

RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)

Após o Rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão.

CODIFICAÇÃO ARCADIS (1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1)

Vale S.A.

NOVEMBRO DE 2023

Isenção de Responsabilidade

Este documento foi preparado pela Arcadis Logos S/A com observância das normas técnicas recomendáveis e em estrita obediência aos termos do pedido e contrato firmado com o cliente. Em razão disto, a Arcadis Logos S/A isenta-se de qualquer responsabilidade civil e criminal perante o cliente ou terceiros pela utilização deste documento, ainda que parcialmente, fora do escopo para o qual foi preparado.

Dados Gerais

Elaboradores	Áreas	Data da Elaboração
Filipe L. Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc.	30/11/2023
Kátia M. Mellito	Geóloga, MSc.	
Caíque Cabral	Geólogo, MSc.	
Karla Oliveira	Engenheira Agrícola e Ambiental, MSc	
Larissa Faria	Engenheira Ambiental	
Larissa Leles	Geóloga	
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	
Ludmila Lage	Estatística	
Milena Almeida	Engenheira Ambiental, MSc.	
Milla Bittencourt	Engenheira Geóloga	
Tássia Marques	Geóloga, MSc	

Verificadores	Áreas	Data da Verificação
Filipe Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc	29/12/2023
Kátia Mellito	Geóloga, MSc	

Aprovador
 Nayana Ortmann

Dados do Empreendedor

Informações do Empreendedor

Razão Social:	Vale S/A.
Endereço para correspondência:	Avenida Dr. Marco Paulo Simon Jardim nº 3580, Prédio 4, térreo, Águas Claras Bairro Mina de Águas Claras 34006-270 - Nova Lima, MG – Brasil

Dados da Empresa Consultora

Informações da Consultoria

Razão Social:	ARCADIS LOGOS S.A.
CNPJ:	07.939.296/0001-50
Endereço:	Rua Líbero Badaró, 377 – 15º andar. São Paulo/ SP, CEP 01009-906

Equipe Técnica

Rodrigo Braga Santini	Diretor	CREA/SP: 5062055883
	Geólogo	rodrigo.santini@arcadis.com
Lucas Fonseca	Diretor	CREA/MG: 91092D
	Engenheiro Hídrico	lucas.fonseca@arcadis.com
Nayana Ortmann	Gerente do projeto	CREA/ MG: 188818/D
	Engenheira Ambiental	nayana.ortmann@arcadis.com
Caíque Cabral	Geólogo, MSc.	caique.cabral@arcadis.com
Filipe Lima Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc.	filipe.dornelas@arcadis.com
Kátia M. Mellito	Geóloga, MSc.	katia.mellito@arcadis.com
Alessandra Casagrande	Geóloga	alessandra.linares@arcadis.com
Karla Oliveira	Engenheira Agrícola e Ambiental, MSc	karla.oliveira@arcadis.com
Larissa Faria	Engenheira Ambiental	larissa.faria@arcadis.com
Larissa Leles	Geóloga	larissa.leles@arcadis.com
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	leonardo.silva@arcadis.com
Ludmila Lage	Estatística	ludmila.lage@arcadis.com
Milena Almeida	Engenheira Ambiental, MSc.	milena.almeirda@arcadis.com
Milla Bittencourt	Engenheira Geóloga	milla.bittencourt@arcadis.com
Tássia Marques	Geóloga, MSc.	tassia.marques@arcadis.com

Sumário executivo

O período de estiagem/2023 (abril/2023 a setembro/2023) foi, de modo geral, marcado por um aumento nos índices pluviométricos em comparação com a estiagem/2022, especialmente nas porções mais a montante e central da bacia. Destaca-se abril/2023 que registrou os maiores acumulados de precipitação, com ocorrências mais significativas nas estações Alberto Flores e Belo Vale. Nos meses subsequentes (maio, junho e julho), houve uma redução nas precipitações acumuladas. Agosto apresentou um aumento nos totais acumulados, enquanto setembro evidenciou uma redução na pluviosidade, apesar dos incrementos registrados no final do mês. Na região do ribeirão Ferro-Carvão, as estações pluviométricas seguiram uma tendência semelhante às demais estações do rio Paraopeba durante a estiagem/2023, indicando precipitações mais elevadas em abril, redução ao longo dos meses seguintes e ligeiro aumento ao final de setembro/2023.

Conforme os testes temporais, constatou-se que, na estiagem/2023, as concentrações de Manganês total se mantiveram semelhantes às observadas na estiagem/2022 (exceto por um aumento na Região 1B) iguais ou inferiores ao *baseline* em todas as regiões do rio Paraopeba. Em sua fração dissolvida, o Manganês apresentou teores com tendência predominante de redução e estabilização ao longo das estiagens. Observou-se um aumento generalizado nas frações totais de Ferro e Alumínio, especialmente após a estiagem/2022, possivelmente influenciado pelo intenso período chuvoso anterior de 2021/2022. Nas frações dissolvidas, tanto Ferro quanto Alumínio mostraram um aumento ao longo do tempo em todas as regiões do rio Paraopeba, mas com uma tendência de redução e estabilidade na estiagem/2023. Na Região Ferro-Carvão, as concentrações de Ferro dissolvido são significativamente mais reduzidas e predominam comportamentos de redução ou estabilidade. Quanto à Turbidez, as concentrações na estiagem/2023 se mantiveram predominantemente similares às da estiagem/2022, exceto quanto a um aumento para as regiões 2B e 2C. Em relação ao Fósforo total, com variações atribuídas a usos e ocupações na bacia, seus teores apresentam aumento na estiagem/2023 a partir das regiões 1A a 2C, mas se assemelham estatisticamente à Região Montante a partir da estiagem/2022. Após o rompimento, registrou-se um aumento nas concentrações de Fósforo total nas regiões do Ferro-Carvão até 1B, mas não foi possível estabelecer uma associação direta com o rejeito. Do ponto de vista espacial, a partir da estiagem/2021, todas as regiões do rio Paraopeba apresentaram concentrações de metais majoritários (exceto Manganês dissolvido) e Turbidez similares ou inferiores às da Região Montante.

No período de estiagem/2023, observou-se, dentre os parâmetros monitorados, em geral, menores ou iguais percentuais de violação aos limites legais em relação à estiagem/2022, entretanto, com permanência de desvios acima da condição do *baseline* sazonal. Manteve-se um maior quantitativo de violações para Ferro dissolvido e Manganês total nas regiões do rio Paraopeba, e Alumínio e Ferro dissolvidos na Região 2C. Destaca-se, também, a ocorrência de maiores percentuais de desvios para os parâmetros *E. coli* e Fósforo total ao longo das

regiões, destacando-se a influência potencial de contribuições sanitárias. Dentre os parâmetros físico-químicos, em geral, notam-se apenas violações pontuais. Deste grupo, difere o comportamento dos Sólidos suspensos totais que apresentou maior quantitativo de desvios até o final da Região 2A. Ademais, ressalta-se que houve violações de parâmetros traços, todavia, o Chumbo e Níquel, em suas frações totais, foram evidenciados apenas na Região Ferro-Carvão, enquanto o Zinco total apresentou violação pontual na Região 3. A maioria das inconformidades observadas para os elementos traço também foram registradas nos seus respectivos pontos de referência, que apresentam a concentração anterior ao rompimento (concentração de *baseline*). Essas inconformidades também foram identificadas em trechos a montante, não impactados pelo rompimento. De maneira geral, não foi observada persistência de valores elevados desses analitos ao longo do tempo.

Com relação aos tributários, as alterações mais significativas estão relacionadas aos parâmetros mais característicos de suas respectivas bacias, como metais (Manganês, Ferro e Alumínio) e poluentes provenientes de contribuições sanitárias (Fósforo, *E. coli*, DBO e Nitrogênio amoniacal). Destaque pode ser dado ao Ribeirão Sarzedo, com presença de atividade agrícola, e rio Betim, de caráter urbano, que apresentam comportamentos peculiares. A qualidade da água é influenciada pela diluição na zona de mistura e processos de autodepuração e, assim, a diferença de vazão entre os afluentes e o rio Paraopeba pode limitar seu impacto a jusante.

Em sedimentos, as maiores concentrações dos analitos, principalmente Manganês, Arsênio, Cobre, Cromo e Níquel, foram identificadas da região do ribeirão Ferro-Carvão até a Região 1B, áreas em que houve maior influência do rejeito. Na Região 2B (reservatório de UHE Retiro Baixo, ambiente lântico e favorável à deposição de sedimentos) também ocorreram maiores concentrações, com destaque para Alumínio, Arsênio, Cromo, Cobre e Níquel. As concentrações dos analitos avaliados nos sedimentos, ao longo dos períodos de estiagem têm mantido comportamento geral de manutenção/equilíbrio. Contudo, reforça-se que na estiagem/2023 o aumento das concentrações de alguns metais em alguns trechos específicos, pode estar relacionado a um regime de escoamento reduzido, o qual permite maior capacidade de sedimentação ao longo do leito fluvial e nas proximidades de estruturas ou singularidades hidráulicas encontradas no curso d'água.

Em termos de distribuição granulométrica, notou-se predominância de sedimentos siltosos na maioria das regiões da bacia para o início do período de estiagem/2019, o que pode estar relacionada ao rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, resultando em um acúmulo dos rejeitos, principalmente nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. No período subsequente, estiagem/2020, percebeu-se uma maior distribuição das frações arenosas ao longo do canal, mesmo se constatando ainda uma larga distribuição de sedimentos siltosos. Da estiagem/2021 até a estiagem/2023 o comportamento granulométrico é muito similar entre as regiões, apresentando em geral, semelhança das frações silte, argila e areia em todos os pontos. A diferença mais aparente é a redução das frações areia grossa e

areia muito grossa, apesar de areia muito fina a média ainda estar em circulação mesmo em período de estiagem.

Na avaliação da estatística (espacial e temporal) dos períodos de estiagem, com o auxílio dos *boxplots*, juntamente com a avaliação estatística espaço temporal com o método Kruskal Wallis, percebeu-se, de modo geral que houve equilíbrio nas concentrações de metais ao longo do tempo e, principalmente, nos últimos ciclos de estiagem (2022 e 2023) desde a região de Montante até a Região 2B. Nestas regiões, percebeu-se alguma variabilidade nos resultados para algumas substâncias, porém, no geral, as variações foram poucos significativas.

Analisando-se os testes de comparação temporal, verifica-se que, em geral, os parâmetros e as regiões que apresentaram maiores ocorrências de diferenças significativamente superiores, entre as estiagens monitoradas, foram: Manganês (regiões Ferro-Carvão, Montante, 2B e 2C), Ferro, Alumínio, Chumbo, Cobre (Região Ferro-Carvão, principalmente), Níquel (regiões Ferro-Carvão, 2B e 2C), Cádmio (todas as regiões), Arsênio (regiões Ferro-Carvão, 1B e 2C, principalmente), Cromo (regiões Ferro-Carvão e 1A, principalmente) e Fósforo (Região Ferro-Carvão, principalmente).

A avaliação de tendência sazonal realizada com o método de Mann-Kendall e complementa a estatística anterior, visto que avalia a tendência mediana mensal, ponto a ponto, seja do ciclo de estiagem ou para a série completa, indicaram que as regiões 1A e 1B foram as que mais demonstraram oscilação na tendência das concentrações dos parâmetros avaliados (principalmente Mn, Fe, Pb, Cu, Ni). Esse padrão sugere que os transportes de sedimentos que se sucedem no tempo se misturam com aqueles depositados por ocorrência do rompimento e, que com o tempo, indicam redução da ocorrência do rejeito nos sedimentos de corrente em trechos mais afetados com o rompimento da barragem B1. Nas regiões Montante, 2A (exceto por PT-19 e PT-54 que indicaram tendência de redução nas concentrações dos parâmetros), 2B (exceto PT-28 com substâncias com tendências variáveis) e 2C, os locais avaliados majoritariamente não apresentaram tendência sazonal, sugerindo mais equilíbrio nas concentrações das substâncias avaliadas.

Ao se considerar os valores da Resolução CONAMA 454/12 e Vicq (2015) para a qualidade dos sedimentos, no período de estiagem/2023, constatou-se que as regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B apresentaram maior variação de elementos com concentrações acima dos valores de referência, enquanto as regiões Montante, 2A e 2C apresentaram valores acima de referência apenas para os analitos As, Cr e Ni. Em linhas gerais, neste período, Manganês e Alumínio ultrapassaram os valores de referência de Vicq (2015) e Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel e Zinco ficaram acima dos valores orientadores de nível 1 (VOR 1) da Resolução CONAMA 454/12. Destaca-se, ainda, que a presença de Manganês ocorreu entre as regiões Ferro-Carvão a 1B, e Alumínio somente na Região 2B; enquanto o Cd e Pb ocorrem restritos a alguns pontos e regiões, com destaque para Ferro-Carvão e 1A (ambos), e 2B (Pb). Em relação ao valor orientador do nível 2 (VOR 2), ocorreram desvios para Arsênio nas regiões

Ferro-Carvão, 1A e 2B; Cobre na Região Ferro-Carvão, Cromo nas regiões 1B e 2B; Níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C. Em relação as regiões 2D e 3, para VOR 1 os parâmetros que se apresentaram acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram: Arsênio, Cromo, Níquel e Zinco (ambas as regiões), além de Cádmiio (Região 3) e Cobre (Região 2), e para VOR 2: Cádmiio e Zinco (Região 3). Ressalta-se que as regiões 2D e 3 não tiveram influência do rompimento das barragens e as concentrações identificadas estão associadas a contribuições e fontes locais.

O novo modelo adotado para a análise do IRS, desenvolvido por Geoenviron (2023), gerado a partir da avaliação das respostas químicas/físicas da mistura entre rejeitos e sedimentos naturais do rio Paraopeba, considerando diversos graus de mistura entre essas matrizes. Esse estudo realizou a mistura de amostras de rejeitos coletadas dentro da barragem B1 com amostras de sedimentos naturais coletadas a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. As amostras de sedimentos com características químicas naturais foram misturadas com uma amostra composta de rejeitos originais da barragem B1, resultando em amostras com diferentes proporções de rejeitos (entre 0 e 100%). Visando delimitar os campos de domínios de rejeitos e ou sedimentos no diagrama de IRS, foi realizada modelagem computacional contendo simulação de outras classes de mistura. Nessa avaliação, foram considerados novos conjuntos de amostras com características químicas de sedimentos naturais, e que foram misturadas computacionalmente àquelas amostras de rejeito do estudo de mistura (6 amostras individuais e o blend delas) via MATLAB. Baseado na Análise Discriminante, a nova proposta adota quatro linhas divisórias diagonais, as quais dividem o gráfico de dispersão em cinco grupos: 1) área de sedimentos naturais, 2) área de coexistência, 3) área de misturas com predomínio de sedimentos, 4) área de misturas com predomínio de rejeitos e 5) área de rejeitos originais. De acordo com o modelo, no período de estiagem/2023, as amostras de sedimentos de corrente coletados nos pontos das regiões Montante, 1B, 2A e 2C tenderam a se concentrar no campo do Grupo 1, além dos tributários do rio Paraopeba. Já as amostras dos sedimentos dos pontos das regiões Ferro-Carvão, 1A e pontos da sub-bacia do Ferro-Carvão apresentaram maior variação composicional, indo desde o Grupo 5 até o Grupo 1.

A análise integrada indicou baixa associação entre os metais em água superficial e sedimentos para a estiagem/2023. Entretanto, o comportamento dos parâmetros majoritários indicou que, apesar de incrementos pontuais, houve um indicativo de redução das concentrações dos parâmetros de qualidade das águas e sedimentos do rio Paraopeba ao longo do tempo. Na bacia do rio Paraopeba, desde antes do rompimento da barragem, são observadas violações dos analitos majoritários (Manganês, Ferro e Alumínio) e traço (As, Cd, Ni, Cu e Pb), em água superficial e sedimento, entre as regiões Montante e 2B. Com o rompimento da barragem no período chuvoso de 2019, constatou-se um enriquecimento das concentrações dos referidos parâmetros, até a região do reservatório da UHE Retiro Baixo. A partir da estiagem/2019 percebeu-se que, para água superficial, as concentrações dos principais parâmetros se atenuaram com a dissipação das chuvas, redução do nível de água e da Turbidez. Já os sedimentos apresentaram aumento nos analitos até a Região 1B em 2019 e com menores

aumentos na Região 2A, os quais foram seguidos de redução até a estiagem/2022. Somente os trechos com retenção hidráulica, como o trecho Ferro-Carvão e 2B, apresentaram incremento das concentrações de metais, semimetais e fósforo, em decorrência do acúmulo de sedimentos finos. Isso confirmou o indicativo de redução das concentrações dos principais metais associados à assinatura química do rejeito ao longo do tempo e do espaço e a dissipação da Turbidez causada com o rompimento da barragem. Na estiagem/2023, notou-se, de modo geral, que houve manutenção nos padrões de distribuição dos parâmetros nas regiões.

Índice

1. Introdução	24
2. Contextualização da evolução da qualidade da água superficial e dos sedimentos	25
3. Premissas gerais.....	34
3.1. Recorte dos Dados	34
3.2. Planos de Monitoramento	34
3.3. Área de abrangência.....	35
3.4. Caracterização do Rejeito	36
3.5. <i>Baselines</i>	36
3.6. Limites de Quantificação (LQ)	37
3.7. Avaliação QAQC.....	38
3.8. Situação da pluma original	38
3.9. Padrões de qualidade	39
3.10. Avaliações complementares.....	41
4. Caracterização hidrológica.....	42
4.1. Contextualização.....	42
4.2. Rio Paraopeba	46
4.3. Ribeirão Ferro-Carvão	61
4.4. Considerações	64
5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de estiagem tendo em vista o baseline (sazonal) do corpo hídrico	65
5.1. Objetivo	65
5.2. Metodologia	65
5.2.1. Estatística descritiva e inferencial	66
5.2.2. Análise de tendência temporal	68
5.2.3. Mapas temáticos - <i>baseline</i>	71
5.3. Resultados e discussão	72
5.3.1. Análise de Cluster	72
5.3.2. Estatística descritiva e inferencial	74
5.3.3. Análise de tendência temporal	107
5.3.4. Mapas temáticos - <i>baseline</i>	114
5.4. Considerações	119
6. Evolução das violações da água superficial aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba.....	122

6.1. Objetivo	122
6.2. Metodologia	122
6.3. Resultados e discussão	122
6.3.1. Análise de violação aos padrões legais por períodos sazonais de estiagem	122
6.3.2. Mapas temáticos - VMP	139
6.4. Considerações	148
7. Qualidade da água no reservatório de Retiro Baixo e no trecho de jusante na bacia do rio Paraopeba	150
7.1. Objetivo	150
7.2. Metodologia	150
7.3. Resultados e discussão	151
7.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo	151
7.3.2. Comportamento da qualidade da água a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo nos diferentes períodos sazonais	156
7.4. Considerações	161
8. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos	163
8.1. Objetivo	163
8.2. Metodologia	163
8.3. Resultados e discussão	167
8.4. Considerações	181
9. Comportamento na alteração da qualidade hídrica dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais	183
9.1. Objetivo	183
9.2. Metodologia	183
9.3. Resultados e discussão	184
9.3.1. Ribeirão Sarzedo (TT-02)	185
9.3.2. Rio Betim (TT-01)	194
9.3.3. Ribeirão das Abóboras/Grande (TT-05)	202
9.3.4. Ribeirão dos Gomes (CE-01)	211
9.4. Considerações	220
10. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba	223
10.1. Objetivo	223
10.2. Metodologia	223
10.3. Resultados	223
10.4. Considerações	233

11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de estiagem até 2023.....	234
11.1. Objetivo.....	234
11.2. Metodologia.....	234
11.2.1. Análise de cluster.....	234
11.2.2. Método da Estatística descritiva e inferencial.....	234
11.2.3. Análise de tendência temporal.....	235
11.3. Resultados e discussão.....	236
11.3.1. Análise de <i>Cluster</i>	237
11.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial.....	240
11.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann-Kendall.....	304
11.4. Considerações.....	314
12. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2023 ao longo do rio Paraopeba.....	317
12.1. Objetivo.....	317
12.2. Metodologia.....	317
12.3. Resultados e discussão.....	318
12.3.1. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos.....	332
12.4. Considerações.....	356
13. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Índices químicos composicionais, classificação proposta por Geoviron (2023).....	358
13.1. Objetivo.....	358
13.2. Metodologia.....	358
13.3. Análise dos resultados.....	362
13.3.1. Avaliação por período sazonal.....	362
13.4. Considerações.....	373
14. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais.....	377
14.1. Objetivo.....	377
14.2. Metodologia.....	377
14.3. Resultados e discussão.....	378
14.4. Considerações.....	391
15. Referencial Bibliográfico.....	393

Lista de Figuras

Figura 4.1-1 Estações fluviométricas e pluviométricas localizadas na região de interesse.....	43
Figura 4.1-2 Isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba - período 1942 – 2018	44
Figura 4.3-1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores.....	61
Figura 5.2-1 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos)	69
Figura 5.2-2 Série temporal de Manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos)	70
Figura 5.2-3 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais).....	70
Figura 5.3-1 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz água superficial - Todos o período de monitoramento (janeiro/2019 a setembro/2023)	73
Figura 5.3-2 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz água superficial – Último ano hidrológicos (outubro/2022 a setembro/2023).....	73
Figura 5.3-3 Teores de Manganês total: variação do valor máximo em relação ao <i>Baseline</i> nos respectivos períodos de estiagem.	115
Figura 5.3-4 Teores de Ferro dissolvido: variação do valor máximo em relação ao <i>Baseline</i> nos respectivos períodos de estiagem.	116
Figura 5.3-5 Teores de Alumínio dissolvido: variação do valor máximo em relação ao <i>Baseline</i> nos respectivos períodos de estiagem.	117
Figura 5.3-6 Teores de Turbidez: variação do valor máximo em relação ao <i>Baseline</i> nos respectivos períodos de estiagem.	118
Figura 5.3-7 Teores de Fósforo total: variação do valor máximo em relação ao <i>baseline</i> nos respectivos períodos de estiagem.	119
Figura 6.3-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP.....	140
Figura 6.3-2 Mapa de comparação do máximo do <i>baseline</i> de Mn total	141
Figura 6.3-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP	142
Figura 6.3-4 Mapa de comparação do máximo do <i>baseline</i> de Fe dissolvido	143
Figura 6.3-5 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP .	144
Figura 6.3-6 Mapa de comparação do máximo do <i>baseline</i> de Al dissolvido.....	145
Figura 6.3-7 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP.....	146
Figura 6.3-8 Mapa de comparação do máximo do <i>baseline</i> de Turbidez ₀ ,	147
Figura 8.2-1 Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água.....	166

