Impact-of-fecal-contamination-on-surface-water>. Acesso em: 20 set. 2020.

DING, J. *et al.* Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 551-552, n. 19, p. 205-216, maio 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.162>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716301620?via%3Dihub> Acesso em: 20 ago 2020.

GIAO, N. T.; CONG, N. V.; NHIEN, H. T. H. Using remote sensing and multivariate statistics in analyzing the relationship between land use pattern and water quality in Tien Giang Province, Vietnam. **Water**, Switzerland, v. 13, n. 8, p. 1093, 15 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13081093>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/8/1093>. Acesso em: 20 ago 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **IBGE Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 fev. 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba**. Belo Horizonte: Igam, 2013. Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/ARQUIVO_SANEAMENTO/estudo-saneamento-rio-paraopeba.pdf. Acesso em: 8 fev. 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2018**: resumo executivo anual. Belo Horizonte: Igam, 2019a. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/3210>. Acesso em: 8 fev. 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano de Monitoramento Emergencial Rio Paraopeba**: rompimento barragem córrego Feijão em Brumadinho. Belo Horizonte: Igam, 2019b. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/3741-desastre-ambiental-barragem-b1-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 08 set. 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Informativo da qualidade das águas do rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 da mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais**. Belo Horizonte: Igam, 2020a. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/2934>. Acesso em: 20 ago. 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da qualidade da águas e sedimentos do Rio Paraopeba: acompanhamento da qualidade das águas do Rio Paraopeba após 1 ano do rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA – Brumadinho/MG**. Belo Horizonte: Igam, 2020b. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/ACOES_RECUPERACAO_PARA_OPEBA/Caderno_1_ano_Igam_desastre_Brumadinho.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Monitoramento da qualidade das águas**. 2021. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso em: 7 jul. 2021.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, Switzerland, v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952. DOI: <https://doi.org/10.2307/2280779>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1952.10483441>. Acesso em: 20 set. 2020.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias)**. Base de Dados. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 4 set. 2020.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. DE A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, J. C. D. *et al.* Spatial-temporal analysis of the surface water quality of the Pará River Basin through statistical techniques. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2322>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/6JX3B4jhpZ8XgDgh9MYmQqF/?lang=en>. Acesso em: 20 set. 2020.

PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)**. São Paulo: Cetesb, 2006. (Série P + L). Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/abate.pdf>. Acesso em: 30 set. 2020.

PINTO, C. C.; CALAZANS, G. M.; OLIVEIRA, S. C. Assessment of spatial variations in the surface water quality of the Velhas River Basin, Brazil, using multivariate statistical analysis and nonparametric statistics. **Environmental Monitoring and Assessment**, Switzerzerland, v. 191, n. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7281-y>. Disponível em: Acesso em: 20 set. 2020.

SABINO, C. *et al.* Análise de alguns aspectos da qualidade da água da Bacia do Rio Paraopeba utilizando estatística multivariada. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristovão, v. 8, n. 2, p. 6-18, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/500/50080202.pdf> Acesso em: 20 set. 2020.

SANDERS, T. G. *et al.* **Design of networks for monitoring water quality**. Littleton: Water Resources Publication LLC, 1983.

SANTOS, C. V. dos. *et al.* Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, Berlin, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>. Disponível em: Acesso em: 20 set. 2020.

SEN XU *et al.* Spatial scale effects of the variable relationships between landscape pattern and water quality: example from an agricultural karst river basin, Southwestern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 300, p. 106999, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106999>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880920301845?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar. 2021.

SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika**, United Kingdom, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2333709>. Acesso em: 20 set. 2020.

SIEGEL, S.; CASTELLAN JR., N. J. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

SIMEONOV, V. *et al.* Assessment of the surface water quality in Northern Greece. **Water Research**, Amsterdam, v. 37, n. 17, p. 4119-4124, out. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00398-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135403003981?via%3Dihub>. Acesso em: 20 set. 2020.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IDE-Sisema** . Belo Horizonte, 2021. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 11 jan. 2021.

SOARES, A. L. C. *et al.* Water quality assessment of a multiple-use reservoir in southeastern Brazil: case study of the Vargem das Flores reservoir. **Environmental Earth Sciences**, Switzerland, v. 80, n. 5, p. 210, 3 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09474-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-021-09474-0> Acesso em: 10 set. 2021.

SOARES, A. L. C.; PINTO, C. C.; OLIVEIRA, S. C. Impacts of anthropogenic activities and calculation of the relative risk of violating surface water quality standards established by environmental legislation: a case study from the Piracicaba and Paraopeba river basins, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, Switzerland, v. 27, n. 12, p. 14085-14099, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07647-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-07647-1>. Acesso em: 10 set. 2021.