Figura 11.3-1 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Todo o período de monitoramento (janeiro/2019 a setembro/2023).	238
Figura 11.3-2 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Último ano hidrológico (outubro/2022 a setembro/2023) sem os pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48.	239
Figura 11.3-3 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Último ano hidrológico (outubro/2022 a setembro/2023) com os pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48.	240
Figura 12.3-1 Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.	335
Figura 12.3-2 Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem /2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	336
Figura 12.3-3 Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	338
Figura 12.3-4 Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	341
Figura 12.3-5 Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	343
Figura 12.3-6 Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	345
Figura 12.3-7 Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	347
Figura 12.3-8 Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	350
Figura 12.3-9 Evolução do Cádmio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023	352
Figura 12.3.12.3-10 Evolução do Fósforo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.	354
Figura 12.3.12.3-11 Evolução do Zinco nos sedimentos nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.	355
Figura 13.2-1 Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, contendo as porcentagens de ocorrência de Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂ nos rejeitos e sedimentos naturais.	358
Figura 13.2-2 <i>Boxplot</i> de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis (2020a).	359
Figura 13.2-3 Proposta de separação dos campos composicionais por meio de linhas diagonais (GEOENVIRON, 2023).	361
Figura 13.3.1-1 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019.	363

Figura 13.3.1-2 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2019.....	364
Figura 13.3.1-3 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020.....	365
Figura 13.3.1-4 Avaliação no enquadramento da proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 da Geoviron (2023) nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2020.....	366
Figura 13.3.1-5 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021.....	367
Figura 13.3.1-6 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2021.....	368
Figura 13.3.1-7 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022.....	369
Figura 13.3.1-8 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2022.....	370
Figura 13.3.1-9 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS1 e IRS2 nas regiões Montante a 2C no período de chuva de 2022/2023.....	371
Figura 13.3.1-10 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2023.....	373
Figura 13.4-1 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo de todos os períodos sazonais analisados.....	376

Lista de Gráficos

Gráfico 4.2-1 Total precipitado mensal (mm) para as estações Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante e médias mensais históricas de precipitações das estações de referência.....	48
Gráfico 4.2-2 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.....	51
Gráfico 4.2-3 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Belo Vale.....	54
Gráfico 4.2-4 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Alberto Flores.....	54
Gráfico 4.2-5 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Ponte Nova do Paraopeba.....	55
Gráfico 4.2-6 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba.....	55

Gráfico 4.2-7 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Montante 56

Gráfico 4.2-8 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Jusante 56

Gráfico 4.2-9 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação AUT_JRB-01 57

Gráfico 4.2-10 Operação da UHE Retiro Baixo nos períodos de estiagem tendo em vista as vazões vertidas, turbinadas e defluentes 60

Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem de 2020 a 2023 62

Gráfico 4.3-2 Total precipitado mensal (mm) para as estações B-VI, Córrego do Feijão, Tijuco e AUT-MD e médias mensais históricas de precipitações da estação Melo Franco..... 63

Gráfico 5.3.2.1-1 *Boxplots* Manganês total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa 76

Gráfico 5.3.2.1-2 *Boxplots* Manganês total para os períodos de estiagem *baseline* estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável. 76

Gráfico 5.3.2.1-3 *Boxplots* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa. 79

Gráfico 5.3.2.1-4 *Boxplots* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável..... 79

Gráfico 5.3.2.2-1 *Boxplots* Ferro total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa 85

Gráfico 5.3.2.2-2 *Boxplots* Ferro total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável 85

Gráfico 5.3.2.2-3 *Boxplots* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa 88

Gráfico 5.3.2.2-4 *Boxplots* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável 88

Gráfico 5.3.2.3-1 *Boxplots* Alumínio total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa 93

Gráfico 5.3.2.3-2 *Boxplots* Alumínio total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável 93

Gráfico 5.3.2.3-3 *Boxplots* Alumínio dissolvido para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa..... 96

Gráfico 5.3.2.3-4 <i>Boxplots</i> Alumínio dissolvido para períodos de estiagem <i>baseline</i> , estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável	96
Gráfico 5.3.2.4-1 <i>Boxplots</i> Turbidez para períodos de estiagem <i>baseline</i> , estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa	100
Gráfico 5.3.2.4-2 <i>Boxplots</i> Turbidez para períodos de estiagem <i>baseline</i> , estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável	100
Gráfico 5.3.2.5-1 <i>Boxplots</i> Fósforo total para períodos de estiagem <i>baseline</i> , estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa	104
Gráfico 5.3.2.5-2 <i>Boxplots</i> Fósforo total para períodos de estiagem <i>baseline</i> , estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável	104
Gráfico 7.3.1-1 Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02	152
Gráfico 7.3.1-2 Diagrama da variação de Oxigênio dissolvido (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02	152
Gráfico 7.3.1-3 Diagrama da variação de Manganês total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.....	153
Gráfico 7.3.1-4 Diagrama da variação de Ferro total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02	153
Gráfico 7.3.1-5 Diagrama da variação de Alumínio total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.....	154
Gráfico 7.3.1-6 Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de estiagem/2023.....	155
Gráfico 7.3.2-1 <i>Boxplots</i> dos resultados de Al dissolvido dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.....	157
Gráfico 7.3.2-2 <i>Boxplot</i> dos resultados de Fe dissolvido dos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	158
Gráfico 7.3.2-3 <i>Boxplot</i> dos resultados de Mn total dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	159
Gráfico 7.3.2-4 <i>Boxplot</i> dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	160
Gráfico 7.3.2-5 <i>Boxplot</i> dos resultados de Fósforo total dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.....	161

Gráfico 8.3-1 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MD e AUT-JD) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) – gráfico dispersão e correlação de Pearson	170
Gráfico 8.3-2 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CB, AUT-MTI e AUT-CPM_ATIVA) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) - gráfico dispersão e correlação de Pearson	171
Gráfico 8.3-3 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CPM_Ativa, AUT-CP e AUT-MRB-01) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson	172
Gráfico 8.3-4 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MRB-01, AUT-JRB-01 e UMF-TM-05) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19, JRB-01 e TM-05) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson	173
Gráfico 8.3-5 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	176
Gráfico 8.3-6 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	177
Gráfico 8.3-7 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	178
Gráfico 8.3-8 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	179
Gráfico 9.3.1-1 Percentuais de violações nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no ribeirão Sarzedo (TT-02) e para pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) no rio Paraopeba.....	185
Gráfico 9.3.1-2 <i>Boxplots</i> para os parâmetros referentes ao ribeirão Sarzedo (TT-02).....	191
Gráfico 9.3.2-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no TT-01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	194
Gráfico 9.3.2-2 <i>Boxplots</i> para os parâmetros referentes ao rio Betim (TT-01).	200
Gráfico 9.3.3-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no TT-05 (ribeirão das Abóboras/Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	203
Gráfico 9.3.3-2 <i>Boxplots</i> - TT05.....	209

Gráfico 9.3.4-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	212
Gráfico 9.3.4-2 <i>Boxplots</i> - CE-01	218
Gráfico 10.3-1 Variação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019.	228
Gráfico 10.3-2 Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020.	229
Gráfico 10.3-3 Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021.	230
Gráfico 10.3-4 Variação granulométrica no período de abril/2022 a setembro/2022.	231
Gráfico 10.3-5 Variação granulométrica no período de abril/2023 a setembro/2023.	232
Gráfico 11.3.2.1-1 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	245
Gráfico 11.3.2.1-2 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	245
Gráfico 11.3.2.1-3 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	252
Gráfico 11.3.2.1-4 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	252
Gráfico 11.3.2.1-5 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	258
Gráfico 11.3.2.1-6 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	258
Gráfico 11.3.2.2-1 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	265
Gráfico 11.3.2.2-2 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	265
Gráfico 11.3.2.2-3 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	271
Gráfico 11.3.2.2-4 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	271
Gráfico 11.3.2.2-5 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	277
Gráfico 11.3.2.2-6 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	277
Gráfico 11.3.2.2-7 Variação do Cádmiio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período	283
Gráfico 11.3.2.2-8 Variação do Cádmiio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	283

Gráfico 11.3.2.2-9 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	289
Gráfico 11.3.2.2-10 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	289
Gráfico 11.3.2.2-11 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	295
Gráfico 11.3.2.2-12 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	295
Gráfico 11.3.2.3-1 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos <i>outliers</i> do período.	301
Gráfico 11.3.2.3-2 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.	301
Gráfico 14.3-1 Distribuição granulométrica de silte e argila dos sedimentos do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada <i>gam</i>.	381
Gráfico 14.3-2 Distribuição de metais nos sedimentos do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada <i>gam</i>	384
Gráfico 14.3-3 Distribuição de metais na água superficial do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem/2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada <i>gam</i>.	387
Gráfico 14.3-4 Distribuição de diferentes parâmetros relacionados aos rejeitos nas matrizes de água superficial (azul) e sedimento (vermelho) do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada <i>gam</i>.	390

Lista de Tabelas

Tabela 3.2-1 Tabela resumo das alterações do plano de monitoramento PME.....	35
Tabela 3.5-1 - Regiões e pontos analisados frente às violações aos limites legais.	36
Tabela 3.5-2 - Tributários, pontos do IGAM <i>baseline</i> e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba.....	37
Tabela 3.8-1 Datas da passagem da Pluma de Turbidez.....	39
Tabela 4.1-1 Estações hidrometeorológicas localizadas na região do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba.....	42
Tabela 4.1-2 Vazões médias mensais, $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{mlt} (m^3/s) na calha principal do rio Paraopeba	45
Tabela 4.2-1 Estações de referência para a avaliação dos registros hidrométricos.	46
Tabela 5.3.2.1-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês total.....	77
Tabela 5.3.2.1-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região.	78
Tabela 5.3.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês dissolvido.....	80
Tabela 5.3.2.1-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região.....	81
Tabela 5.3.2.2-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro total	86
Tabela 5.3.2.2-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região.....	87
Tabela 5.3.2.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro dissolvido	89
Tabela 5.3.2.2-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região	90
Tabela 5.3.2.3-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio total	94
Tabela 5.3.2.3-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região.....	95

Tabela 5.3.2.3-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio dissolvido	97
Tabela 5.3.2.3-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região.....	98
Tabela 5.3.2.4-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Turbidez	101
Tabela 5.3.2.4-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Turbidez em cada região	102
Tabela 5.3.2.5-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Fósforo total.	105
Tabela 5.3.2.5-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.....	106
Tabela 5.3.2.5-1 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) – medianas mensais.....	110
Tabela 6.3.1-1 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Montante.....	123
Tabela 6.3.1-2 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023– Ferro Carvão	123
Tabela 6.3.1-3 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 1A	123
Tabela 6.3.1-4 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 1B	123
Tabela 6.3.1-5 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2A	123
Tabela 6.3.1-6 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2B	123
Tabela 6.3.1-7 Parâmetros violados <i>baseline</i> IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2C	123
Tabela 6.3.1-8 Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco no período de estiagem/2023	131
Tabela 8.2-1 - Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos	164
Tabela 8.2-2 -Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão	165

Tabela 8.2-3 - Data de início das operações de cada estação telemétrica.....	166
Tabela 8.3-1 - Resultados de R ² para as relações de Turbidez com a fração dissolvida dos metais	168
Tabela 8.3-2 - Resultados de R ² das relações de Turbidez com as frações totais dos metais traçadores	169
Tabela 9.2-1 Tributários e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba	184
Tabela 9.3.1-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo	193
Tabela 9.3.2-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim.....	202
Tabela 9.3.3-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras.....	211
Tabela 9.3.4-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes.....	220
Tabela 11.3.2.1-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês.....	246
Tabela 11.3.2.1-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês em cada região.....	247
Tabela 11.3.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro	253
Tabela 11.3.2.1-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro em cada região.....	254
Tabela 11.3.2.1-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio.....	259
Tabela 11.3.2.1-6 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio em cada região.....	260
Tabela 11.3.2.2-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Chumbo.....	266
Tabela 11.3.2.2-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo em cada região.....	267
Tabela 11.3.2.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cobre.....	272
Tabela 11.3.2.2-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cobre em cada região.....	273

Tabela 11.3.2.2-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Níquel.	278
Tabela 11.3.2.2-6 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Níquel em cada região.	279
Tabela 11.3.2.2-7 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cádmiu.	284
Tabela 11.3.2.2-8 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cádmiu em cada região.	285
Tabela 11.3.2.2-9 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Arsênio.	290
Tabela 11.3.2.2-10 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Arsênio em cada região.	291
Tabela 11.3.2.2-11 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cromo.	296
Tabela 11.3.2.2-12 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cromo em cada região.	297
Tabela 11.3.2.3-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Fósforo.	302
Tabela 11.3.2.3-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo em cada região.	303
Tabela 11.3.3-1 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade de sedimentos para a série completa de dados (todos os períodos sazonais, desde 25/01/2019 até 30/09/2023) – medianas mensais.	305
Tabela 11.3.3-2 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da sedimentos para a série de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) – medianas mensais.	306
Tabela 12.3-1 Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 ou dos valores propostos por Vicq (2015) para a estiagem/2023.	319
Tabela 12.3-2 Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/12 para a estiagem/2023.	320
Tabela 12.3-3 Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/12 e dos valores de Vicq (2015) para os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 entre as regiões de Montante a 2C.	322

Lista de Anexos

- ANEXO I - Plano de Monitoramento
- ANEXO II - Caracterização geral da área de estudo
- ANEXO III - Garantia e Controle de Qualidade – QAQC
- ANEXO IV - Análise da qualidade da água superficial e sedimentos nos tributários, ribeirão Ferro-Carvão e nas regiões 2D e 3
 - ANEXO IV-A - Análises da qualidade da água superficial e sedimentos nas regiões 2D e 3
 - ANEXO IV-B - Análises da qualidade da água superficial e sedimentos dos tributários Paraopeba e ribeirão Ferro-Carvão
- ANEXO V - Concentrações máximas dos parâmetros nos pontos de captação
- ANEXO VI - Tabelas de variação de concentração
- ANEXO VII - Gráficos *boxplots* Paraopeba, Tabelas de estatísticas descritivas, resultados dos testes estatísticos
 - ANEXO VII A - *Boxplots* rio Paraopeba
 - ANEXO VII B - Tabelas de estatísticas descritivas
 - ANEXO VII C - Resultados dos testes estatísticos
- ANEXO VIII - Mapas temáticos da bacia
 - ANEXO VIII A - Mapas *baseline*
 - ANEXO VIII B - Mapas VMP
 - ANEXO VIII C - Tabelas de frequência de aproximação de *baseline*
- ANEXO IX – Cálculos de resíduos e representação em *boxplots*
- ANEXO X – *Boxplots* Tributários
- ANEXO XI - Mapas de Sedimentos

1. Introdução

A Arcadis Logos S.A. (Arcadis Brasil) foi designada pela Vale S.A. (Vale) para prestar assessoria no processo de armazenamento em banco de dados, validação e avaliação dos resultados analíticos preconizados no “Plano de Monitoramento Emergencial da Qualidade da Água e Sedimento (Plano Emergencial)”. A execução deste plano teve início em 25/01/2019 e tem sido regularmente atualizada conforme necessidades específicas. A versão mais recente do plano, denominada v.28 e relativa ao período chuvoso, foi protocolada em 29/09/2023. No entanto, este relatório, relacionado ao período de estiagem/2023, baseia-se na versão v.27, protocolada no dia 29/03/2023, por meio da Carta C.EXT.0335/2023.

Neste contexto, este documento oferece uma análise sistêmica da evolução dos resultados analíticos da qualidade da água e dos sedimentos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, estendendo-se desde a área de montante e da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, onde ocorreu o rompimento no rio Paraopeba a jusante do córrego Lagoa Grande, até a jusante do reservatório de Três Marias, na confluência entre rio São Francisco e rio Abaeté. O objetivo é analisar as alterações nos resultados analíticos em comparação com as concentrações de referência (*baseline*) dos dados históricos da região, durante o período entre janeiro/2019 e setembro/2023, com ênfase nos períodos sazonais de estiagem e pautado nas legislações pertinentes, fazendo-se uso, ademais, de análises estatísticas diversas de acordo com a necessidade.

Assim, o relatório interpreta, e, por vezes, propõe hipóteses sobre a influência do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, além dos fatores externos, nas alterações específicas na qualidade da água e dos sedimentos. Para tanto, toda a área de monitoramento foi dividida em trechos/regiões, nos quais se desenvolve uma caracterização hidrológica no tempo e espaço. Além disso, são construídas avaliações inferenciais fundamentadas em métodos estatísticos que permitem avaliar as alterações de qualidade da água e dos sedimentos, também espacial e temporalmente. Isso inclui a evolução das violações de acordo com os respectivos padrões de qualidade, tanto no curso hídrico principal, o rio Paraopeba, quanto em seus principais tributários.

2. Contextualização da evolução da qualidade da água superficial e dos sedimentos

A presente contextualização, a respeito da evolução da qualidade da água superficial e dos sedimentos, baseia-se em um conjunto substancial de resultados materializados em relatórios protocolados nos órgãos de controle ambiental e que subsidiaram as avaliações ora realizadas no presente estudo.

Dessa forma, no período considerado emergencial, a pluma de turbidez e os analitos Manganês e Ferro foram os parâmetros indicadores que melhor definiram seu deslocamento no rio Paraopeba em decorrência de suas persistências ao longo do tempo e do espaço. O Alumínio também acompanhou a pluma, porém, à medida que se afastou da região do rompimento, inserida no Quadrilátero Ferrífero, e avançou em direção a terrenos metassedimentares do Supergrupo Minas (Grupo Bambuí), sua concentração natural (*baseline*) aumentou e camuflou seu comportamento, caracterizando-o como um indicador secundário.

Por solicitação da equipe da AECOM, o parâmetro Fósforo foi adicionado às avaliações em detalhe da qualidade das águas e sedimentos, devido ao fato de ter sido observado, após o rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, aumento dos teores de Fósforo (água e sedimento) nas regiões Ferro-Carvão até 1B e em 2B, conforme discutido em Arcadis (2022c), tais teores sofreram redução a partir de 2019, com variações ao longo dos diferentes períodos sazonais avaliados. O estudo GEOENVIRON (2019) apontou a presença de Fósforo no rejeito em baixos teores, assim como verificado no estudo de Arcadis (2020), sobre a caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba. Ainda, por meio do PROJETO ENTIRE (2023), através da modelagem de Fósforo em água superficial observou-se que a carga de Fósforo total aumentou em níveis acima da condição pré-rompimento, da região de Montante até próximo a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo Jusante, sendo as maiores cargas de Fósforo observadas a partir da Região 2A. Esse comportamento de aumento gradual ao longo das regiões também é verificado para a vazão, na qual é observada incremento ao longo da bacia do rio Paraopeba, assim como quando comparado os resultados pré e pós rompimento, e isso, em função do aumento pluviométrico evidenciado no decorrer dos anos.

Para água superficial, não foi possível associar diretamente a elevação das concentrações de Fósforo total apenas às contribuições do rejeito, em função de outros fatores inerentes ao uso e ocupação do solo e controle geológico da região onde a bacia está inserida. Do mesmo modo, não foi possível estabelecer uma relação direta com o aumento das concentrações de Fósforo dissolvido nas áreas impactadas pelo rejeito, visto que os resultados do monitoramento apontaram baixa variabilidade, bem como reduzidas concentrações de Fósforo dissolvido na região do Ferro-Carvão (mais afetada), inclusive se comparado à região de Montante.

Apesar das considerações supracitadas, para atendimento da solicitação da auditoria, no presente relatório, foi realizada complementarmente uma avaliação espaço-temporal para este parâmetro, tanto para a matriz água superficial quanto para sedimentos.

Ressalta-se que, o trecho entre as regiões Montante até a 2A apresentam característica geogênica de abundância de Manganês total e Ferro total presentes nas águas do rio Paraopeba, fato que já ocorria previamente à chegada da pluma. À medida que a pluma de turbidez, com os materiais em suspensão provenientes do rompimento da barragem, deslocou-se para jusante no rio Paraopeba em 2019, constatou-se enriquecimento das concentrações dos referidos parâmetros, evidenciado até o ponto PT-21, na região do reservatório da UHE Retiro Baixo. As condições de baixas velocidades (lênticas), associadas ao elevado fator de diluição e dispersão observados nesse ambiente resultaram na diminuição das concentrações mencionadas, sem que houvesse mudanças significativas nos valores desses parâmetros além do ponto de monitoramento PT-21. A partir da terceira semana de maio/2019, este ponto atingiu as condições de *baseline* na água, estabelecendo-se, assim, o limite da região afetada pela pluma. Já em relação à evolução dos sedimentos, a chuva/2019 registrou concentrações elevadas para Mn, Fe, Pb, Ni, Cu, e maiores que os ciclos de chuvas posteriores, demonstrando que houve uma maior quantidade de materiais transportados por arraste e/ou suspensão e depositados, principalmente, nas regiões 1A e 1B (até PT-15), em decorrência da contribuição do rejeito oriundo do rompimento das barragens B1, B4 e B4-A.

A partir de maio/2019, as concentrações dos principais elementos traçadores em águas, ao longo do rio Paraopeba, começaram a apresentar reduções mais pronunciadas quando comparadas aos meses anteriores (período chuvoso de 2019). Esta característica se consolida nos meses seguintes, confirmando a indicação de redução nas concentrações dos principais metais (i.e. Ferro e Manganês em ambas as frações) associados à assinatura química do rejeito ao longo do tempo e do espaço, dissipação da pluma de turbidez e, com o avanço dos dois ciclos hidrológicos, percebeu-se persistência na redução das concentrações dos analitos, indicando maior proximidade às condições de *baseline* do rio. Vale ressaltar que precipitações esporádicas que ocorreram no período de estiagem/2019 alteraram pontualmente o comportamento dos teores destes elementos, como foi notado em maio e em setembro/2019 no rio Paraopeba.

É importante destacar, ainda, que apesar de toda a atenuação observada no período de estiagem, o reservatório da UHE Retiro Baixo foi submetido em junho/2019 ao fenômeno de desestratificação térmica e de circulação vertical da massa d'água. Assim, apesar do Ferro total se manter em concentrações mais baixas, o Manganês total aumentou seus teores, promovendo alterações em pontos localizados prontamente a jusante da usina. De toda forma, durante os meses de estiagem/2019, a pluma que ficara contida no reservatório da UHE Retiro Baixo se dissipou em função de sedimentação e diluição, estendendo tal comportamento ao longo do rio Paraopeba nos trechos de montante. Tal condição pôde ser verificada, principalmente, para os meses de julho a setembro/2019, cujos teores da maior parte dos

parâmetros, também, retomaram condições similares ao *baseline* sazonal do IGAM assumido para cada trecho fluvial.

Com relação aos sedimentos na estiagem/2019, enquanto as concentrações dos metais e a Turbidez da água se dissiparam, as deposições de sedimentos contendo Mn, Pb, Ni, Cu aumentaram nas regiões 1A e 1B, sendo reflexo da redução da vazão/velocidade do rio e favorecimento da deposição de sedimentos provenientes de áreas da bacia do rio Paraopeba e de sedimentos com rejeitos da barragem B1. Na Região 2A, houve redução das concentrações dos elementos químicos com algumas ocorrências de aumentos pontuais para Mn, Fe, Ni, Cu, Pb e Zn, possivelmente em função de chuvas esporádicas ou eventos outros de origem antropogênicas regionais. Nas regiões 2B e 2C, por outro lado, não se observaram aumentos na estiagem/2019. Importante destacar que todos esses elementos estavam presentes na bacia antes mesmo do rompimento das barragens e já haviam sido mapeados pela CPRM durante 2008 e 2009 (CPRM, 2018; 2019; ARCADIS, 2020c), com as regiões 1B e início da 2A registrando as maiores concentrações para a maioria dos metais. Já o AI apresentou concentrações mais elevadas na porção centro-norte da bacia, haja vista as características litológicas regionais contendo metassedimentos do Grupo Bambuí e granitoides sin- a tardi-tectônicos, bem como rochas granitoides do Complexo Belo Horizonte, além dos solos, que possuem alumínio em sua composição e, ao serem intemperizados/erodidos podem liberar partículas físicas ou substâncias químicas em solução contendo alumínio e estes se depositarem nos sedimentos.

Na sequência temporal, o período chuvoso de 2019/2020 foi marcado pelo aumento das precipitações e vazões, configurando-se uma nova condição de alteração da qualidade da água com características que abrangeram a combinação de fatores que compreenderam aspectos sazonais (chuva e vazões) e carreamento/ressuspensão de material ao longo do rio Paraopeba. Assim, com as chuvas mais abundantes, a partir do mês de novembro/2019, o comportamento dos parâmetros apresentou progressivos incrementos em seus teores, principalmente no trecho não afetado (montante) e nos trechos mais afastados do rompimento. Essa característica pode estar tanto associada às condições de *baseline* típico do período sazonal chuvoso na bacia, quanto dos potenciais ressuspensões das deposições de rejeito ao longo do rio Paraopeba. Cabe ressaltar, ademais, que as chuvas se intensificaram expressivamente para os meses de janeiro e fevereiro/2020, resultando em aumentos das concentrações dos parâmetros de qualidade das águas superficiais.

A bacia hidrográfica e a extensão do leito do rio Paraopeba como um todo, estiveram, assim, submetidas entre outubro/2019 e março/2020 a uma condição de chuvas e vazões em uma ordem de grandeza superior ao período chuvoso anterior, que compreendeu o período crítico e emergencial (janeiro a março/2019). Essa condição hidrológica mais severa implicou em alterações de qualidade da água que não apenas estiveram associadas aos rejeitos depositados na calha do rio, e mais evidentes nos trechos próximos à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, mas também aos arrastes hidráulicos (escoamento superficial) de

materiais da área de drenagem da bacia como um todo, uma vez que se perceberam alterações com padrões similares, inclusive, no trecho de montante e não afetado pelo rompimento.

Ao analisar os sedimentos de fundo e comparar o período de chuvas de 2019/2020 com o de 2019, constatou-se que houve variações notáveis em todos os parâmetros analisados. Estas variações foram significativamente menores ou maiores durante o período de 2019/2020. No entanto, especificamente para o parâmetro Cobre, não se observaram diferenças significativamente maiores entre estes períodos. Em algumas medições, as diferenças foram significativamente menores ou até inexistentes em termos de variações nas concentrações. Neste período, e semelhante aos anteriores, as regiões 1A e 1B mantiveram os maiores teores dos metais no rio Paraopeba. Para o Al, as concentrações dessa área continuaram menores, quando comparados aos trechos entre as regiões 2A (porção central) e 2B. Essa alteração indicou possibilidade de ressuspensão e mistura de sedimentos no novo ciclo de chuva, podendo, eventualmente, transpor sedimentos mais antigos sobre os mais novos. Durante esse período sazonal, observou-se uma redução nos índices IRS 1 e IRS 2 em toda a bacia, conforme relatado pela (ARCADIS, 2021a). Essa diminuição foi notada inclusive nas amostras coletadas no trecho entre a confluência do Ferro-Carvão e o rio Paraopeba até a Região 1B. Apesar dessa redução, as amostras dessa área ainda apresentaram características químicas composicionais típicas de rejeito. No entanto, após o ponto PT-15, a característica do sedimento foi classificada como natural.

Ao final de março/2020, último mês do período chuvoso, percebeu-se redução natural das precipitações e das vazões e, assim, uma atenuação progressiva dos teores dos analitos marcadores quando comparados aos meses anteriores desse período sazonal. Os referidos parâmetros são aqueles principalmente associados a materiais sólidos suspensos, turbidez, cor e metais mais característicos da bacia (Manganês, Ferro e Alumínio). Este comportamento se estendeu entre os meses de abril a setembro/2020. Dessa maneira, ao longo dos meses de estiagem/2020, verificou-se, mais uma vez, atenuação dos teores dos parâmetros, tendo em vista a redução das chuvas observadas no período, com a retomada de condições mais aproximadas com o mesmo período sazonal de 2019. Cabe ressaltar que, a partir do mês de março/2020 (20/03/2020), as amostragens passaram a ser realizadas semanalmente devido à adequação estrutural de trabalho ocasionada em decorrência da pandemia de COVID-19 e, portanto, a quantidade de resultados foi inferior aos meses anteriores reportados quando as amostragens ainda eram realizadas diariamente.

No mesmo período, para os sedimentos, quando comparado com a estiagem/2019, percebeu-se que houve redução nas concentrações de Manganês até o PT-15 e os demais trechos a jusante se mantiveram com concentrações próximas. Já para os analitos Ferro e Alumínio, observou-se aumento em toda a bacia nesta comparação. Para Níquel, Cobre, Arsênio e Chumbo, aumentos pontuais foram observados, ou seja, associados a algum local específico da bacia. No caso da comparação dos resultados dessas duas estações, é importante ter em consideração que, desde agosto/2020, os sedimentos passaram a ser coletados em margem

de rio onde há predomínio de sedimentos finos (silte e argila), enquanto em 2019, eram amostrados majoritariamente em centro de rio, com predominância de sedimentos mais arenosos.

Já no período chuvoso (2020/2021), as condições hidrológicas (precipitações e vazões) se encontraram, relativamente, em ordem de grandeza compreendida entre o recorte de 2019 e o período de 2019/2020. Ressalta-se, também, que, no dia 17/03/2021, por estabelecimento interno da Vale, a amostragem de todos os pontos de monitoramento no leito do rio Paraopeba e Tributários foi interrompida por um período de 33 dias devido à Fase Roxa para combate ao COVID-19. Os resultados, de maneira geral, indicaram as elevações esperadas para o período de chuvas, mas em ordem de grandeza aproximada com os mesmos períodos sazonais chuvosos anteriores.

Com relação aos sedimentos, o ciclo de chuva 2020/2021 foi o que apresentou as menores concentrações dos metais Mn, Fe, Pb, Cu, Ni, As, quando comparados com o ciclo de 2019, sendo relativamente menor quando comparado com o ciclo de 2019/2020. A identificação de concentrações maiores de metais em relação ao período anterior foi predominante na Região 2A. A alternância de posições para as margens indicou aumentos nas concentrações de alguns metais (Ni, Cu, Mn, Al, As), haja vista que nestas localidades, a textura dos sedimentos é mais fina e a adsorção de metais tende a ser maior. Nas regiões 1A e 1B, a mudança na posição de amostragem teve um reflexo menor porque esses foram os locais mais afetados pelo rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A.

Sequencialmente, o período de estiagem/2021 foi marcado por uma redução da pluviosidade em relação ao período de estiagem anterior. Com a diminuição das chuvas na bacia do rio Paraopeba, aliada às reduções dos níveis/vazões fluviais e escoamento superficial, houve nova fase de dissipação de materiais em suspensão e conseqüente redução nas concentrações de metais em águas e sedimentos, incluindo as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total se comparados aos períodos anteriores. Já para as frações dissolvidas de Ferro e Alumínio, até a Região 1B, em geral, perceberam-se concentrações mais elevadas, podendo ser reflexo de alterações de condições físico-químicas que alcançaram a bacia do Paraopeba e promoveram solubilização de fases minerais. Os teores de Turbidez e dos elementos traços foram predominantemente reduzidos e dissipados neste período. Para sedimentos, verificou-se redução para Manganês e Ferro nas regiões mais ou parcialmente afetadas entre as estiagens de 2020 com 2021; e para Alumínio não se observaram variações nas regiões do Ferro-Carvão e na 1A, enquanto para os demais parâmetros traço, a predominância foi de manutenção ou redução das concentrações.

O período de chuvas 2021/2022 foi marcado, por sua vez, por chuvas mais intensas que ocorreram em maior monta desde o mês de outubro/2021, especialmente nas porções média e alta da bacia do rio Paraopeba, o que proporcionou efeitos de arraste, ressuspensão e outros aspectos desde o início do referido período. Destaque pode ser dado para as precipitações que ocorreram principalmente no mês de janeiro/2022 que atingiram um patamar ainda maior que

nos períodos chuvosos anteriores nas estações do Alto e Médio Paraopeba. Apesar dessa condição pluviométrica, no que diz respeito à qualidade da água, não foram observados comportamentos muito distintos dos já observados nos períodos de chuvas pretéritos (2019, 2019/2020 e 2020/2021) para os parâmetros majoritários, principalmente na fração total. Enquanto para as frações dissolvidas, especificamente de Ferro e de Alumínio, foi indicado aumento sucessivo das concentrações nas regiões, inclusive em montante, ao se compararem os períodos chuvosos entre si. No tocante aos parâmetros traço, no período de chuva 2021/2022, em água superficial, o comportamento observado, de maneira geral, foi de manutenção e aumento pouco expressivo nas concentrações para algumas regiões quando se compara aos períodos chuvosos dos anos anteriores. Com relação aos sedimentos de fundo, o ciclo de chuva 2021/2022 também não apontou comportamento diferente dos já observados nos períodos de chuva antecedentes.

Em relação ao período de estiagem/2022, este se caracterizou por um novo estágio de diminuição da pluviosidade, dos níveis/vazões fluviais e escoamento superficial para a bacia. Foi possível perceber, no entanto, que a fase de recessão hidrológica geralmente típica desse período apresentou um retardamento, reverberando ainda níveis e vazões mais elevadas nos primeiros meses da estiagem. Dessa forma, esta fase, que sucedeu um período de intensas precipitações, foi marcada por um aumento das concentrações dos parâmetros majoritários na fração total, principalmente quando comparadas com o mesmo período de 2021, porém permaneceram, ainda, inferiores ao período de estiagem/2019 na região mais impactada do ribeirão Ferro Carvão. Os teores de Turbidez, também, mostraram aumento considerável dos valores em relação à estiagem/2021. As frações dissolvidas de ferro e alumínio, em geral, mostraram concentrações mais elevadas principalmente até Região 1B. Contudo, esse padrão ocorreu ao longo de toda a bacia, incluindo a Região Montante, o que pode ser reflexo de alterações de condições físico-químicas que alcançam a bacia do rio Paraopeba e promovem solubilização de fases minerais. O Fósforo (total e dissolvido), de forma geral, mostrou aumento dos valores em relação à estiagem/2021, incluindo as regiões Montante e as impactadas pelo rompimento, o que pode indicar contribuição do período chuvoso anterior e aporte por outras fontes. Isso porque, neste último período, também houve elevação para os demais parâmetros analisados. Os teores dos elementos traço se mantiveram aproximados a ligeiramente maiores em 2022 quando comparados com a estiagem/2021, salvo oscilações pontuais entre as regiões. Por fim, reforça-se que as diferenças nas concentrações entre os períodos de estiagem/2021 e 2022 ocorreram, principalmente, em decorrência da influência das precipitações no sistema, em especial das chuvas intensas do período de 2021/2022.

Os sedimentos na estiagem/2022, de forma geral, mostraram diminuição nas concentrações dos metais em relação aos períodos de estiagem anteriores, com exceção da região do ribeirão Ferro-Carvão. Esta região mostrou aumento na concentração de metais, enquanto a Região 1B evidenciou diminuição, o que indica as diferentes condições sedimentológicas associadas à bacia do rio Paraopeba. Em relação aos elementos majoritários, entre as estiagens de 2021 com 2022: o Mn mostrou aumento, enquanto Fe, redução entre as regiões Ferro-Carvão e 1B;

já o AI, apresentou manutenção dos teores na Região Ferro-Carvão e leve redução até Região 1B. O Fósforo, de modo geral, mostrou valores baixos, com manutenção ou redução dos valores em relação à estiagem/2021, incluindo as regiões Montante e as impactadas pelo rompimento. Para os demais parâmetros traço, a predominância foi de manutenção ou redução das concentrações para a maioria das regiões, com exceção da Região Ferro-Carvão. O aumento das concentrações de metais pode estar relacionado à influência das precipitações antecedentes, principalmente a de 2021/2022, com deságue elevado do rio ainda nos meses iniciais do período de estiagem. Nesse sentido, as precipitações favoreceram o aporte e carreamento de sedimentos e metais para o sistema, além de erosões (marginais e de canal) com remobilização de materiais anteriormente depositados. Os teores mais elevados de metais e aumento nas concentrações ao longo do tempo, na Região Ferro-Carvão, associa-se principalmente ao represamento da drenagem na região. Da mesma forma, a Região 2B, do reservatório de Retiro Baixo, mostrou características parecidas. Por fim, reforça-se que as diferenças nas concentrações entre os períodos de estiagem de 2021 e 2022 deram-se, principalmente, em decorrência da influência das precipitações no canal fluvial, em especial das chuvas intensas de 2021/2022, que acabou por influenciar a dinâmica morfológica e sedimentológica do rio.

No que diz respeito ao período chuvoso de 2022/2023 (outubro/2022 a março/2023) foi, de modo geral, marcado por uma distribuição desigual das precipitações ao longo da bacia do rio Paraopeba, com chuvas em maiores volumes na porção mais a montante e central e redução nas porções mais distais e mais baixas. Apesar de terem ocorrido alguns eventos mais críticos, principalmente durante o mês de janeiro, observando-se o acumulado total do período, percebeu-se que as chuvas foram menos volumosas, em geral, quando comparadas ao período chuvoso 2021/2022.

Verifica-se, dessa maneira, que a bacia e, especificamente, o rio Paraopeba passaram por condições hidrológicamente críticas, muito embora opostas, em vários períodos e que foram determinantes para o aporte de materiais sólidos oriundos de várias fontes (barragem de rejeitos e bacia). Não se pode assegurar que houve dispersão completa desse material ao longo das condições apontadas, tendo em vista a morfologia do corpo hídrico, as estruturas artificiais de contenção existentes em seu leito e sua capacidade de arraste, mas, sim, o acúmulo sucessivo de materiais de naturezas diversas no perfil longitudinal do canal fluvial entre os períodos distintos (ARCADIS, 2020c).

Ao analisar o período de estiagem/2023, constata-se, de maneira global, que os índices pluviométricos apresentaram elevação em comparação com a estiagem/2022. Os maiores registros foram predominantemente nas partes mais a montante e central da bacia. Em particular, o mês de abril/2023 se destacou, registrando os acumulados mais significativos durante todo o período de estiagem, com precipitações superiores a 100 mm/mês nas estações Alberto Flores e Belo Vale. Na região do ribeirão Ferro-Carvão, o comportamento pluviométrico de suas estações, em geral, seguiu uma tendência aproximada ao observado nas demais

estações do rio Paraopeba, próximas à região, indicando precipitações mais elevadas em abril/2023 e um aumento em setembro/2023.

Durante a estiagem/2023, comparativamente à estiagem/2022, foram observados, em geral, menores ou iguais percentuais de violações aos limites legais para os parâmetros monitorados, embora permanecessem desvios acima do *baseline* sazonal. Destaca-se um aumento nas violações para Ferro dissolvido e Manganês total nas regiões do rio Paraopeba, e Alumínio e Ferro dissolvidos na Região 2C. Entre os parâmetros físico-químicos, as violações foram principalmente pontuais, exceto para sólidos suspensos totais, que apresentaram desvios até o final da Região 2A. A maioria das inconformidades para elementos traço ocorreu nos pontos onde já ocorriam registros de inconformidades, inclusive nas concentrações de *baseline* e em trechos não afetados pelo rompimento, sem persistência significativa ao longo do tempo.

Em relação aos sedimentos, na estiagem/2023, as maiores concentrações de metais, como Manganês, Arsênio, Cobre, Cromo e Níquel, foram identificadas da região do ribeirão Ferro-Carvão até a Região 1B. Já na Região 2B (reservatório de UHE de Retiro Baixo), se destacam concentrações mais elevadas, especialmente para Alumínio, Arsênio, Cromo, Cobre e Níquel. As concentrações dos metais nos sedimentos mantiveram um comportamento geral de equilíbrio, com algumas tendências de aumento em trechos de retenção hidráulica, como na Região Ferro-Carvão, possivelmente relacionadas ao regime de escoamento reduzido na estiagem/2023, favorecendo a sedimentação ao longo do leito fluvial e nas proximidades de estruturas hidráulicas.

Dessa maneira, os possíveis efeitos entre um período e outro chuvoso e, da mesma maneira, nos períodos de estiagens subsequentes, não devem ser interpretados como um comportamento isolado, mas devendo considerar, também, uma somatória de causas acumuladas preteritamente. Ou seja, a bacia apresenta comportamentos peculiares que podem ser resultantes de fatores acumulados no tempo e no espaço e, considerando-se a massa de dados de monitoramento disponíveis até o momento, condições provavelmente recorrentes da história da própria bacia podem ser efetivamente observadas em maiores detalhes ao longo do período monitorado após o rompimento.

Em resumo, compreende-se que as variações observadas nas águas superficiais ao longo do rio Paraopeba estão ligadas tanto aos rejeitos depositados na calha do rio, particularmente nos trechos próximos à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (regiões 1A e 1B), quanto às influências das variações sazonais (períodos de chuva e estiagem) e da resposta hidrológica da bacia. Durante o monitoramento, a bacia enfrentou condições hidrológicas variadas, alternando entre períodos de alta e baixa pluviosidade/vazão. Essas condições influenciaram a ressuspensão do material acumulado (rejeitos e sedimentos) na calha do rio e o arraste hidráulico de sedimentos naturais provenientes da área de drenagem da bacia. É importante destacar, no entanto, que do ponto de vista espacial e considerando apenas a análise dos períodos de estiagem, a partir da estiagem/2021, todas as regiões do rio Paraopeba já

apresentavam concentrações de metais majoritários (exceto Manganês dissolvido) e Turbidez estatisticamente similares ou inferiores às da Região Montante.

Informações adicionais podem ser consultadas nos documentos técnicos protocolados no IGAM e ANA. Os documentos utilizados foram:

- Relatório trimestral da qualidade da água superficial e sedimentos de outubro/novembro/dezembro (01/10/2019 a 31/12/2019), de janeiro/2020;
- Relatórios Semanais de Qualidade da Água Superficial e Sedimento – Evento da Barragem I do Complexo da Mina Córrego do Feijão (relatórios das semanas de outubro/2019 a março/2020; outubro/2020 a março/2021; outubro/2021 a junho/2022; Atendimento aos Autos de Fiscalização n° 61.250/2019, 64.499/2019 e 61.255/2019;
- Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno - Relatórios mensais (junho/2019 a dezembro/2023). PMQS-Três Marias. Atendimento ao Ofício n° 65/2019/AA-CD-ANA, Agência Nacional de Águas (ANA, 2019b);
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a março/2023). Novembro/2023.
- Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimento – Relatórios mensais (junho/2022 a dezembro/2023);

3. Premissas gerais

As premissas gerais adotadas ao longo das análises para elaboração deste relatório são relevantes para compreensão dos resultados analíticos, bem como para a condução de análises técnicas. Buscam delimitar o alcance do relatório, identificar possíveis limitações nos resultados e estabelecer o contexto desta discussão. Quanto às premissas específicas para cada capítulo de análise deste relatório, estas são apresentadas nos subitens correspondentes às metodologias aplicadas.

3.1. Recorte dos Dados

As informações apresentadas e discutidas neste relatório abrangem os resultados analíticos do período de 25/01/2019 a 30/09/2023, fornecidos pelos laboratórios ALS/Corplab (até novembro/2019), Bioagri (até dezembro/2020) e SGS-Geosol (desde dezembro/2020) em um formato de banco de dados (EQuIS), até a data de 16/10/2023. Para uma melhor compreensão dos resultados nos períodos de estiagem, este documento concentra suas avaliações nos seguintes períodos sazonais:

- Período de estiagem/2019: entre os meses de abril a setembro/2019;
- Período de estiagem/2020: entre os meses de abril a setembro/2020;
- Período de estiagem/2021: entre os meses de abril a setembro/2021;
- Período de estiagem/2022: entre os meses de abril a setembro/2022;
- Período de estiagem/2023: entre os meses de abril a setembro/2023.