SOUZA, T. S. da *et al.* Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 775, p. 145193, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145193>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972100259X?via%3Dihub>. Acesso em: 20 set. 2021.

THOMPSON, F. *et al.* Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 705, p. 135914, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719359091?via%3Dihub>. Acesso em: 20 set. 2021.

TRINDADE, A. L. C. *et al.* Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 13-24, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016131457>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/4n83rTXFZGHBc5Q5kL7cbcn/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2020.

VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco**. Belo Horizonte: CPRM, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20939>. Acesso em: 20 set. 2021

ANEXO A

Tabela 1 – Descrição das estações de monitoramento de qualidade de água do Igam na bacia hidrográfica do rio Paraopeba e na represa de Três Marias e total de amostras por ponto de monitoramento

(Continua)

Estação	Município	Monitoramento	Data de Estabelecimento	Curso D'água	Classe de Enquadramento	Total de amostras
BP014	Congonhas	Básico	20/07/2015	Ribeirão Soledade	Classe 3	20
BP016	Congonhas	Básico	20/07/2015	Rio Preto	Classe 1	20
BP018	Congonhas	Básico	20/07/2015	Córrego Mãe-D'água	Classe 2	20
BP020	Congonhas	Básico	20/07/2015	Córrego Maria-José	Classe 2	18
BP022	Cristiano Ottoni	Básico	18/04/2007	Rio Paraopeba	Classe 2	51
BP024	Entre Rios de Minas	Básico	18/04/2007	Rio Brumado	Classe 1	51
BP026	Jeceaba	Básico	01/10/1977	Rio Camapuã	Classe 1	51
BP027	Congonhas, Jeceaba	Básico	01/10/1977	Rio Paraopeba	Classe 2	51
BP029	Belo Vale	Básico	01/05/1978	Rio Paraopeba	Classe 2	51
BP032	Bonfim	Básico	17/04/2007	Rio Macaúbas	Classe 1	51
BP036	Brumadinho	Básico e Especial	01/05/1978	Rio Paraopeba	Classe 2	138
BP063	Betim	Básico	30/01/2020	Rio Betim	Classe 1	4
BP064	Contagem	Básico	30/01/2020	Rio Betim	Classe 1	4
BP066	Itatiaiuçu	Básico	17/04/2007	Rio Veloso	Classe 2	51
BP067	Rio Manso	Básico	31/01/2020	Rio Manso	Classe 1	4
BP068	São Joaquim de Bicas	Básico e Especial	01/05/1978	Rio Paraopeba	Classe 2	139
BP069	Juatuba	Básico	16/04/2007	Ribeirão Serra Azul	Classe 1	51
BP070	Betim, São Joaquim de Bicas	Básico e Especial	01/05/1978	Rio Paraopeba	Classe 2	138
BP071	Betim, Juatuba	Básico	01/07/1985	Rio Betim	Classe 3	51
BP072	Betim	Básico e Especial	01/07/1985	Rio Paraopeba	Classe 2	139
BP073	Betim	Básico	16/04/2007	Ribeirão das Areias ou Riacho das Pedras	Classe 2	51
BP074	Cachoeira da Prata	Básico	16/04/2007	Ribeirão dos Macacos	Classe 1	51
BP075	Ibirité	Básico	23/10/2012	Córrego Pintado	Classe 2	31
BP076	Inhaúma, Paraopeba	Básico	01/07/1985	Ribeirão São João	Classe 2	51
BP077	Papagaios, Paraopeba	Básico e Especial	07/11/2019	Rio Paraopeba	Classe 2	34
BP078	Curvelo, Pompéu	Básico e Especial	01/07/1985	Rio Paraopeba	Classe 2	139

Tabela 1 – Descrição das estações de monitoramento de qualidade de água do Igam na bacia hidrográfica do rio Paraopeba e na represa de Três Marias e total de amostras por ponto de monitoramento