3.2. Planos de Monitoramento

Desde 25/01/2019, todo escopo de monitoramento é preconizado por um plano, o qual é atualizado conforme necessidade de eventuais adequações no escopo. Atualmente, o plano de monitoramento encontra-se na versão v.28, relativa ao período chuvoso, protocolada em 29/09/2023. No entanto, para os propósitos deste relatório, relacionado ao período de estiagem/2023, utilizou-se a versão v.27, protocolada no dia 29/03/2023, com início da vigência em 01/04/2023. Nesse sentido, a **Tabela 3.2-1** oferece um resumo das principais alterações ocorridas na versão v.27. O documento completo está disponível no **Anexo I**, onde consta a lista completa dos pontos de monitoramento, a frequência de amostragem para cada ponto e os parâmetros monitorados, durante todo o período de monitoramento.

Tabela 3.2-1 Tabela resumo das alterações do plano de monitoramento PME

Resumo das revisões/alinhamentos do plano de monitoramento		
Versão	Revisão/Alinhamento	Data do protocolo
27	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atualização da coordenada do ponto PT-61; ▪ Exclusão do ponto PT-47-E no âmbito do Plano de Monitoramento Emergencial (PME) a partir de 01/04/2023, conforme carta C.EXT. 0148/2023; ▪ Alteração da frequência de amostragem dos pontos de monitoramento do PME para o período de estiagem a partir do dia 01/04/2023, conforme informado na carta C.EXT. 0272/2023; ▪ Atualização das coordenadas alternativas dos pontos PT-52, PT-07 e PT-09 para matrizes ASUP e SE. 	29/03/2023
28	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alteração da frequência de amostragem dos pontos de monitoramento do PME para o período de chuva, conforme informado na carta C.EXT. 0965/2023. Vigência a partir de 03/10/2023. 	29/09/2023

Ressalta-se que a coordenada do ponto PT-61 (córrego Laranjeira) foi atualizada para a posição geográfica Latitude -20,127340° / Longitude -44.147002°. A amostragem referente ao mês de março (08/03/2023) ocorreu na coordenada corrigida, em conformidade com a Carta da Ger. Executiva de Reparação nº C.EXT 0148/2023, que trata da proposta de realocação do ponto PT-47-E para o Programa de Monitoramento das Obras Emergenciais (PMO). Tal proposta está vinculada ao Auto de Fiscalização nº 61.250/2019 e à Nota Técnica AECOM NT N.º 60612553-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0028-2022, resultado na exclusão desse ponto do plano de monitoramento do Programa de Monitoramento Emergencial (PME).

Esta versão do plano também traz uma atualização das coordenadas alternativas dos pontos PT-52, PT-07 e PT-09 para as coletas de água superficial e sedimentos. Além disso, baseando-se na “Avaliação da Rede de Monitoramento – PME/PMQS – Revisão da frequência, malha amostral e escopo analítico”, protocolada por meio da carta C.EXT. 1118/2021 (SEI nº 33774875), foi submetida a proposta de alteração da frequência dos pontos do PME, em virtude do período de estiagem. Essa proposta, conforme comunicado na carta C.EXT. 0272/2023 enviada ao IGAM pela Vale S.A., atualiza a frequência dos pontos deste programa.

3.3. Área de abrangência

A área de abrangência do PME se inicia no rio Paraopeba, próximo ao ponto de monitoramento PT-52 a montante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, no município de Brumadinho, abrangendo toda bacia do rio Paraopeba, incluindo os reservatórios da UHE de Retiro Baixo e UHE de Três Marias, se estendendo até o rio São Francisco, a jusante da UHE de Três Marias, até o PT-32 localizado na confluência deste rio com o rio Abaeté, no município de Três Marias. Uma caracterização geral da área de estudo é apresentada no **Anexo II**, os pontos em unifilar e as distâncias entre os pontos e a barragem B1 podem ser observados na **Figura 1.1-1 do Anexo II**.

3.4. Caracterização do Rejeito

A composição dos rejeitos oriundos do rompimento da barragem B1 e do arraste de rejeitos das barragens B4 e B4-A foi analisada pela Geoenviron (2019) durante a caracterização química global fase I. Em síntese, a composição do rejeito é predominantemente constituída por óxido de ferro e sílica, representando mais de 90% de sua composição. Em porções inferiores, encontram-se os óxidos de alumínio e manganês, representando menos de 2,5% e 1,0%, respectivamente. Os demais elementos químicos no rejeito apresentam proporções ainda menores. Nesse sentido, o **Anexo II** apresenta uma descrição abrangente sobre as características do rejeito.

3.5. *Baselines*

Os *baselines* de chuva e de estiagem para as regiões Montante, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C correspondem aos dados públicos históricos do Instituto Mineiro de Gestão das Águas de Minas Gerais (IGAM, 2019, 2020a; 2020b; 2021a; 2021b) disponíveis de 2000 a 2018, oriundos de suas estações de monitoramento localizadas na Circunscrição Hidrográfica (CH) Bacia do Rio Paraopeba - SF3. Cabe ressaltar, que o IGAM não realizava até 2018 o monitoramento de alguns parâmetros analisados neste relatório, (principalmente os que não possuem Valor Máximo Permitido - VMP), e, portanto, estes parâmetros não possuem um *baseline* histórico para análises comparativas no âmbito temporal.

Para a região do ribeirão Ferro-Carvão, os dados históricos que foram agregados para a composição do *baseline* são representados pelos pontos FEI-COR-07, FEI-COR-01 e FEI-COR-03, referentes ao monitoramento da qualidade da água executado pela Vale entre 2004 e 2018, em atendimento às condicionantes 11 e 16 da Licença de Operação 211/2011 da Mina do Córrego do Feijão.

Para a Região 2D os dados de *baseline* são da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) de 2009 a 2018. E para a Região 3, já localizada no rio São Francisco, o *baseline* corresponde aos dados históricos do IGAM de 2000 a 2018.

Na **Tabela 3.5-1** é apresentada a relação dos pontos de monitoramento da Vale com os respectivos pontos de *baseline* associados a cada uma das regiões. Ressalta-se a proximidade de alguns pontos do IGAM em relação aos pontos da Vale, a saber: BP036 e PT-52; BP068 e PT-05; BP082 e PT-16; BP083 e PT-49; BP078 e PT-19; BP099 e CE-02; SF054 e PT-25, respectivamente.

Tabela 3.5-1 - Regiões e pontos analisados frente às violações aos limites legais.

Região	Baseline	Pontos Vale
Montante	BP036	PT-52
Ferro-Carvão	FEI-COR-01; FEI-COR-03-AS; FEI-COR-07	PT-11, PT-12

Região	Baseline	Pontos Vale
1A	BP068	PT-01; PT-13*; PT-09; PT-02; PT-05
1B	BP070, BP072	PT-03; PT-14; PT-48; PT-15
2A	BP082, BP083, BP078	PT-53; PT-54; PT-43; PT-16; PT-17; PT-18; PT-49; PT-19; PT-55
2B	BP099	PT-20; PT-28; PT-21
2C	BP099	PT-57; CE-02; JRB-02; PT-22
2D	TM10/M07; TM30/M03; TM35; TM40/M01	PT-23; PT-29
3	SF054	PT-25, PT-27; PT-32

*Os dados de monitoramento do ponto PT-13 utilizados nesta análise descarta os resultados de água superficial anteriores ao dia 13/05/2019. Isso se deve à amostragem realizada em local não representativo devido a limitações de acesso.

Para análise dos tributários, foram empregados os pontos da rede do IGAM mais próximos a cada um deles como referência nos *baselines* sazonais históricos, conforme apresentado na **Tabela 3.5-2**.

Tabela 3.5-2 - Tributários, pontos do IGAM *baseline* e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba.

Pontos tributários	Curso d'água	Pontos de <i>baseline</i>	Pontos montante	Ponto jusante
TT-02	Ribeirão Sarzedo	BP068	PT-05	PT-03
TT-01	Rio Betim	BP070	PT-14	PT-48
TT-05	Ribeirão das Abóboras	BP072	PT-53	PT-54
CE-01	Ribeirão Gomes	BP099	PT-57	CE-02

3.6. Limites de Quantificação (LQ)

Devido a discrepância nos Limites de Quantificação (LQ) nas análises realizadas por diferentes laboratórios, e considerando que muitos resultados para diversos analitos são inferiores ao LQ, adotou-se a premissa de padronização pelo menor valor de LQ. No processo de análise exploratória dos dados, optou-se pelo método de substituição simples pelo próprio valor do LQ. Esse método também é empregado pelo órgão ambiental IGAM e utilizado na área ambiental para tratamento de dados censurados, conforme Carvalho (2003) e Christofaro e Leao (2014).

Nas avaliações estatísticas inferenciais, o LQ é tratado de maneira diferente. Inicialmente, é realizada a padronização do valor não-quantificado, considerando o valor mais restritivo (menor LQ) reportado pelos laboratórios (REIMMAN et al. 2008). Os valores atribuídos a esses tipos de dados são determinados em condições distintas das amostras analisadas e, por vezes, não abrangem a dispersão global do procedimento analítico. O método de substituição passa a ser o valor do LQ já padronizado pela metade do seu valor, com o intuito de distinguir os valores não quantificados dos quantificados.

Na avaliação dos percentuais de violação aos limites legais de classe de enquadramento para da água superficial e dos percentuais de resultados acima dos valores orientadores para sedimentos, não foram considerados os analitos que apresentaram 100% dos resultados inferiores ao LQ em todos os pontos avaliados. É importante destacar que nos gráficos, o LQ do *baseline* não é padronizado, ao passo que, para a série de monitoramento da Vale, é realizada a padronização.

3.7. Avaliação QAQC

O Programa de Controle e Garantia da Qualidade (QA/QC), implantado pela Arcadis para o projeto de Brumadinho, tem o objetivo de assegurar e garantir a precisão e acurácia dos procedimentos e controle da qualidade da amostragem, a etapa analítica (química e física) e, ao final do processo, utilizar ferramentas para validar os dados obtidos pelos laboratórios. As metodologias adotadas para a avaliação da qualidade dos dados apresentados no presente documento estão descritas no **Anexo III**, assim como os resultados detalhados e as inconsistências levantadas para o último período sazonal de estiagem, no **Anexo III**.

3.8. Situação da pluma original

Ao longo do ano de 2019, especificamente durante os meses de estiagem, a pluma original, ora contida no reservatório da UHE Retiro Baixo, dissipou-se devido a processos como sedimentação, diluição e outros fatores de atenuação. Durante o período de circulação de inverno (desestratificação térmica) em 2019, no entanto, foram observadas oscilações de concentrações associadas a esse fenômeno. Em todo caso, a condição de dissipação foi evidente nos meses de julho, agosto e início do mês de setembro/2019, quando a maioria dos parâmetros retornou a condições similares ou inferiores ao *baseline* (IGAM).

É importante destacar que a pluma é uma frente de deslocamento originada a partir de uma fonte inicial, que resulta da interação e transporte (advectivo, dispersivo, difusivo) de massas de diferentes densidades, com frações particuladas e dissolvidas e que apresentam variações em suas concentrações ao longo do tempo e do espaço. Ela se esvanece quando seus limites estão visual e analiticamente compatíveis com as condições naturais (*baseline*) do ambiente.

A **Tabela 3.8.1** apresenta as datas de passagem da pluma original pelos pontos de monitoramento ao longo do rio Paraopeba. Observa-se que a pluma alcançou o ponto de monitoramento PT-21 no dia 08/03/2019 e se dissipou-se ao longo do período de estiagem/2019.

Tabela 3.8-1 Datas da passagem da Pluma de Turbidez.

Pontos de monitoramento	Data de passagem da pluma
PT-02	26/01/2019
PT-03	28/01/2019
PT-06	30/01/2019
PT-04	04/02/2019
PT-16	05/02/2019
Entre PT-17 e PT-18	09/02/2019
PT-19	12/02/2019
Entre PT-55 e PT-20	25/02/2019
PT-20	28/02/2019
Entre PT-20 e PT-28	03/03/2019
PT-28	06/03/2019
PT-21	08/03/2019

Neste contexto, os resultados de monitoramento utilizados neste estudo, para cada um dos pontos mencionados anteriormente levaram em consideração o momento a partir do qual houve a passagem da pluma por eles.

3.9. Padrões de qualidade

Para fins de enquadramento dos corpos de água, conforme instituído pela Política Nacional de Recursos Hídricos, a que dispõe em seu Art. 9º, a importância do enquadramento como instrumento de planejamento, visando conservar ou buscar níveis de qualidade que atendam às necessidades estabelecidas pela sociedade e não apenas à condição real dos corpos d'água, foram consideradas as seguintes normativas legais:

- Resolução CONAMA nº 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;
- Resolução CNRH n.º 91, de 05 de novembro de 2008 - Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos;
- Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995 - Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba (COPAM, 1995);
- Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (COPAM & CERH-MG, 2022);
- Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG 06, de 14 de setembro de 2017- Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento de corpos de água superficiais (COPAM & CERH-MG, 2017).

Foram consideradas as subdivisões em três trechos de enquadramentos para as respectivas classes, conforme a DN COPAM nº 14 de 1995 (COPAM, 1995):

- Trecho 1 - rio Paraopeba, das nascentes até o barramento do primeiro açude – **Classe Especial**;
- Trecho 2 - rio Paraopeba, do barramento do primeiro açude até a confluência com o rio Maranhão - **Classe 1**;
- Trecho 3 - rio Paraopeba, da confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias- **Classe 2**.

Além disso, para os pontos localizados em afluentes do rio Paraopeba e na sub-bacia do ribeirão Ferro-carvão, as classificações também se basearam na Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995, são apresentadas a seguir:

- **Classe 1** - córrego Laranjeira (PT-61), córrego Tijuco (PT-62), rio Pardo (TT-08), ribeirão dos Gomes (CE-01);
- **Classe 2** – ribeirão Casa Branca (PASU-07 e PT-07), ribeirão Ferro-carvão (PT-59, PT-11 e PT-12), córrego Olaria (PT-60), córrego Samambaia (PT-10), ribeirão Sarzedo (TT-02), rio Manso (TT-03), ribeirão Serra Azul (TT-04), ribeirão Grande/das Abóboras (TT-05), ribeirão São João (TT-06) e ribeirão do Cedro (TT-07);
- **Classe 3** - rio Betim (TT-01).

Como não há uma classificação para avaliar a qualidade química de sedimentos de corrente, utilizou-se como referência de comparação a Resolução CONAMA nº 454/2012 que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento e disposição do material a ser dragado em águas doces sob jurisdição nacional. A caracterização química foi realizada de acordo com as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais definidos nesta Resolução e os resultados analíticos foram comparados com os níveis 1 e 2 de classificação do material a ser dragado. Os valores orientadores adotados têm como referência a publicação oficial Environmental Canada. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*, propostos pelo Conselho de Ministérios de Meio Ambiente do Canadá (*Canadian Council of Ministers of the Environment*, CCME, 2002).

A distribuição granulométrica dos sedimentos também seguiu as orientações da Resolução CONAMA nº 454/2012 para o material a ser dragado, que tem como referência de classificação granulométrica a escala Granulométrica de WENTWORTH (1922).

Os elementos manganês, ferro e alumínio não estão contemplados na Resolução CONAMA nº 454/2012 e neste caso, foi utilizada os valores de Vicq (2015), a qual também é utilizada pelo IGAM nos relatórios técnicos informativos sobre a qualidade dos sedimentos no rio Paraopeba, principalmente IGAM (2020, 2021 e 2022).

3.10. Avaliações complementares

Para complementar as avaliações do Relatório de Fechamento de Ciclo, no **Anexo IV** são disponibilizadas interpretações tanto para água superficial quanto para sedimento, dos pontos que não são contemplados na avaliação principal deste relatório, a saber: PT-59, PT-60, PT-61, PT-62, PT-10, PASU-07, PT-07, TT-03, TT-04, TT-06, TT-07, TT-08, pontos da Região 2C e pontos da Região 3. As avaliações feitas são adequadas as características de monitoramento (frequência, início de monitoramento e outras) de cada ponto e/ou região. Destaca-se por fim, que, o acompanhamento desses pontos, também podem ser consultados nos relatórios mensais protocolados junto ao IGAM.

Além disso, no **Anexo V**, apresenta-se um panorama da evolução das concentrações máximas nos pontos de captação, enquanto o **Anexo VI** contém informações sobre as variações de concentração para cada um dos parâmetros e pontos analisados ao longo do tempo.

4. Caracterização hidrológica

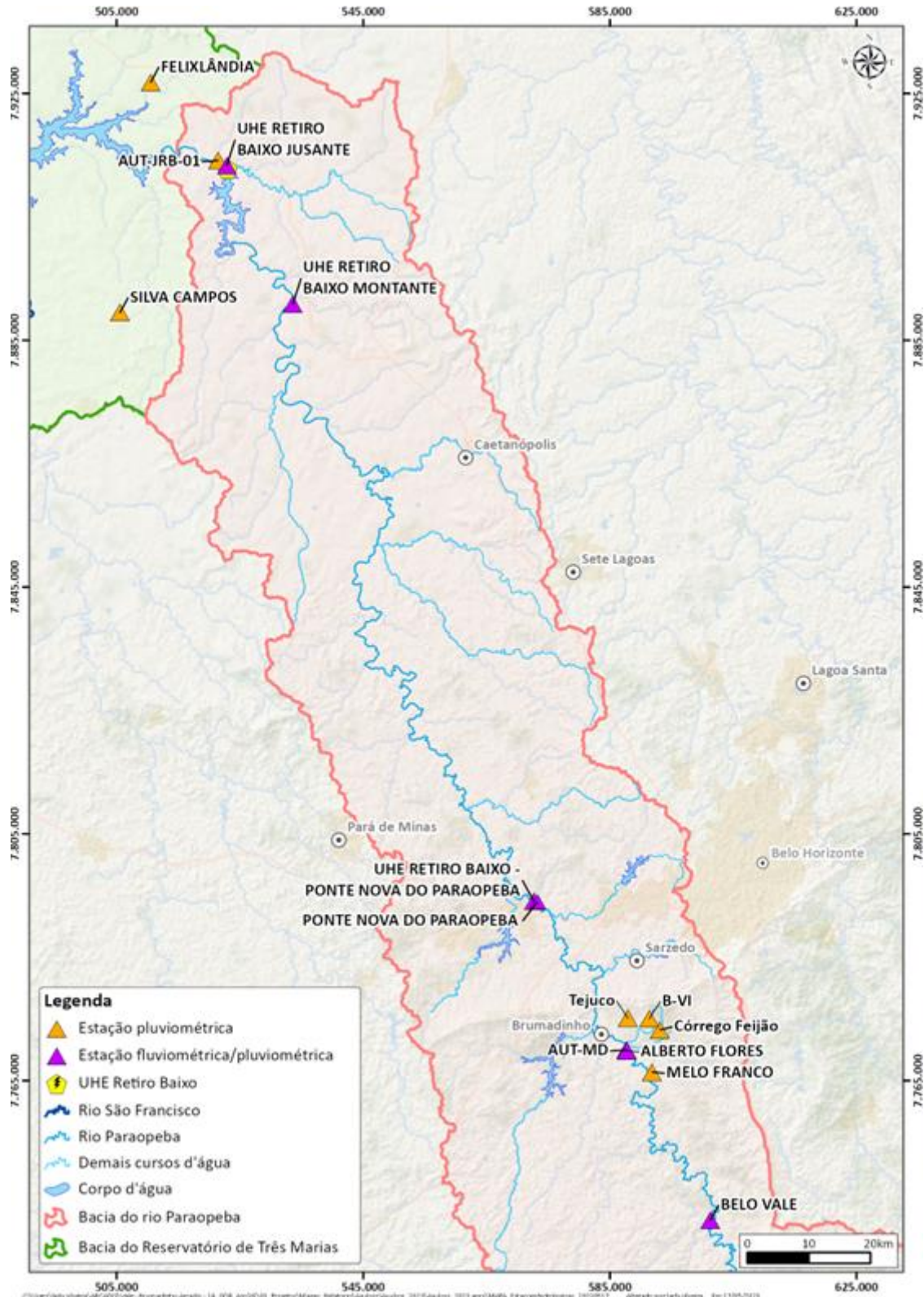
4.1. Contextualização

Para a caracterização hidrológica do rio Paraopeba ao longo do período global de análise, foram utilizados como referência os resultados de precipitações, cotas e vazões de estações hidrométricas oficiais de referência disponíveis no sistema ANA, além das estações Vale. É importante destacar, no entanto, que os dados pluviométricos e fluviométricos das estações são passíveis de falha e, assim, precisam ser analisados com cautela, amparando-se adicionalmente à análise da variação dos níveis de água das estações fluviométricas e no comportamento de outras estações pluviométricas nas cercanias, quando possível. Ao longo do capítulo, as falhas de registro de dados eventualmente detectadas foram destacadas. As estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas nesse estudo, tanto de domínio público como privadas, encontram-se na **Tabela 4.1-1** e na **Figura 4.1-1**, é apresentada a localização das referidas estações.

Tabela 4.1-1 Estações hidrometeorológicas localizadas na região do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba

Nome	Código	Tipo	Fonte dos dados	Município	Latitude	Longitude
Belo Vale	40710000	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/CPRM	Belo Vale	-20,41	-44,02
Melo Franco	2044008	Pluviométrica	ANA	Brumadinho	-20,19	-44,12
Alberto Flores	40740000	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/CPRM	Brumadinho	-20,16	-44,16
Tejuco	-	Pluviométrica	Vale/Potamos	Brumadinho	-20,11	-44,15
Córrego Feijão	-	Pluviométrica	Vale	Brumadinho	-20,13	-44,10
B-VI	-	Pluviométrica	Vale/Potamos	Brumadinho	-20,11	-44,12
AUT-MD	-	Fluviométrica/ Pluviométrica	Vale/Clean	Brumadinho	-20,16	-44,16
Ponte Nova do Paraopeba	40800001	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/CPRM	Juatuba	-19,95	-44,31
UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba	40799000	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/Retiro Baixo Energética S.A.	Juatuba	-19,95	-44,31
UHE Retiro Baixo Montante	40865400	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/Retiro Baixo Energética S.A.	Curvelo	-19,07	-44,68
UHE Retiro Baixo Jusante	40866000	Fluviométrica/ Pluviométrica	ANA/Retiro Baixo Energética S.A.	Felixlândia	-18,87	-44,78
AUT_JRB-01	-	Pluviométrica	Vale/Clean	Felixlândia	-18,86	-44,79
Silva Campos	1944063	Pluviométrica	ANA	Pompéu	-19,09	-44,95
Felixlândia	1844024	Pluviométrica	ANA	Felixlândia	-18,75	-44,90

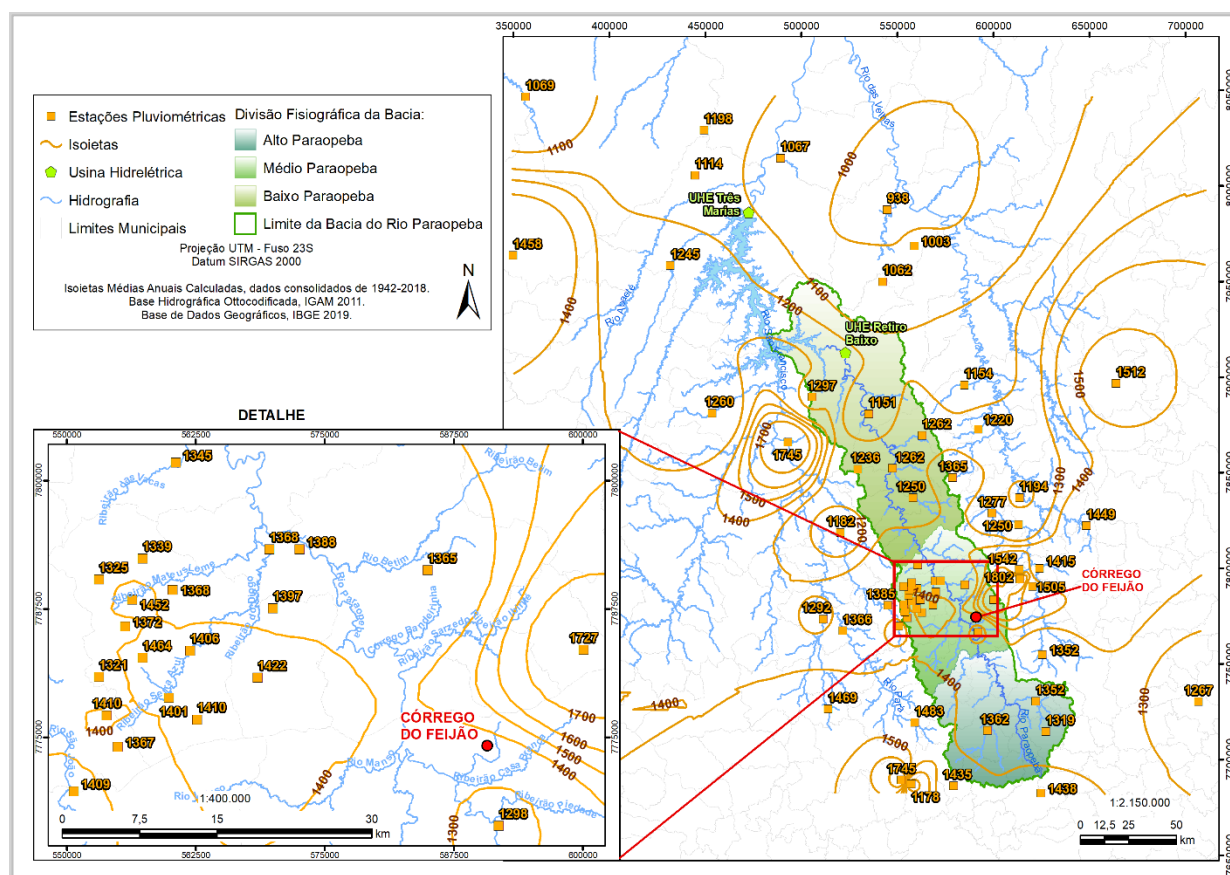
Figura 4.1-1 Estações fluviométricas e pluviométricas localizadas na região de interesse



Fonte: Adaptado de ANA, 2023.

Em relação à análise pluviométrica, na **Figura 4.1-2**, podem ser observadas as isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba (período de 1942 a 2018). Verifica-se, assim, que as regiões fisiográficas do Alto e Médio Paraopeba apresentam precipitações totais anuais médias, variando entre 1.700 e 1.300 mm. Na região fisiográfica do Baixo Paraopeba, por sua vez, as precipitações totais anuais médias são inferiores em relação às demais regiões, oscilando entre 1.100 mm e 1.300 mm.

Figura 4.1-2 Isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba - período 1942 – 2018



Fonte: TEC3, 2019.

Na **Tabela 4.1-2**, em caráter informativo, é apresentada uma síntese do comportamento geral fluviométrico da bacia do rio Paraopeba a partir de estações localizadas na calha do referido curso d'água em diferentes regiões da bacia (Alto, Médio e Baixo rio Paraopeba). Foram, assim, obtidas as vazões médias mensais, Q_{mt} , Q_{95} e $Q_{7,10}$, nas estações de referência.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 45 / 399

Tabela 4.1-2 Vazões médias mensais, $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{mit} (m^3/s) na calha principal do rio Paraopeba

Região Bacia	Código	Nome	Vazões (m^3/s)															Intervalo de dados
			$Q_{7,10}$	Q_{95}	Q_{mit}	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Alto rio Paraopeba	40549998	São Brás do Suaçuí Montante	1,44	2,24	7,65	17,29	12,22	10,48	7,36	5,46	4,57	3,86	3,34	3,58	4,47	7,25	12,35	Jun/1982 a dez/2018
	40700002	Jeceaba	9,40	12,80	43,03	75,40	81,30	69,74	46,33	32,08	27,81	22,48	19,36	18,67	22,29	33,73	69,01	Jan/1943 a dez/1956
	40710000	Belo Vale	10,43	14,45	49,25	110,14	78,74	68,26	46,90	33,83	28,49	24,17	20,95	21,88	28,89	47,83	81,78	Jan/1966 a dez/2018
Médio rio Paraopeba	40720002	Melo Franco	13,69	19,00	58,85	102,39	109,11	91,23	60,47	46,57	37,77	31,92	27,13	27,25	36,73	54,43	92,62	Nov/1935 a dez/1965
	40740000	Alberto Flores	13,18	18,22	61,28	134,25	100,75	84,68	59,08	43,54	36,35	30,91	26,50	26,94	35,84	58,48	98,68	Dez/1963 a dez/2018
	40800001	Ponte Nova do Paraopeba	17,43	24,29	83,45	170,47	143,70	123,97	84,15	60,79	50,86	43,10	36,53	36,52	46,09	74,65	132,41	Jan/1938 a dez/2018
Baixo rio Paraopeba	40850000	Ponte Taquara	21,94	31,74	119,07	267,64	198,07	172,25	118,15	83,55	69,13	57,60	48,60	48,64	62,70	109,60	198,23	Jun/1967 a dez/2018

Fonte: Séries históricas disponibilizadas por ANA, 2019a, dados consistidos por TEC3, 2019 e ARCADIS, 2020d.

Ressalta-se que as variações fluviométricas, sobretudo durante os períodos sazonais de chuvas, desempenham um papel crucial nos aspectos hidrodinâmicos que impactam significativamente a qualidade da água em um corpo hídrico. Isso ocorre através do transporte de sedimentos pelo escoamento superficial na bacia, ressuspensão de material nas calhas dos cursos de água e processos erosivos e de assoreamento relacionados às variações na velocidade e profundidade da água. Contrastando com esse cenário, nos períodos de estiagem, objeto deste documento, quando as vazões diminuem e a estabilidade hidrodinâmica aumenta, observa-se uma redução nos aportes de sedimentos. Esse fenômeno, por sua vez, resulta em uma atenuação nos níveis dos parâmetros de qualidade da água, especialmente aqueles que são mais característicos da própria bacia.

Para uma melhor compreensão do comportamento pluviométrico e fluviométrico ao longo do trecho de interesse do rio Paraopeba, foram levados em conta, conforme **item 3.1**, cinco períodos sazonais de estiagem, considerando-se as seguintes condições:

- Período de estiagem/2019: entre os meses de abril/2019 e setembro/2019;
- Período de estiagem/2020: entre os meses de abril/2020 e setembro/2020;
- Período de estiagem/2021: entre os meses de abril/2021 e setembro/2021;
- Período de estiagem/2022: entre os meses de abril/2022 e setembro/2022;
- Período de estiagem/2023: entre os meses de abril/2023 e setembro/2023.

4.2. Rio Paraopeba

Foram comparados os totais mensais acumulados de precipitação (mm) desde janeiro/2019 (25/01/2019) até setembro/2023 (30/09/2023), utilizando os registros de chuva das estações pluviométricas localizadas ao longo do rio Paraopeba: Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante. Esses dados foram comparados com as médias mensais históricas de precipitação (mm) relatadas pelas estações: Melo Franco, Ponte Nova do Paraopeba, Silva Campos e Felixlândia, que foram selecionadas com base em sua proximidade geográfica em relação às estações analisadas (**Gráfico 4.2-1**). Os períodos de dados de cada série histórica das estações de referência e das estações adotadas correspondentes podem ser verificados na **Tabela 4.2-1**.

Tabela 4.2-1 Estações de referência para a avaliação dos registros hidrométricos.

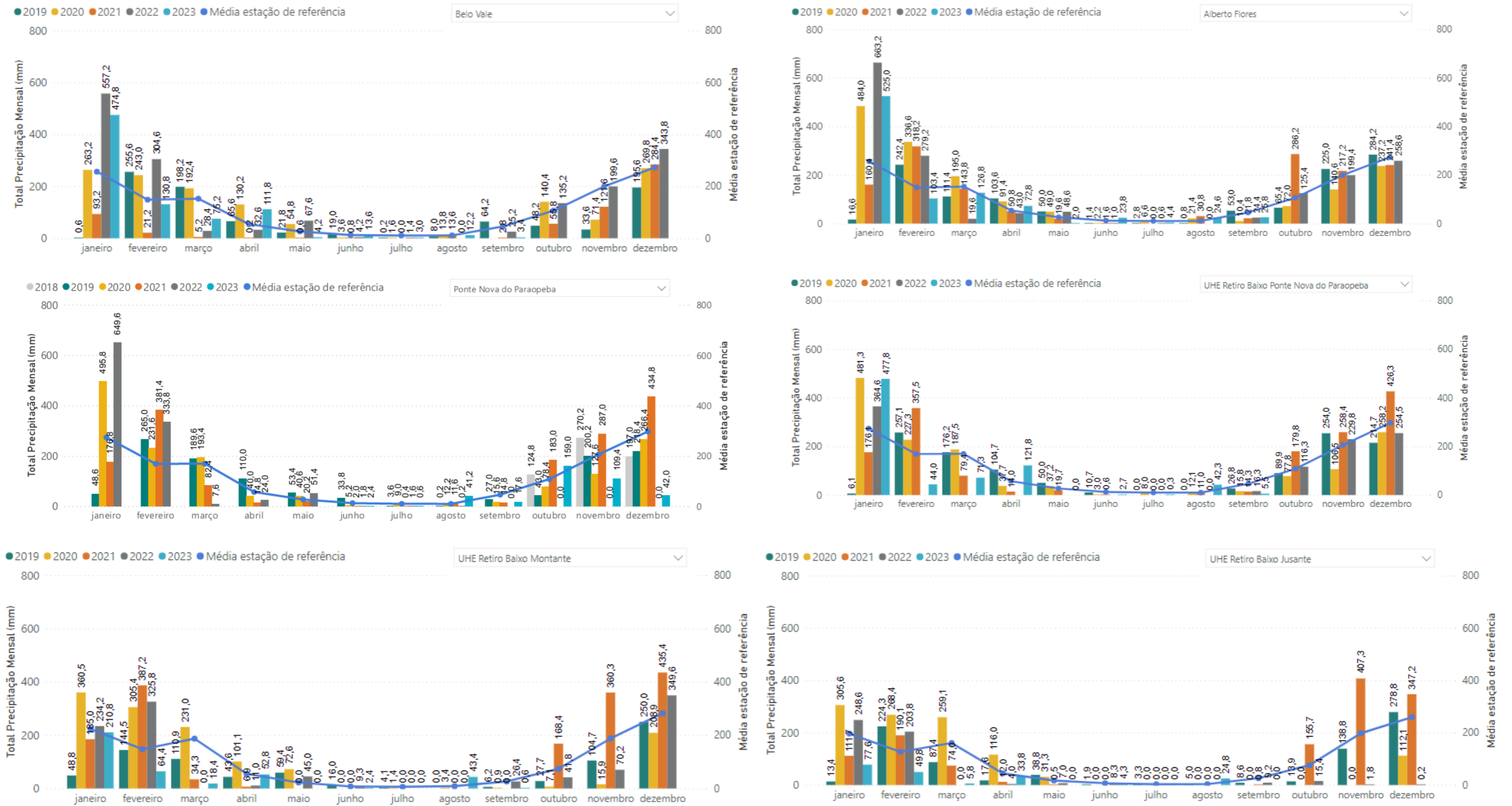
Estação de referência	Código	Intervalo de dados da série histórica	Estações avaliadas
Melo Franco	2044008	Jul/1941 a dez/2018	Belo Vale Alberto Flores
Ponte Nova do Paraopeba	1944004	Mar/1941 a dez/2018	Ponte Nova do Paraopeba UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba

RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS
- FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)**CÓDIGO Vale**
1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1**CÓDIGO ARCADIS**
1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1**Folha**
47 / 399

Estação de referência	Código	Intervalo de dados da série histórica	Estações avaliadas
Silva Campos	1944063	Abr/1995 a dez/2018	UHE Retiro Baixo Montante
Felixlândia	1844024	Nov/2004 a dez/2018	UHE Retiro Baixo Jusante AUT_JRB-01

Fonte: ANA, 2019a.

Gráfico 4.2-1 Total precipitado mensal (mm) para as estações Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante e médias mensais históricas de precipitações das estações de referência



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Em termos gerais, o conjunto de gráficos anterior (**Gráfico 4.2-1**) apresenta as variações temporais típicas das precipitações na região Sudeste, com maior incidência de chuvas entre os meses de outubro a março, seguidos por uma redução gradual de abril a setembro. Janeiro se destaca como o mês de maior precipitação na maior parte da bacia, seguido por fevereiro, com diminuição progressiva nos meses subsequentes.

A ocorrência de chuvas desempenha um papel fundamental na avaliação da qualidade da água, uma vez que aumenta a energia hidráulica do escoamento superficial na bacia e as vazões nos rios. Isso pode resultar no transporte de materiais das áreas de contribuição (escoamento difuso) e, principalmente, na ressuspensão de materiais no leito dos corpos d'água, o que conseqüentemente aumenta os teores dos analitos. Por outro lado, é possível observar uma redução significativa nas chuvas entre os meses de abril a setembro, período característico de estiagem na região. Esse estágio de recessão hidrológica representa a evolução temporal típica das vazões, à medida que as contribuições do escoamento superficial diminuem e as vazões fluviais passam a depender predominantemente do fluxo de base da bacia. Conforme a estiagem progride, os níveis e as vazões diminuem, com maior estabilidade hidrodinâmica, e as contribuições difusas praticamente desaparecem. Isso resulta também em uma condição de redução progressiva das concentrações dos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo. Durante a estiagem/2023, observou-se comportamento condizente para esse período sazonal.

Importante destacar, especificamente, o mês de abril/2023, durante o qual foram registrados os maiores índices pluviométricos na maioria das estações monitoradas, ultrapassando a média de referência para a região. Apesar da expectativa de que o período chuvoso antecedente reverberasse seu comportamento e seus efeitos na fase inicial do período de estiagem subsequente, a segunda metade do mês de abril/2023 foi marcada por chuvas mais intensas, resultando em elevações expressivas, porém pontuais, nos níveis e vazões fluviais ao longo de toda a bacia do rio Paraopeba, conforme será apresentado mais adiante.

A partir de maio/2023, é observada uma redução na pluviosidade, corroborando as médias de referência regionais. Esse padrão se mantém nos meses subsequentes, junho e julho, com precipitações acumuladas em níveis mais baixos. No entanto, em agosto/2023, registra-se um aumento nos totais acumulados em todas as estações monitoradas em comparação ao mês anterior (julho/2023), resultando em um incremento nos totais das estações analisadas. No último mês da estiagem, setembro/2023, são notadas precipitações nos últimos dias, embora haja uma redução na pluviosidade total em relação a agosto/2023.

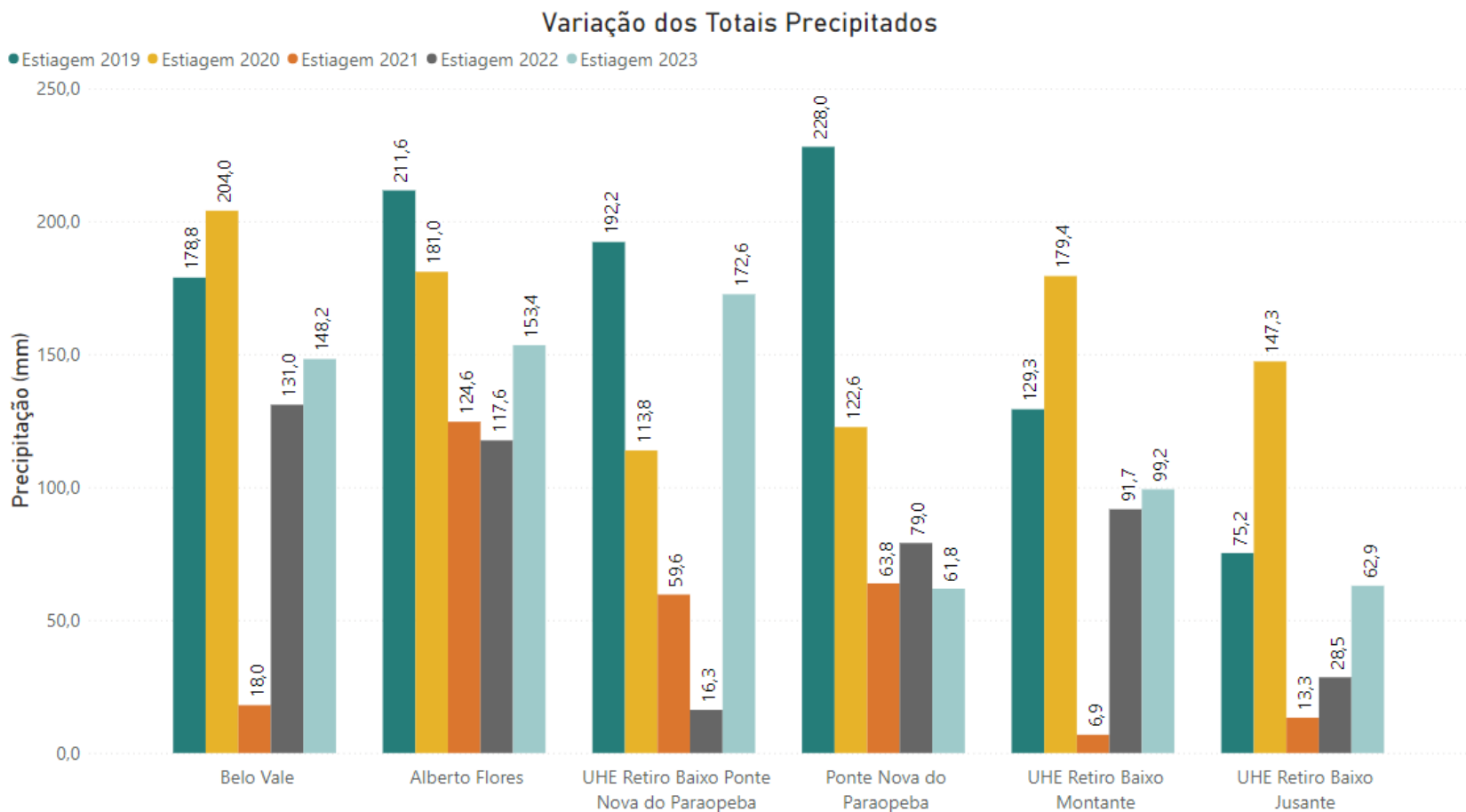
Resumidamente, no período de estiagem/2023, o mês de abril destacou-se por índices pluviométricos mais expressivos. Por outro lado, maio, junho e julho registraram uma diminuição nas precipitações acumuladas. O mês de agosto apresentou um aumento nos totais acumulados, enquanto setembro mostrou uma redução na pluviosidade em relação ao mês anterior, apesar da ocorrência de chuvas ao final do mês.

Complementarmente, no **Gráfico 4.2-1**, é apresentado o histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2023 nas estações Belo Vale, Alberto Flores, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante. Os resultados evidenciam os seguintes padrões:

- Nos anos iniciais do monitoramento, durante as estiagens de 2019 e 2020, foram registrados os maiores índices pluviométricos em todas as estações avaliadas, exceto para a estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, na qual os maiores índices foram registrados na estiagem/2019 e na estiagem/2023.
- Na estiagem/2021, para todas as estações houve redução expressiva, nos índices de chuva em comparação com a estiagem anterior (2020).
- Na estiagem/2022, foram indicados aumento nos índices pluviométricos nas estações Belo Vale, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante.
- Por fim, a estiagem/2023 apresentou índices pluviométricos em patamares, mas ligeiramente mais elevados em relação a estiagem/2022 em todas as estações, com exceção da estação Ponte Nova do Paraopeba. O maior índice registrado para a estiagem vigente foi na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba (172,6 mm), enquanto o menor índice observado foi na estação UHE Retiro Baixo Jusante (62,9 mm). Destaca-se que a estação Ponte Nova do Paraopeba apresentou resultados discrepantes quando comparados com a estação mais próxima, UHE Retiro Baixo Ponte Nova Paraopeba, o que pode indicar possível falha na transmissão de resultados. Ressalta-se que a citada estação apresentou falha no registro de dados pluviométricos entre 17/08/2022 e 17/06/2023, o que interferiu em tal avaliação.