						(Conclusão)
Estação	Município	Monitoramento	Data de Estabelecimento	Curso D'água	Classe de Enquadramento	Total de amostras
BP079	Congonhas, Conselheiro Lafaiete, São Brás do Suaçuí	Básico	01/05/1992	Rio Paraopeba	Classe 1	51
BP080	Congonhas	Básico	01/05/1992	Rio Maranhão	Classe 2	51
BP081	Ibirité	Básico	23/10/2012	Ribeirão Ibirité	Classe 2	31
BP082	Esmeraldas, São José da Varginha	Básico e Especial	01/05/1992	Rio Paraopeba	Classe 2	145
BP083	Papagaios, Paraopeba	Básico e Especial	01/05/1992	Rio Paraopeba	Classe 2	130
BP084	Conselheiro Lafaiete	Básico	02/02/2000	Rio Maranhão	Classe 2	51
BP085	Ibirité	Básico	25/01/2013	Ribeirão Ibirité	Classe 2	31
BP086	Betim, Mário Campos	Básico	02/02/2000	Ribeirão Sarzedo	Classe 2	51
BP087	Curvelo, Pompéu	Básico e Especial	06/11/2019	Rio Paraopeba	Classe 2	33
BP088	Betim	Básico	03/02/2000	Rio Betim	Classe 1	51
BP089	Caetanópolis, Paraopeba	Básico	07/11/2019	Ribeirão do Cedro	Classe 2	5
BP090	Esmeraldas	Básico	02/02/2000	Ribeirão Grande	Classe 2	51
BP092	Brumadinho	Básico	03/01/2003	Ribeirão Casa Branca	Classe 1	51
BP093	Brumadinho	Básico	10/07/2019	Ribeirão Casa Branca	Classe 2	17
BP094	Brumadinho	Básico	03/01/2003	Ribeirão Catarina	Classe 1	51
BP096	Brumadinho	Básico	08/08/2005	Rio Manso	Classe 2	51
BP098	Caetanópolis, Paraopeba	Básico	08/08/2005	Ribeirão do Cedro	Classe 2	51
BP099	Felixlândia	Básico e Especial	16/04/2007	Rio Paraopeba	Classe 2	190
BPE2	Brumadinho	Especial	26/01/2019	Rio Paraopeba	Classe 2	109
BPE3	Esmeraldas	Especial	12/02/2019	Rio Paraopeba	Classe 2	67
BPE6	Felixlândia	Especial	02/03/2019	Represa de Três Marias	Classe 2	35
BPE7	Abaeté	Especial	02/03/2019	Represa de Três Marias	Classe 2	34
BPE8	Três Marias	Especial	02/03/2019	Represa de Três Marias	Classe 2	34
BPE9	Felixlândia	Especial	27/03/2019	Ribeirão dos Gomes	Classe 2	88

Fonte: IGAM (2019b, 2021)

Tabela 2 – Parâmetros de qualidade da água, notação de referência, unidades, valores máximos permitidos por classe de enquadramento e estatística descritiva dos dados analisados, de 2008 a 2021, para toda a bacia do rio Paraopeba

(Continua)

Parâmetro	Notação de referência	Unidade	Valores máximos permitidos			Número de dados	Mínimo	Máximo	Mediana	Percentil 25%	Percentil 75%	Média	Desvio Padrão
			Resolução CONAMA 357/2005										
			Classe 1	Classe 2	Classe 3								
Alumínio dissolvido	Al _{diss}	mg/L Al	0,1	0,1	0,2	2106	0,02	3,56	0,13	0,10	0,28	0,25	0,39
Arsênio total	As _T	mg/L As	0,01	0,01	0,033	1886	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bário total	Ba _T	mg/L Ba	0,7	0,7	1	1455	0,00	0,38	0,04	0,02	0,07	0,05	0,04
Boro total	B _T	mg/L B	0,5	0,5	0,75	865	0,07	0,20	0,07	0,07	0,07	0,07	0,01
Cádmio total	Cd _T	mg/L Cd	0,001	0,001	0,01	2764	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Cálcio total	Ca _T	mg/L Ca	-	-	-	970	1,0	62,6	6,1	4,1	11,4	9,2	8,1
Chumbo total	Pb _T	mg/L Pb	0,01	0,01	0,033	2586	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cloro total	Cl _T	mg/L Cl	250	250	250	2022	0,3	337,0	3,9	2,0	7,8	10,3	23,7
Clorofila a	Clo-a	µg/L	10	30	60	2009	0,01	723,33	1,74	0,80	4,27	6,13	23,45
Cobre dissolvido	Cu _{diss}	mg/L Cu	0,009	0,009	0,013	2380	0,004	0,107	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
Condutividade elétrica in loco	CE	µmho/cm	-	-	-	2885	2,1	2400,0	86,3	61,9	121,0	132,6	174,5
Cor verdadeira	Cor	UPt	-	75	75	2745	5,0	1704,0	36,0	19,0	68,0	62,4	99,6
Cromo total	Cr _T	mg/L Cr	0,05	0,05	0,05	2322	0,04	0,14	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
Demanda biológica de oxigênio	DBO	mg/L O ₂	3	5	10	2109	2	138	2	2	3	4	8
Demanda química de oxigênio	DQO	mg/L O ₂	-	-	-	1964	5	273	16	9	26	22	23
Dureza total	Dur _T	mg/L CaCO ₃	-	-	-	914	4,2	219,0	25,2	18,0	44,9	34,3	25,2
Feoftina	Feof-a	µg/L	-	-	-	1769	0,01	270,20	2,01	0,91	4,13	5,04	12,78
Ferro dissolvido	Fe _{diss}	mg/L Fe	0,3	0,3	5	2917	0,03	2,02	0,28	0,14	0,49	0,36	0,30
Ferro total	Fe _T	mg/L Fe	-	-	-	1095	0,03	62,00	2,42	0,87	4,74	3,54	4,31
Fósforo total	P _T	mg/L P	0,1	0,1	0,15	2022	0,01	5,94	0,07	0,03	0,17	0,18	0,34
Indicador de contaminação fecal*	ICF	NMP/100 mL	200	1000	4000	2011	1	241960	3255	301	22000	19485	40771
Magnésio total	Mg _T	mg/L Mg	-	-	-	914	0,10	15,20	2,30	1,70	3,20	2,63	1,49
Manganês total	Mn _T	mg/L Mn	0,1	0,1	0,5	2918	0,00	46,27	0,17	0,07	0,53	0,54	1,47
Mercurio total	Hg _T	mg/L Hg	0,02	0,02	0,2	2101	0,02	4,23	0,20	0,20	0,20	0,21	0,12