No âmbito espacial, é possível notar que, para a estiagem vigente (2023), as precipitações foram mais volumosas nas estações próximas à região de montante da bacia (Estação Belo Vale), de Brumadinho (Estação Alberto Flores) e da porção central da bacia (Estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba), enquanto os totais pluviométricos das regiões mais a jusante e distais da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão tenderam a ser mais atenuados, corroborando com o comportamento histórico isoietal da bacia. No entanto, destaca-se a necessidade de avaliar com cautela os resultados registrados pelas estações de apoio, tendo em vista as eventuais falhas detectadas, conforme detalhado adiante.

Gráfico 4.2-2 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

No **Gráfico 4.2-3** ao **Gráfico 4.2-9**, tendo em vista o comportamento de causa-efeito relacionado às chuvas e níveis/vazões na bacia, são apresentados os dados conjuntos de precipitação diária acumulada (hietogramas) e nível diário médio (cotogramas) também obtidos das estações hidrométricas localizadas no rio Paraopeba, a saber: Belo Vale, Alberto Flores, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante, UHE Retiro Baixo Jusante e AUT_JRB-01.

É fundamental destacar que, durante a atual avaliação, a estação Alberto Flores registrou uma lacuna nos dados de nível a partir de 11/12/2020 com a retomada ocorrendo em 09/08/2021. Similarmente, a estação Ponte Nova do Paraopeba interrompeu o envio de dados de nível em dezembro/2020, reiniciando suas operações de forma contínua em 31/08/2022, com exceção de alguns dias e horários específicos. Devido às intensas chuvas a partir de 08/01/2022, essa estação novamente deixou de transmitir dados, voltando apenas no final de agosto/2022, apresentando registros de níveis e vazões, mas ainda sem dados pluviométricos. Dentro desse intervalo, observa-se uma ausência de registros pluviométricos entre 27/02/2022 e 31/03/2022. Posteriormente, uma nova falha no registro pluviométrico é evidenciada, desta vez entre 17/08/2022 e 17/06/2023.

De forma semelhante, a estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, localizada em uma seção fluvial próxima, interrompeu suas operações em 09/01/2022, reiniciando o registro de dados de nível e chuva no final de julho/2022 (25/07/2022) e de vazões em meados de setembro/2022. Adicionalmente, observou-se que, durante o período de 20/março a 6/maio de 2023, a estação em questão exibiu irregularidades na coleta de dados. Especificamente, foram registrados valores anormalmente elevados para o mês de abril/2020. Diante dessa inconsistência, decidiu-se excluir os dados referentes ao nível correspondentes a esse intervalo de tempo, a fim de manter maior integridade e precisão das informações apresentadas.

Em algumas ocasiões, a estação UHE Retiro Baixo Jusante também apresentou registros nulos de chuva. Nestes casos, foi possível recorrer à estação telemétrica AUT_JRB-01, operada pela Clean/Vale e localizada aproximadamente a 1,6 km a jusante, a qual ofereceu registros de precipitação.

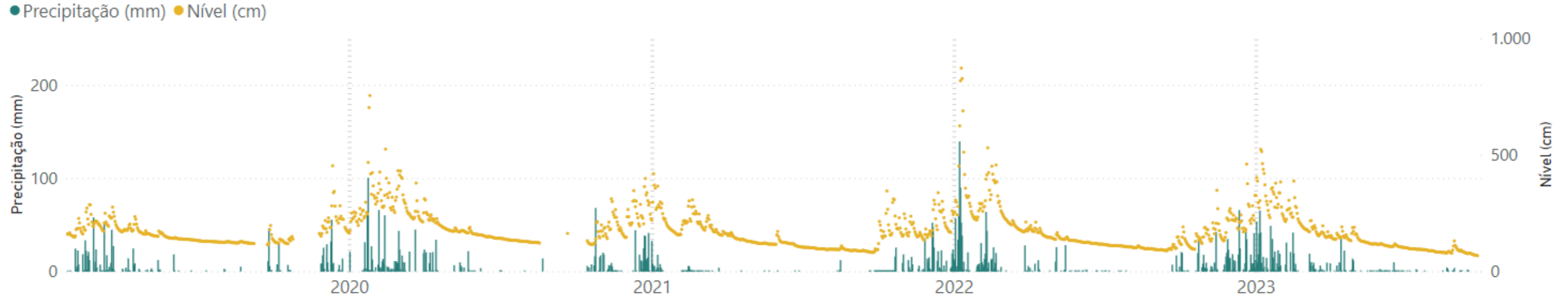
Em 2023, destaca-se que o site do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) foi desabilitado pela Superintendência de Tecnologia da Informação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (STI/ANA), no dia 27 de setembro, após uma tentativa de ataque cibernético. Desse modo, o site da ANA mostrou falha no acesso aos dados a partir do dia 27/09/2023, apresentando um hiato de registros até o dia 30/09/2023, voltando ao normal no dia 01/10/2023, já no início do período chuvoso 2023/2024. Assim, observa-se que todas as estações monitoradas apresentam falta de registro de dados nesse período.

É importante, mais uma vez, destacar que os dados pluviométricos coletados pelas estações mencionadas podem apresentar imprecisões, exigindo uma análise cuidadosa. Essas falhas podem surgir tanto de períodos prolongados de registros nulos quanto de discrepâncias observadas ao comparar os dados com estações próximas. Embora o sistema indique que os

resultados são válidos, uma análise crítica pode apontar inconsistências. Portanto, recomenda-se que a análise desses dados seja complementada, sempre que possível, com informações sobre as variações nos níveis d'água registrados pelas estações fluviométricas e com dados de outras estações pluviométricas e fluviométricas da região.

Posto isso, os cotagramas, a seguir apresentados, têm a função específica e fundamental de evidenciar a variações mais pronunciadas das condições hidrológicas do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais em análise. Os resultados telemétricos, de alta frequência de registros fluviométricos, são imprescindíveis para permitir correlacionar eventuais alterações de qualidade da água com mudanças mais evidentes do comportamento hidrológico em conjunto com outros fatores. Cabe ressaltar que os resultados das vazões monitoradas não foram incluídos, dadas as falhas de registros e inconsistências observadas nas séries históricas oriundas de prováveis alterações nas tendências das curvas-chaves.

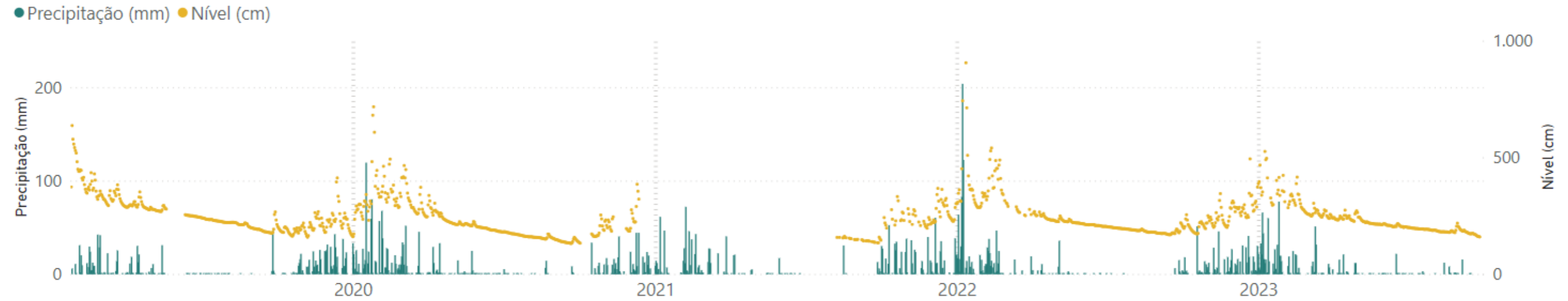
Gráfico 4.2-3 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Belo Vale



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm).

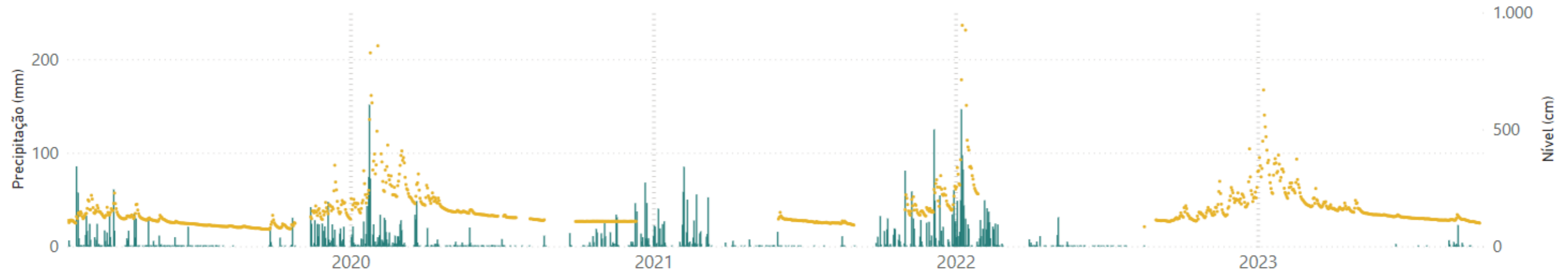
Gráfico 4.2-4 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Alberto Flores



Fonte: ANA, 2023b. Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm).

Gráfico 4.2-5 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação Ponte Nova do Paraopeba

● Precipitação (mm) ● Nível (cm)

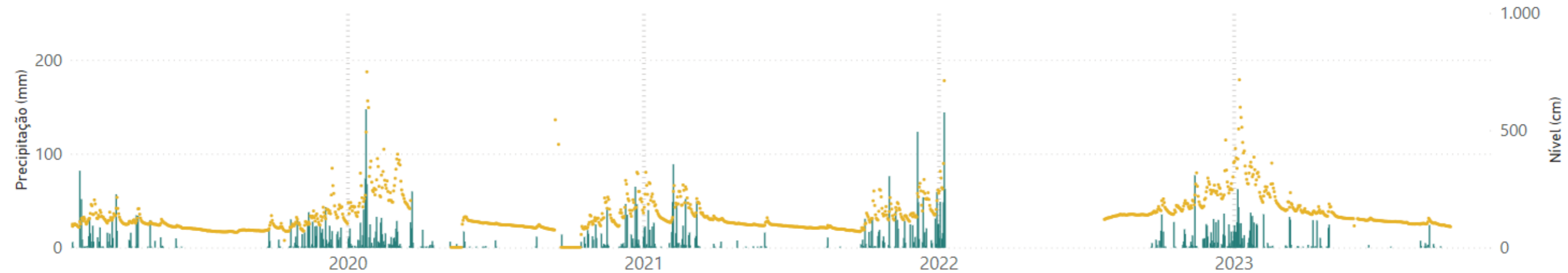


Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm). Não há registro de precipitação na estação entre setembro/2022 até junho/2023.

Gráfico 4.2-6 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba

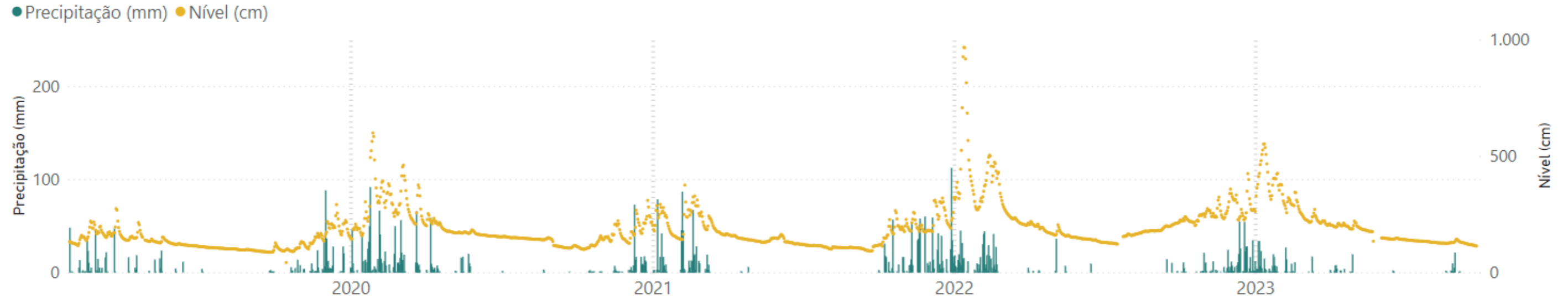
● Precipitação (mm) ● Nível (cm)



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm). Destaca-se que o período entre 20/03/2023 e 06/05/2023 apresentou possíveis falhas no registro de dados (exibindo valores superestimados de nível (cm) para o mês de abril/2020, (superiores a 800 cm)), nesse sentido, optou-se por ocultar esses dados nesse período. Os registros de precipitação foram paralisados a partir de 09/01/2023 e retornaram em 27/09/2022.

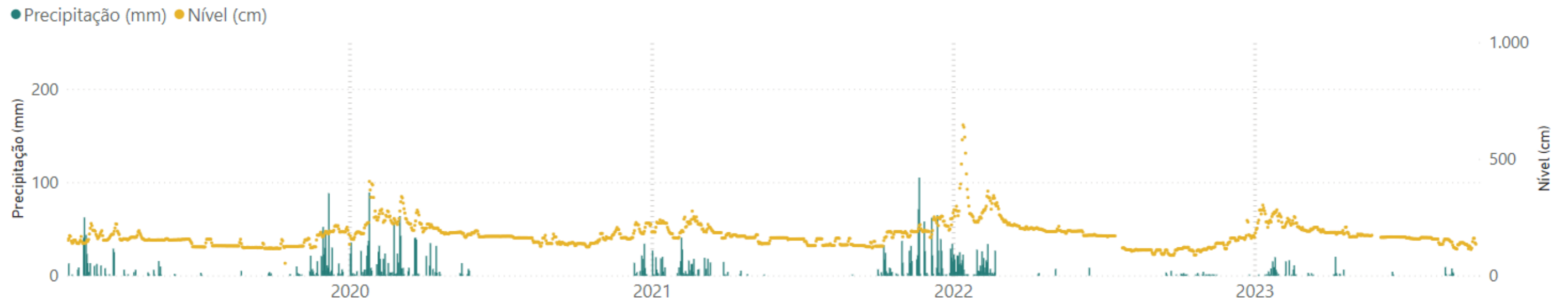
Gráfico 4.2-7 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Montante



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm).

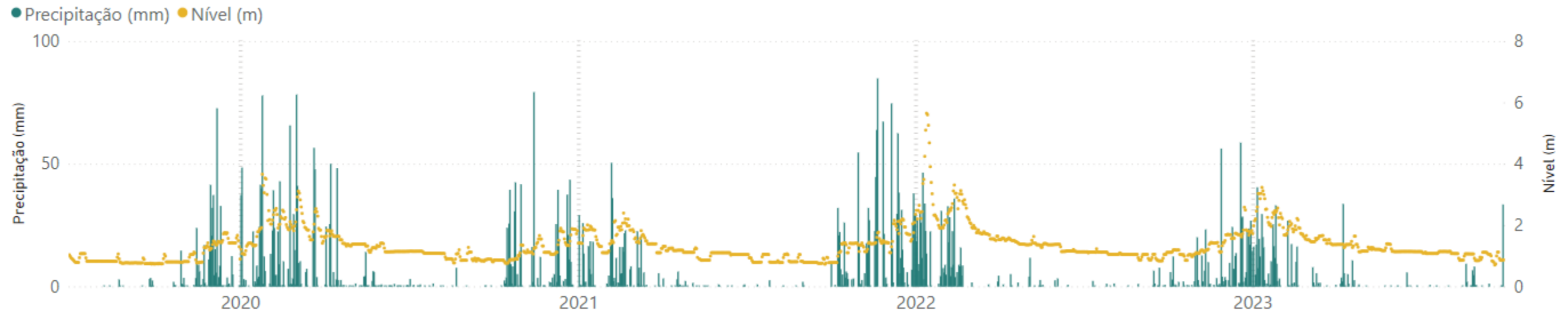
Gráfico 4.2-8 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação UHE Retiro Baixo Jusante



Fonte: Adaptado de ANA, 2023b.

Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm).

Gráfico 4.2-9 Precipitação diária acumulada e nível médio diário do período de 25 de janeiro de 2019 a 26 de setembro de 2023 na estação AUT_JRB-01



Fonte: Clean Environmental Brasil, 2023¹. Nota: Os espaços em branco refletem a falta de registro de dados de nível d'água (cm).

¹ Para este documento, os resultados de pluviometria das estações operadas pela Clean estão disponibilizados no Sistema de Telemetria de Recursos Hídricos, com acesso através do site www.nocampo.clean.com.br.

Baseado nas informações anteriores, é compreendido que as variações fluviométricas, especialmente nos períodos sazonais chuvosos, são aspectos hidrodinâmicos de forte influência na qualidade das águas de um corpo hídrico por meio do arraste de sedimentos via escoamento superficial na bacia, ressuspensão de material nas calhas dos cursos de água, processos erosivos e de assoreamento atrelados às variações de velocidade e nível da água.

Por outro lado, nos períodos de estiagem, as precipitações que ocorrem pontualmente, e com valores mais reduzidos, dificilmente causam consequências perceptíveis nos corpos hídricos, tendo em vista o potencial de abstração inicial da bacia, que representa a parcela da precipitação absorvida pelo solo ou retida por vegetação e obstáculos antes do início do escoamento superficial (precipitação efetiva) na seção de controle (SHEEDER *et al.*, 2002). Esta condição resulta em uma diminuição do potencial de transporte de sedimentos das áreas de drenagem. Além disso, reduz-se a energia hidráulica no leito do rio, o que contribui para a diminuição da capacidade de ressuspensão de materiais sedimentados anteriormente. Em contrapartida, eventos de precipitação fora do comum, caracterizados por maior intensidade e duração mais prolongada, podem levar a consequências mais severas nos cursos hídricos mesmo nos períodos de estiagem.

Neste contexto, conforme previamente mencionado, as precipitações registradas no mês de abril/2023 foram atipicamente mais intensas, resultando em um índice pluviométrico superior à média regional de referência. Tal cenário ocasionou um aumento correspondente nos níveis e vazões do rio Paraopeba durante esse período, potencialmente culminando em elevações nas concentrações de parâmetros que influenciam a qualidade da água.

Complementarmente, pode-se considerar que as operações de vertimento e turbinamento da Usina Hidroelétrica de Retiro Baixo, localizada no trecho final do rio Paraopeba, são reflexos do comportamento hidrológico da bacia como um todo. Tendo em vista as oscilações das vazões que adentram o reservatório, o barramento da usina é responsável por reter os volumes necessários para a geração de energia e/ou liberar os volumes excedentes, de modo a assegurar a segurança da estrutura.

O **Gráfico 4.2-10** ilustra as variações nas vazões vertidas, turbinadas e defluentes (a soma das vazões vertidas e turbinadas) na UHE Retiro Baixo durante diferentes períodos de estiagem. Nota-se que, nos períodos de estiagem de 2020 e 2022, que seguiram períodos chuvosos mais intensos (2019/2020 e 2021/2022), as vazões turbinadas no barramento foram consideravelmente mais altas. Em contraste, durante as estiagens de 2019 e 2021, observou-se que as vazões vertidas foram mais frequentes e elevadas. Além disso, a estiagem/2023 exibiu um padrão similar, porém ligeiramente mais atenuado em comparação com a estiagem/2022, especialmente no que se refere à distribuição das vazões vertidas e às vazões defluentes.

Em sínteses, durante a estiagem/2023, observa-se que, em termos de média e mediana, as vazões defluentes apresentam os maiores volumes no mês de abril. Isso reflete a transição sazonal e os resquícios da influência do período chuvoso anterior. A redução gradual dessas

vazões ocorre até setembro, conforme esperado durante essa condição sazonal. Em geral, destaca-se que as médias dos valores não diferem expressivamente dos valores medianos nos distintos períodos de estiagem, indicando poucas variações expressivas ao longo do período. A diferença dessas métricas pode indicar que existem valores muito discrepantes do conjunto de dados, ao passo que, valores próximos indicam um conjunto de dados com valores bem distribuídos.

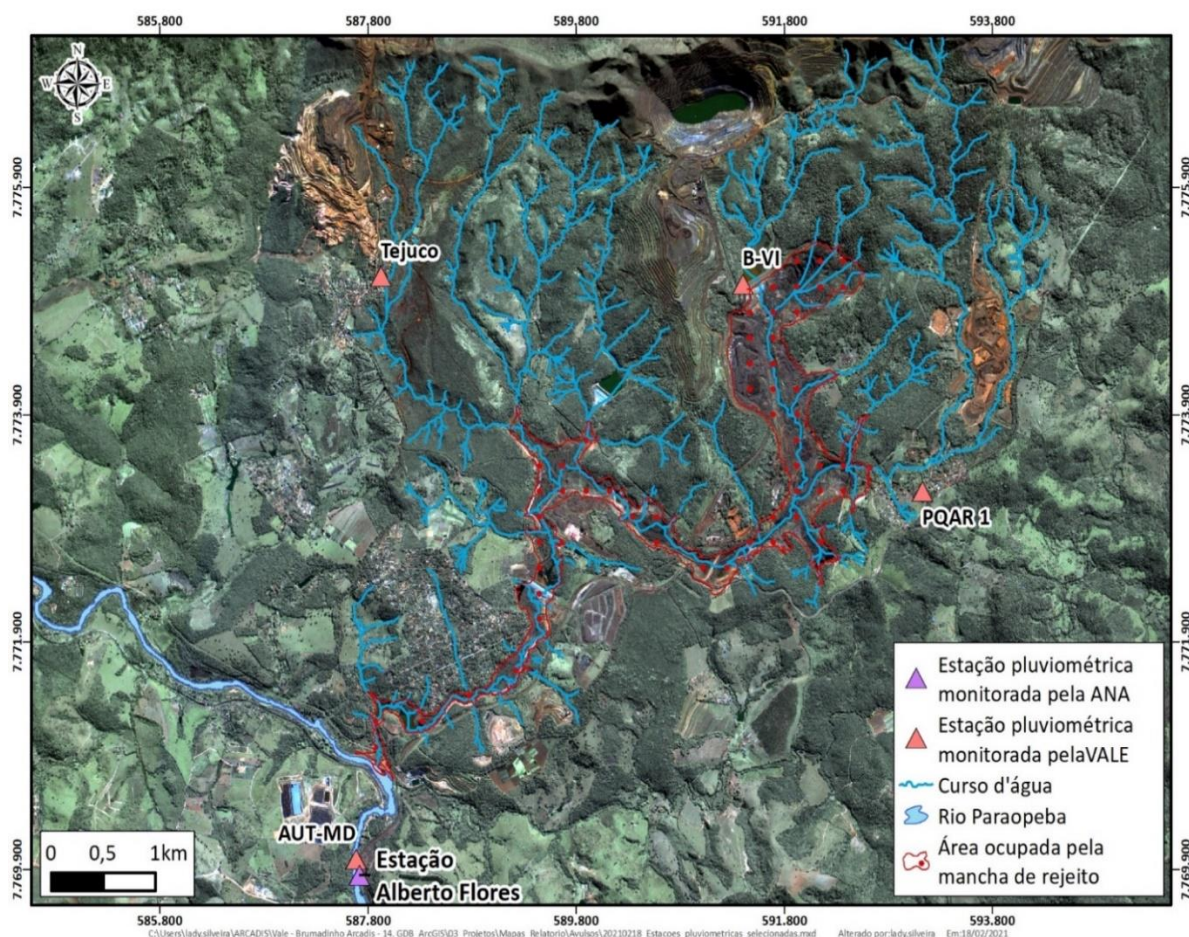
Gráfico 4.2-10 Operação da UHE Retiro Baixo nos períodos de estiagem tendo em vista as vazões vertidas, turbinadas e defluentes


Fonte: ANA, 2023a.