Tabela 2 – Parâmetros de qualidade da água, notação de referência, unidades, valores máximos permitidos por classe de enquadramento e estatística descritiva dos dados analisados, de 2008 a 2021, para toda a bacia do rio Paraopeba

(Conclusão)

Parâmetro	Notação de referência	Unidade	Valores máximos permitidos			Número de dados	Mínimo	Máximo	Mediana	Percentil 25%	Percentil 75%	Média	Desvio Padrão
			Resolução CONAMA 357/2005										
			Classe 1	Classe 2	Classe 3								
Níquel total	Ni _T	mg/L Ni	0,025	0,025	0,025	2337	0,004	0,109	0,004	0,004	0,005	0,005	
Nitrato	N-NO ₃ ⁻	mg/L N	10	10	10	2087	0,01	23,20	0,69	0,29	1,18	1,62	
Nitrito	N-NO ₂ ⁻	mg/L N	1	1	1	2059	0,00	1,39	0,02	0,01	0,06	0,11	
Nitrogênio amoniacal total	N-NH ₄ ⁺	mg/L N	3,7: pH ≤ 7,5	3,7: pH ≤ 7,5	13,3: pH ≤ 7,5	2087	0,1	42,0	0,2	0,1	0,5	1,3	3,6
			2,0: 7,5 < pH ≤ 8,0	2,0: 7,5 < pH ≤ 8,0	5,6: 7,5 < pH ≤ 8,0								
			1,0: 8,0 < pH ≤ 8,5	1,0: 8,0 < pH ≤ 8,5	2,2: 8,0 < pH ≤ 8,5								
			0,5: pH > 8,5	0,5: pH > 8,5	1,0: pH > 8,5								
Nitrogênio orgânico	NO ₂	mg/L N	-	-	-	2086	0,10	11,00	0,44	0,26	0,58	0,65	
Oxigênio dissolvido	OD	mg/L O ₂	>6	>5	>4	2919	0,2	10,9	7,1	6,5	7,6	6,8	1,5
pH in loco	pH	-	6 – 9	6 – 9	6 – 9	2919	5,2	9,3	6,9	6,5	7,3	6,9	0,5
Potássio dissolvido	K _{diss}	mg/L K	-	-	-	966	0,1	28,3	2,2	1,4	3,3	3,0	2,9
Sódio dissolvido	Na _{diss}	mg/L Na	-	-	-	910	0,3	872,0	6,5	3,4	12,9	16,4	40,7
Sólidos dissolvidos totais	SDT	mg/L	500	500	500	2739	12	1178	74	57	102	99	97
Sólidos em suspensão totais	SST	mg/L	-	-	-	2919	1	13688	34	14	105	132	456
Sólidos totais	ST	mg/L	-	-	-	2919	15	13792	125	80	249	229	464
Substâncias tensoativas	MBAS	mg/L LAS	0,5	0,5	0,5	1226	0,05	3,58	0,10	0,10	0,10	0,21	0,40
Sulfato total	SO ₄	mg/L SO ₄	250	250	250	922	1	364	5	5	10	11	20
Temperatura da água	Temp.	°C	-	-	-	2919	14,4	35,2	24,6	22,3	26,4	24,2	3,1
Turbidez	Turb.	NTU	40	100	100	2919	0,5	34500,0	32,1	12,1	134,0	232,4	1206,0
Zinco total	Zn _T	mg/L Zn	0,18	0,18	5	2333	0,02	0,77	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04

Fonte: Elaborado pelas autoras (2021)