4.3. Ribeirão Ferro-Carvão

Para uma caracterização hidrológica mais específica da região da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão, foram analisados os dados reportados pelas estações pluviométricas AUT-MD (cuja proximidade faz com que os dados auxiliem na caracterização), Córrego Feijão (PQAR1), Barragem VI e Tejuco monitoradas pela Vale, que tiveram as operações iniciadas a partir de 2020. Destaca-se que a estação AUT-MD não está na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, mas devido a proximidade os seus dados auxiliam na caracterização. Na **Figura 4.3-1**, podem ser visualizadas as localizações das referidas estações de monitoramento, além da localização da estação Alberto Flores, gerida pela ANA.

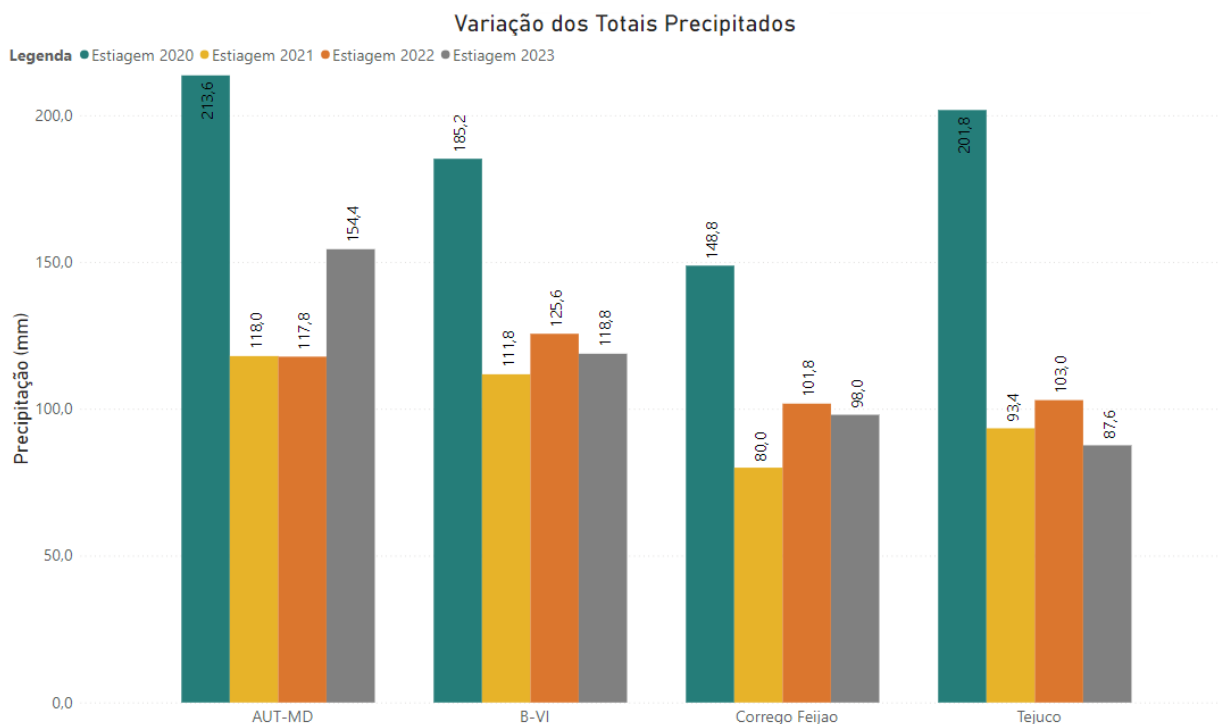
Figura 4.3-1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores



O **Gráfico 4.3-1** apresenta o histograma de variação dos totais precipitados registrados pelas estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI e Tejuco nos períodos sazonais de estiagem/2020 a estiagem/2023. Em todas as estações, verifica-se redução significativa dos volumes precipitados comparando-se na estiagem/2021 em comparação a

estiagem/2020. Do mesmo modo, houve redução da precipitação na estiagem/2023 em relação a estiagem/2022, exceto para a estação AUT-MD, que exibiu aumento. Para todas as estações (com exceção da AUT-MD), os menores registros acumulados ocorreram na estiagem/2021.

Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem de 2020 a 2023

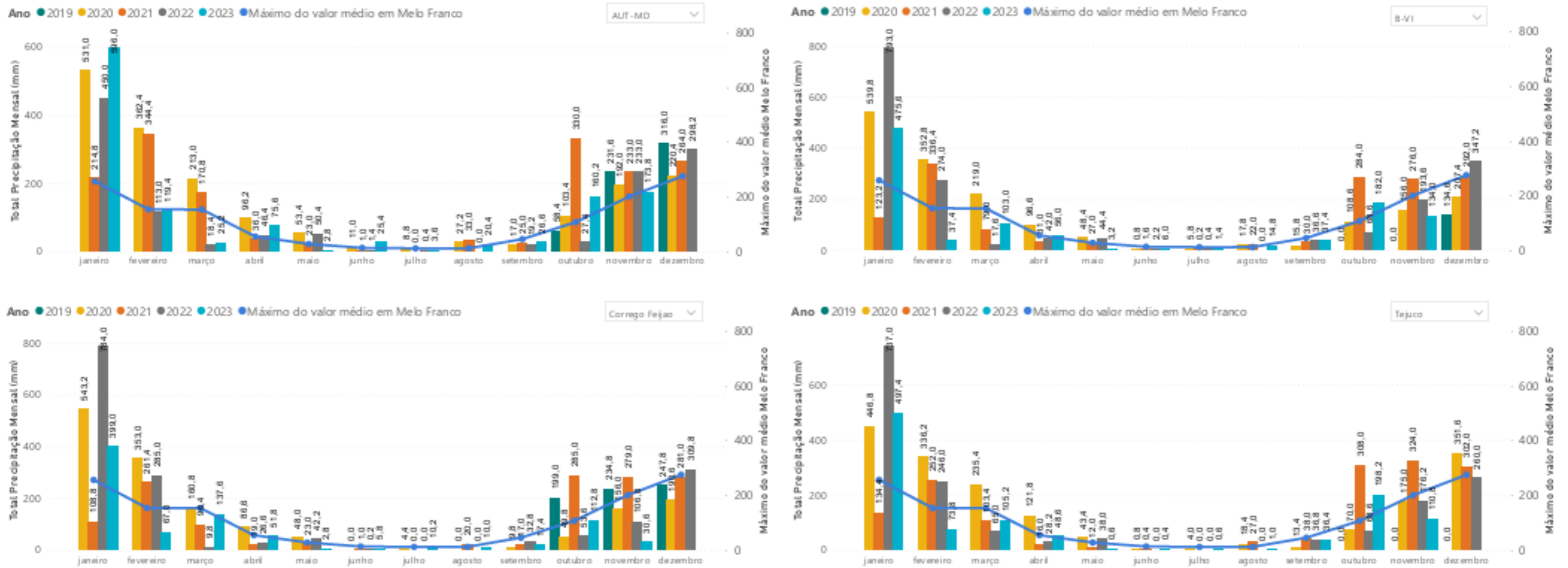


Fonte: Adaptado de Vale², 2023; ANA, 2023b.

Os totais precipitados acumulados mensais (mm) nas estações pluviométricas localizadas no ribeirão Ferro-Carvão foram comparados às médias mensais históricas de precipitações reportadas pela estação Melo Franco (**Gráfico 4.3-2**). Consoante ao gráfico supracitado, nota-se que as precipitações totais mensais no período de estiagem/2023 foram inferiores às médias mensais da estação Melo Franco nos meses de maio, julho e setembro em todas as estações, enquanto o mês de abril apresentou precipitações totais mensais superiores às médias mensais da estação Melo Franco.

² Para este documento, os resultados de pluviometria das estações B-VI, Córrego do Feijão e Tijuco apresentados foram disponibilizados internamente pela Vale S.A, enquanto da estação AUT-MD está disponibilizado no Sistema de Telemetria de Recursos Hídricos, com acesso através do site www.nocampo.clean.com.br.

Gráfico 4.3-2 Total precipitado mensal (mm) para as estações B-VI, Córrego do Feijão, Tijuco e AUT-MD e médias mensais históricas de precipitações da estação Melo Franco.



Fonte: Vale, 2023; Clean Environmental Brasil, 2023³.

³ Para este documento, os resultados de pluviometria das estações B-VI, Córrego do Feijão e Tijuco apresentados foram disponibilizados internamente pela Vale S.A, enquanto da estação AUT-MD está disponibilizado no Sistema de Telemetria de Recursos Hídricos, com acesso através do site www.nocampo.clean.com.br.

4.4. Considerações

Após a análise do período de estiagem/2023, observa-se, de maneira geral, que os índices pluviométricos foram mais elevados em comparação com a estiagem/2022, sendo os valores mais expressivos nas porções mais a montante e central da bacia. Vale ressaltar que a estação Ponte Nova do Paraopeba foi a única a registrar uma redução nos índices de pluviometria na estiagem/2023 em relação à estiagem/2022. Contudo, como mencionado anteriormente, essa estação apresentou uma lacuna nos registros de dados entre 17/08/2022 e 17/06/2023, comprometendo os três primeiros meses do período de estiagem/2023.

Destaca-se que abril/2023 registrou os maiores acumulados de precipitação entre todos os meses da estiagem, com as maiores ocorrências (> 100 mm/mês) nas estações Alberto Flores e Belo Vale. Para maio, junho e julho, houve uma redução generalizada nas precipitações acumuladas. O mês de agosto apresentou um aumento nos totais acumulados, enquanto setembro demonstrou uma redução na pluviosidade, apesar dos incrementos registrados no final do mês.

Na região do ribeirão Ferro-Carvão, por sua vez, o comportamento pluviométrico de suas estações, em geral, seguiu tendência aproximada ao que se observa nas demais estações do rio Paraopeba, próximas à referida região para o período de estiagem/2023, indicando precipitações mais elevadas em abril/2023, redução ao longo dos meses seguintes e breve aumento ao final de setembro/2023.

5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de estiagem tendo em vista o *baseline* (sazonal) do corpo hídrico

5.1. Objetivo

No presente item serão avaliadas as alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, tendo em vista o *baseline* sazonal (estiagem) do citado corpo hídrico.

5.2. Metodologia

Para a avaliação da qualidade da água do rio Paraopeba serão analisados os resultados dos parâmetros majoritários (Manganês total, Manganês dissolvido, Ferro total, Ferro dissolvido, Alumínio total, Alumínio dissolvido e Turbidez), além do parâmetro Fósforo total ao longo do tempo e do espaço nos períodos de estiagem.

Em 2022, por solicitação da empresa AECOM, o parâmetro Fósforo total foi inserido nas avaliações de qualidade das águas superficiais com maior detalhamento, assim como é realizado para os parâmetros majoritários. Ressalta-se que após o rompimento da barragem B1 e o arraste de rejeitos das barragens B4 e B4A foi observado um aumento dos teores de fósforo na água nas regiões Ferro-Carvão até 1B e em 2B (ARCADIS, 2022d). Redução desses teores foi observada a partir de 2019, porém com variações ao longo dos diferentes períodos de estiagem avaliados. O estudo Geoenviron (2019) apontou a presença de baixos conteúdos de Fósforo no rejeito, assim como o estudo da Arcadis sobre a caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba (ARCADIS, 2020c). Ainda, o PROJETO ENTIRE (2023), através da modelagem de fósforo em água superficial, indicou aumento da carga de fósforo para o período pós-rompimento. Contudo, ressalta-se que não foi possível associar tal elemento apenas às contribuições do rejeito, em função de outros fatores inerentes ao uso e ocupação do solo e controle geológico da região onde a bacia está inserida. Dessa forma, o fósforo será avaliado de forma mais precisa para identificação de seu comportamento espaço-temporal no rio Paraopeba em função do rompimento da barragem B1 e o arraste de rejeitos das barragens B4 e B4A.

Os demais elementos traço, apresentaram concentrações majoritariamente baixas e pouco variáveis ao longo dos períodos monitorados, sendo que, na estiagem/2023, ocorreram violações pontuais apenas para Chumbo total, Níquel total e Zinco total. Esses parâmetros apresentaram MAD (desvio mediano absoluto) igual a zero e a maioria dos resultados foram

inferiores ao limite de quantificação do método analítico, indicando variabilidade insuficiente para serem utilizados nos testes estatísticos (SABINO *et al.*, 2014). A avaliação mais detalhada desses parâmetros em comparação com os limites definidos na legislação será apresentada no item 6 deste relatório (evolução das violações aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba).

Conforme evidenciado nos estudos "DISPERSÃO DE REJEITOS NA CARGA DE FUNDO DO RIO PARAPEBA APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM BI, 2ª CAMPANHA (2020)" (ARCADIS, 2021b) e "RELATÓRIO EXECUTIVO CONSOLIDADO TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS E REJEITOS AO LONGO DO RIO PARAPEBA E RESERVATÓRIOS DE RETIRO BAIXO E TRÊS MARIAS" (ARCADIS, 2021d), corroborados pelas notas técnicas nº 20/IGAM/GEMOC/2021 (IGAM, 2021) e nº 32/IGAM/GMHEC/2021 (IGAM, 2021a), não foi possível identificar interferência dos rejeitos provenientes das barragens na qualidade das águas das regiões 2D e 3. Sendo assim, serão avaliados estatisticamente os resultados das regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C.

5.2.1. Estatística descritiva e inferencial

Previamente à análise descritiva e inferencial dos resultados do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água nos períodos de estiagem, visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas, foi empregada a Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR *et al.*, 2005). Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (clusters) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos parâmetros⁴ com variabilidade suficiente para explicar a relação entre os pontos monitorados, para dois espaços temporais distintos: considerando todo o período de monitoramento, de janeiro/2019 a setembro/2023; e o último ano hidrológico completo (outubro/2022 a setembro/2023). A mediana dos dados foi empregada devido às diferentes frequências amostrais ao longo do período de monitoramento, visto que a análise considera a obrigatoriedade de que todos os pontos do espaço amostral tenham resultados.

Após a análise exploratória multivariada de *Cluster*, para a avaliação espacial e temporal do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais, foram utilizados gráficos do tipo *boxplots*. Estes compreendem recurso visual que permite resumir de forma gráfica a estatística descritiva aplicada aos resultados de monitoramento para exibir medidas como a mediana, percentis (25 e 75) e os valores pontuais máximos e mínimos, além de *outliers*. Portanto, apresentam valores de tendência central (medianas), dispersão e simetria dos

⁴ Alumínio dissolvido, Alumínio total, Bário dissolvido, Bário total, Cálcio total, Carbono orgânico total, Chumbo total, Cloreto, Clorofila-a, Cobre total, Coliformes Termotolerante, Escherichia Coli, Condutividade elétrica, Cor verdadeira, Ferro dissolvido, Ferro total, Fósforo dissolvido, Fósforo total, Magnésio total, Magnésio dissolvido, Manganês total, Nitrato (como N), Nitrito (como N), Nitrogênio amoniacal, Nitrogênio orgânico, Oxigênio dissolvido, pH, Sólidos dissolvidos totais, Sólidos suspensos totais, Sólidos totais, Sulfato, Turbidez e Zinco total.

resultados das análises realizadas nas regiões monitoradas, comparando-os aos *baselines* sazonais históricos de cada região (Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C).

Para a análise dos dados de monitoramento pós rompimento e comparação ao *baseline* por meio dos gráficos *boxplots*, foram agrupados os pontos de monitoramento da Vale e os pontos da rede do IGAM localizados em cada região. No Item 3 (Premissas), é apresentada tabela com a relação dos referidos pontos. Destaca-se que os *baselines* de estiagem para as regiões Montante, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C correspondem aos dados públicos históricos do período de 2000 a 2018, oriundos das estações de monitoramento localizadas na CH SF3. Para o ribeirão Ferro-Carvão, os dados históricos utilizados para a composição do *baseline* foram representados pelos pontos FEI-COR-07, FEI-COR-01 e FEI-COR-03-AS, referentes ao monitoramento da qualidade da água executado pela Vale entre 2004 e 2018, para o atendimento das condicionantes 11 e 16 da Licença de Operação 211/2011 da Mina do Córrego do Feijão (ver item 3-Premissas Adotadas).

Para corroborar a análise descritiva apresentada nos *boxplots* e identificar a existência de diferença significativa dos parâmetros de qualidade da água na estiagem entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) em cada região (comparação temporal), foi aplicado o teste de hipóteses não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn (quando identificada diferença significativa no teste de Kruskal-Wallis), ao nível de significância de 5% (KRUSKAL; WALLIS, 1952; DUNN, 1964). As comparações também foram realizadas por ponto e os resultados constam no **ANEXO VII**.

Os bloxpot, tabelas e resultados dos testes estatísticos mapas/tabelas neste anexo estão discretizados da seguinte forma:

- No **Anexo VII-A**, estão os boxplot, por ponto de monitoramento, dos pontos localizados no rio Paraopeba, agrupados por região, para cada período de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023);
- No **Anexo VII-B**, estão apresentadas as tabelas com as métricas estatísticas utilizadas especificamente para a geração dos gráficos *boxplots*, por região, para os parâmetros majoritários e os demais;
- No **Anexo VII-C**, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência. Incluindo a avaliação de Mann-Whitney (valor-p) para verificação da sazonalidade e os valores da estatística de teste do Mann-Kendall/Sazonal de Mann-Kendall.

O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis é aplicado com o objetivo de comparar três ou mais amostras independentes entre si. Parte da hipótese nula (H_0) de que não há diferença significativa entre as amostras comparadas; e da hipótese alternativa (H_A) de que existe diferença significativa em pelo menos uma das amostras em relação às demais. No caso de rejeição da hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis (valor-p $\leq 0,05$), sabe-se que há alguma diferença entre as amostras comparadas. No entanto, não se sabe quantas diferenças são e

nem entre quais amostras elas se encontram. Para concluir quais amostras são significativamente diferentes entre si, é aplicado o teste não paramétrico de comparações múltiplas de Dunn, que compara todos os possíveis pares entre as amostras analisadas (HELSEL; HIRSCH, 2002).

Para as avaliações estatísticas, os LQs foram padronizados em função da existência de múltiplos valores, sendo considerado o menor valor de LQ, e este foi dividido por dois.

5.2.2. Análise de tendência temporal

A ordem de ocorrência das observações no tempo é crucial para o entendimento da tendência das concentrações dos parâmetros que interferem na qualidade das águas (CHRISTÓFARO; LEÃO, 2009). Uma série temporal pode ser definida, assim, como um conjunto de informações arranjadas em ordem cronológica.

O teste de Mann-Kendall (HELSEL e HIRSCH, 2002; TRINDADE, 2013; TRINDADE et al., 2017) é indicado como um teste para verificar se os valores da série temporal tendem a aumentar ou a diminuir com o tempo (mudança monotônica). Para a sua execução, nenhuma suposição quanto à normalidade dos dados é requerida (HELSEL e HIRSCH, 2002) e, quando comparado a outros testes paramétricos, ele apresenta maior robustez quanto a desvios de normalidade e não-estacionariedade dos dados da série histórica, justificando o amplo uso em estudos de tendência (BLAIN, 2011).

Em síntese, o teste de Mann-Kendall (MK) define se os valores de um determinado parâmetro Y tendem a diminuir ou aumentar à medida que o tempo T aumenta. A estatística de S de Kendall é computada pela comparação de todos os pares Y e T (concentração do parâmetro e tempo) e mede a dependência monotônica de Y em T. Já o método da Inclinação de Sen (SEN, 1968) é utilizado para calcular a magnitude das tendências (DA SILVA et al., 2015). Se o resultado da estatística S de Kendall e da curva forem positivos, é indicada uma tendência de elevação ao longo do tempo e, ao contrário, se negativos, evidencia tendência de redução nos valores dos dados.

Em programas de monitoramento, há a eventual ocorrência de falhas nas medições de uma determinada série, seja por questões no campo (ex: falta de acesso), no trajeto (ex: frasco quebrar) ou no laboratório (ex: questões invalidadas na etapa de QA/QC como o *holding time*). Essas falhas foram identificadas nas séries de dados de águas superficiais e de sedimentos do Plano de Monitoramento Emergencial da Qualidade da Água e Sedimento (PME). Além disso, conforme citado no **item 3.2** o PME passou por revisões desde o início de sua execução, conforme necessidades específicas, e a frequência de monitoramento foi objeto de algumas dessas alterações.

Em testes estatísticos de tendência temporal é habitual o preenchimento de falhas eventuais, por meio de estimativas e interpolações. Grandes lacunas de dados podem, no entanto, fazer com que a série perca sua continuidade e padronização do tempo, o que pode, muitas vezes, trazer mais incertezas para análise do que consistência a ela.

Nesse contexto, para o presente estudo, optou-se por aplicar o teste de tendência temporal em dados medianos mensais de cada ponto de amostragem no caso da água superficial, de forma a se ter uma série temporal homogênea. A decisão de se trabalhar com a métrica estatística mediana mensal nesta matriz foi baseada nos seguintes fatores:

- A análise do teste ganha robustez com séries contínuas/padronizadas no tempo (SANTOS, 2012), além de não sofrer interferência das diferentes frequências de amostragem.
- Torna-se possível utilizar, quando necessário, o teste Sazonal de Mann-Kendall.

De forma ilustrativa, a **Figura 5.2-1** mostra, do ponto de vista exploratório, como fica a avaliação temporal dos dados brutos (sem a compilação em uma métrica estatística). É possível identificar o comportamento das concentrações de manganês total ao longo dos anos em termos de variabilidade, tendência e densidade amostral. A **Figura 5.2-2** ilustra a mesma série de dados brutos em ordem sequencial (1º ao último dia de coleta) para o teste de Mann-Kendall. Cronologicamente, os dados ficam distribuídos de forma heterogênea, ou seja, a maior parte da série é constituída por concentrações analisadas no ano de 2019, restando uma menor parte para o ano de 2020. Por último, a **Figura 5.2-3** apresenta as concentrações medianas mensais, com espaçamento padronizado do tempo.

Figura 5.2-1 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos)

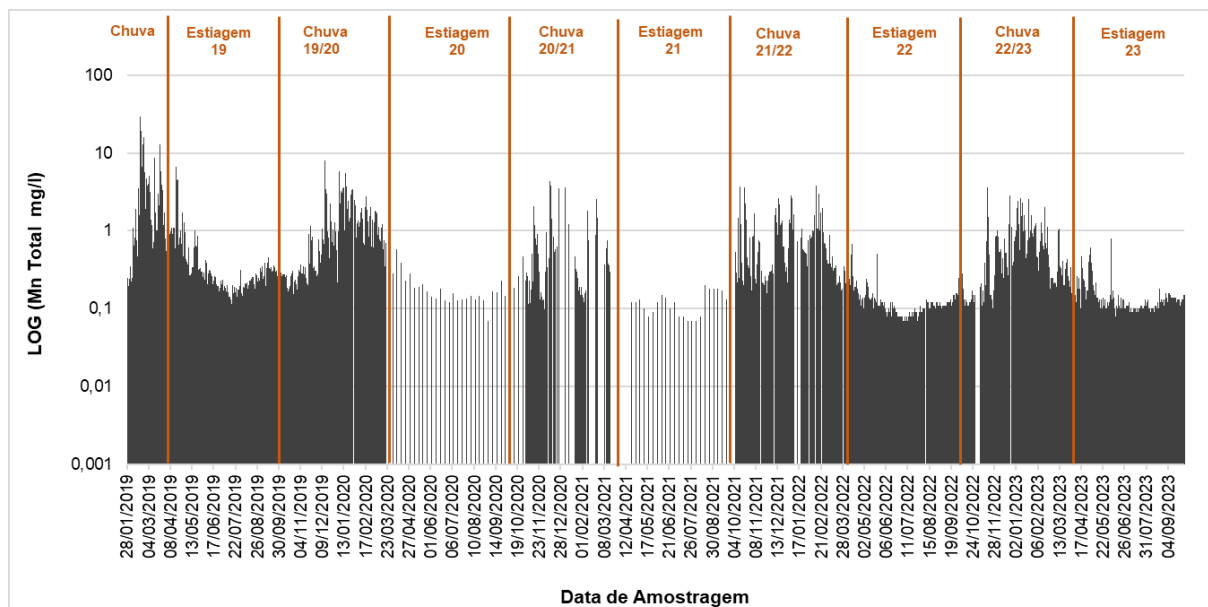


Figura 5.2-2 Série temporal de Manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos)

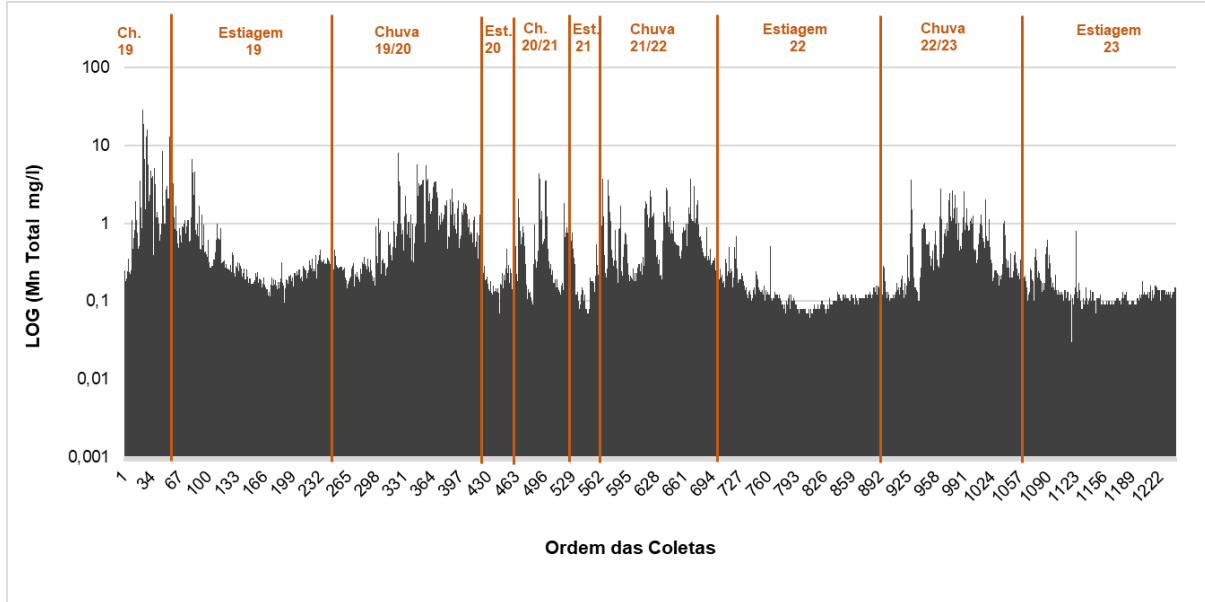
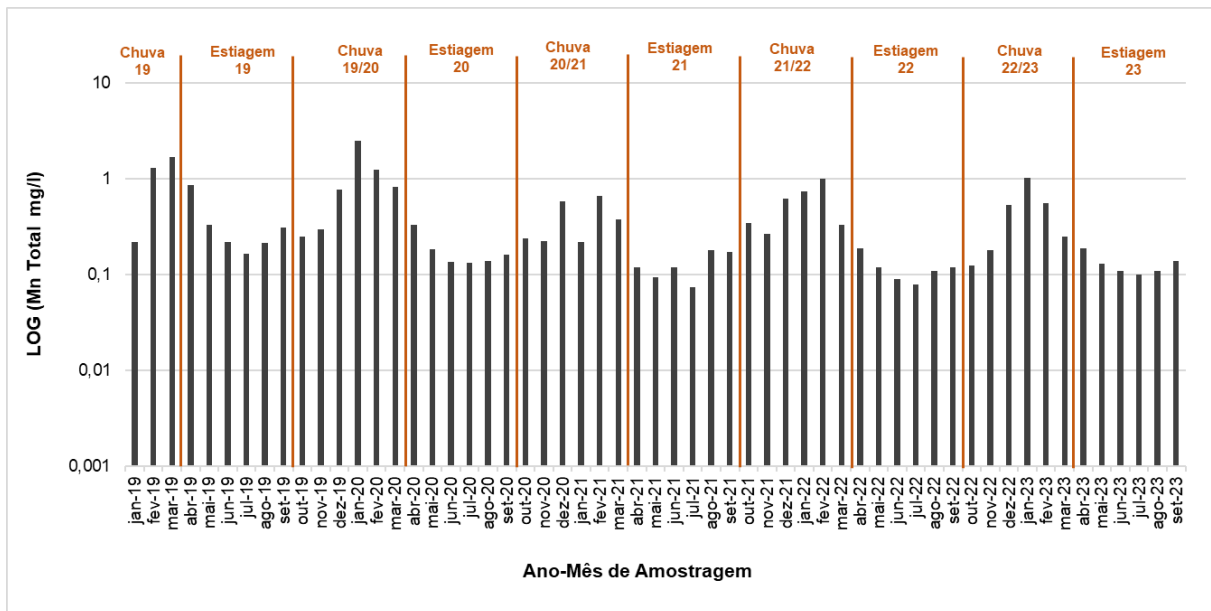


Figura 5.2-3 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais)



Os resultados dos testes de tendência temporal considerando os dados de 2019 permitem entender o comportamento das concentrações ao longo do tempo, tendo como marco inicial os meses próximos ao rompimento. Seguindo a recomendação da Nota Técnica AECOM Nº 60622935-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0002-2023, de modo a complementar esse tipo de análise, para compreender o comportamento da qualidade da água foram feitos os testes de tendência

temporal desconsiderando os meses mais próximos ao rompimento (janeiro/2019 a setembro/2019).

Sendo assim, como já mencionado, a análise de tendência temporal, para os pontos de monitoramento foi realizada individualmente para cada um dos parâmetros de qualidade da água selecionados (Manganês total, Manganês dissolvido, Ferro total, Ferro dissolvido, Alumínio total, Alumínio dissolvido, Turbidez e Fósforo total) considerando a métrica mediana mensal.

Cabe destacar, ainda, que, em termos de número de amostras, o conjunto de dados é robusto, mas em questão de tempo tem-se uma série temporal ainda pequena constituída por cinco ciclos chuvosos e cinco de estiagem. Logo, os resultados do teste de tendência temporal são apresentados como uma ferramenta complementar da análise estatística descritiva e inferencial apresentada anteriormente (gráficos *boxplots* e testes de hipóteses).

Primeiramente, a tendência temporal da série de dados completa foi avaliada, desde o início do monitoramento até o final do período de estiagem/2023, sem distinção dos períodos de chuva e estiagem. Como passo anterior à análise de tendência temporal, a influência da sazonalidade nos dados foi verificada por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney, ao nível de significância $\alpha = 5\%$. O teste de Mann-Whitney é aplicado com o objetivo de comparar duas amostras independentes entre si (HELSEL; HIRSCH, 2002). O teste foi aplicado partindo da hipótese nula (H_0) de que não há diferença significativa dos resultados entre os períodos de chuva e de estiagem; e da hipótese alternativa (H_A) de que os valores são significativamente diferentes entre os períodos de chuva e de estiagem. Para os casos em que não houve diferença significativa entre os dois períodos sazonais (valor-p > 0,05), não foi considerada a influência da sazonalidade nos dados e o teste de Mann-Kendall foi aplicado. Nos casos em que o valor-p do teste foi significativo (valor-p \leq 0,05), foi considerada a existência de influência da sazonalidade nos dados e a tendência temporal dos parâmetros foi verificada pela aplicação do teste Sazonal de Mann-Kendall.

Posteriormente, a tendência temporal foi avaliada para a série de dados dos períodos de estiagem separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de estiagem. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados. Os resultados do teste de tendência temporal para os períodos de chuva monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/04/2023 (ARCADIS, 2023a).

Nesta avaliação estatística, os LQs também foram padronizados em função da existência de múltiplos valores, sendo considerado o menor valor de LQ, e este foi dividido por dois.

5.2.3. Mapas temáticos - *baseline*

Buscando-se uma apresentação da informação em um contexto mais didático e visual, foram confeccionados mapas temáticos que permitem visualizar o comportamento dos parâmetros

Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez e Fósforo total em relação as métricas de *baseline* sazonal (compilado dos dados pré-rompimento referente aos anos de 2000 a 2018, discretizados por período sazonal de chuva e estiagem) e VMP, ao longo da bacia do rio Paraopeba durante os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

A métrica utilizada para o *baseline* é o valor máximo do parâmetro, considerando os pontos do IGAM contemplados na região analisada (Montante a Região 2C). Quanto aos dados da Vale, estes correspondem aos valores máximos dos pontos pós-rompimento e referentes ao Plano de Monitoramento Emergencial (PME) para a bacia do rio Paraopeba, em suas respectivas regiões.

Essa avaliação acrescenta uma camada adicional às diversas análises, com distintas métricas, que serão apresentadas neste capítulo, com especial atenção aos valores máximos e, portanto, às condições mais críticas observadas durante os períodos analisados. Importante ressaltar que a ênfase nos valores máximos não busca simplificar a complexidade do comportamento do corpo hídrico, mas sim destacar situações potencialmente mais críticas no contexto das análises realizadas no âmbito do PME. Compreende-se, no entanto, que tais eventos podem estar relacionados a comportamentos específicos do corpo hídrico, influenciados por condições hidrometeorológicas singulares ou extemporâneas ou intervenções antrópicas pontuais. As cores utilizadas refletem o resultado dessa avaliação.

Os mapas/tabelas estão discretizados da seguinte forma:

- No **Anexo VIII-A** estão os mapas que demonstram a condição de distanciamento do resultado máximo do parâmetro em relação ao *baseline* sazonal;
- No **Anexo VIII-B** estão os mapas que demonstram condição de distanciamento do resultado máximo do parâmetro em relação ao seu VMP.
- No **Anexo VIII-C** consta as tabelas de frequência de aproximação ao *baseline* para cada ponto de monitoramento ao longo dos meses monitorados.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Análise de Cluster

A **Figura 5.3-1** e **Figura 5.3-2** exibem os dendrogramas resultantes da análise de cluster aplicada à matriz de água superficial, considerando dois cenários distintos: (i) todos o período de monitoramento, de janeiro/2019 a setembro/2023, e (ii) o último ano hidrológico, compreendido entre outubro/2022 e setembro/2023.

Essa abordagem foi utilizada para destacar o comportamento específico dos diversos pontos de monitoramento durante os períodos sazonais mais recentes, proporcionando, assim, uma visão mais clara da evolução ao longo do tempo.

Figura 5.3-1 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz água superficial - Todos o período de monitoramento (janeiro/2019 a setembro/2023)

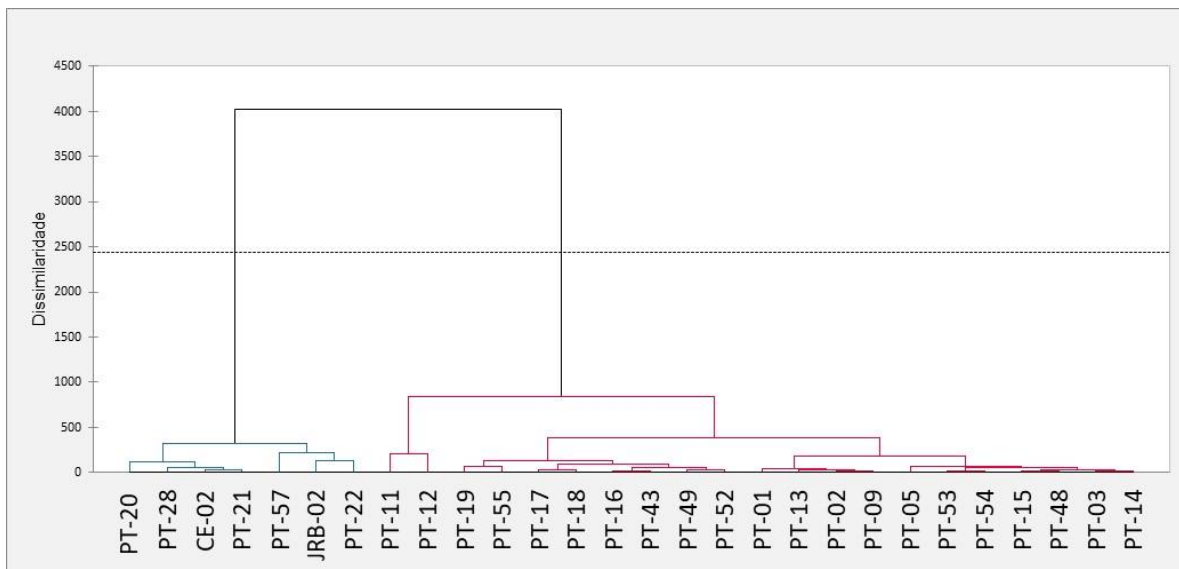
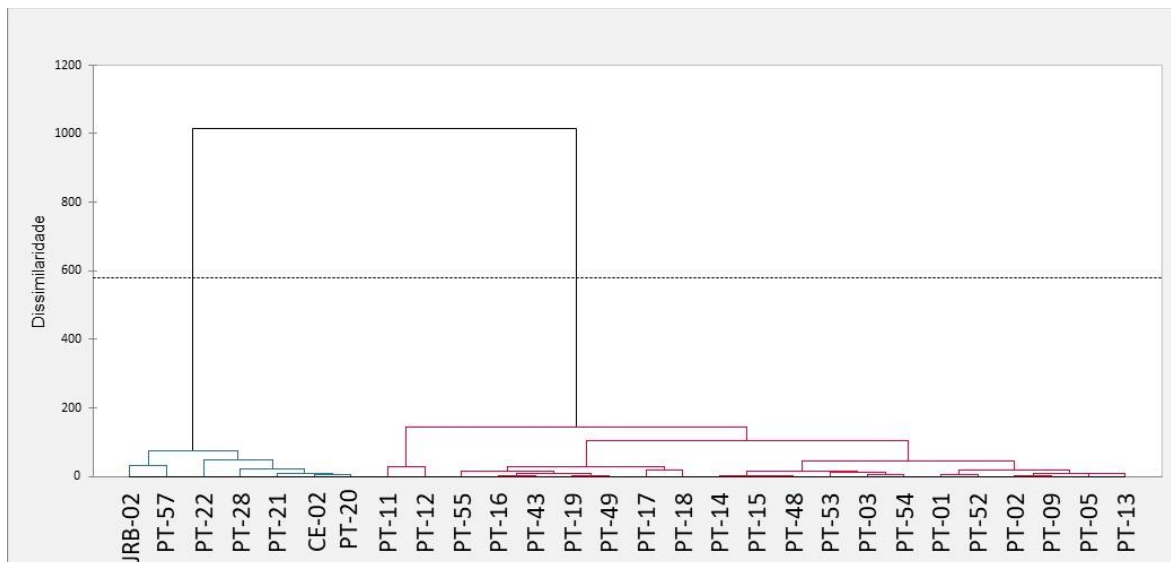


Figura 5.3-2 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz água superficial – Último ano hidrológicos (outubro/2022 a setembro/2023)



Em ambos os cenários analisados, foi indicada a manutenção de dois grandes agrupamentos: (i) Agrupamento Vermelho, composto pelos pontos de monitoramento localizados a montante da UHE de Retiro Baixo, e (ii) Agrupamento Azul, formado pelos pontos situados a partir de Retiro Baixo. Estes últimos pontos, geralmente mais distantes do trecho mais afetado pelo rompimento, apresentam, em geral, teores mais baixos nos parâmetros monitorados e uma maior proximidade com as condições de referência do corpo hídrico.

A análise da distribuição dos pontos no cenário que considera apenas o último ciclo hidrológico, são revelados comportamentos semelhantes nos agrupamentos formados, em grande parte corroborando as regiões previamente estabelecidas (Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C). No grupo vermelho, destaca-se uma maior proximidade entre os pontos no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), seguidos pela proximidade entre os pontos da Região Montante (PT-52) e os pontos nas regiões 1A (PT-01, PT-13, PT-02, PT-09, PT-05). A Região 1B (PT-03, PT-14, PT-48 e PT-15), se assemelha aos dois primeiros pontos da Região 2A (PT-53 e PT-54). Finalmente, os demais pontos da Região 2A (PT-43, PT-16, PT-17, PT-18, PT-49, PT-19 e PT-55) se agrupam em um cluster mais amplo.

Importante ressaltar que o PT-52 se destacou em termos de localização, apresentando, no cenário que considera todos os anos hidrológicos disponíveis, um comportamento mais próximo aos pontos da Região 2A, sugerindo que os pontos mais distantes do trecho mais afetado e, portanto, do rompimento, tendem a se aproximar de uma condição mais natural do corpo hídrico, sem influência do rompimento. Por outro lado, a avaliação específica do cenário considerando apenas o último ciclo hidrológico já aponta o ponto PT-52 com maior proximidade com a Região 1A, o que pode indicar relativo equilíbrio de condições entre essas regiões.

No agrupamento azul, por sua vez, encontram-se os pontos a partir de Retiro Baixo, abrangendo tanto os localizados no reservatório da UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21) quanto os situados a jusante da UHE Retiro Baixo (PT-57, CE-02, JRB-02 e PT-22). É importante destacar que a qualidade das águas nesse trecho, localizado a jusante da UHE Retiro Baixo, é influenciada, ademais, por contribuições distintas das demais regiões, enfatizando a dissimilaridade deste grupo.

5.3.2. Estatística descritiva e inferencial

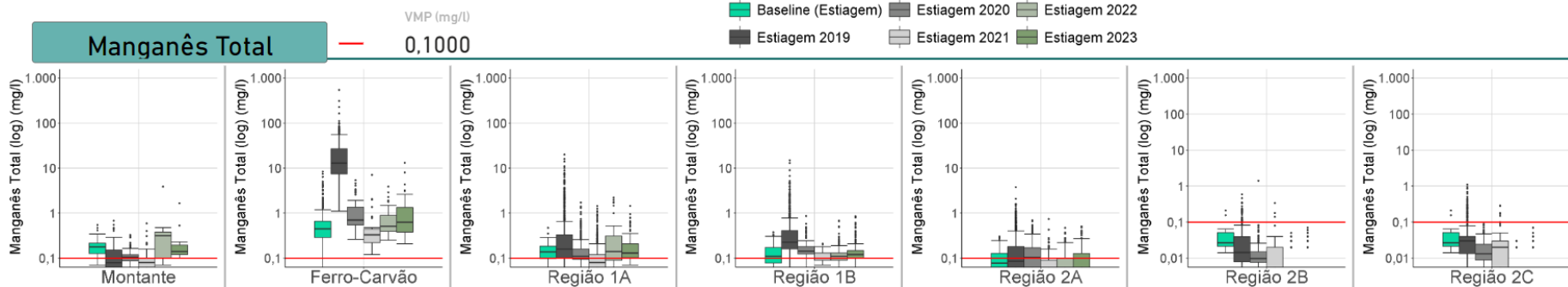
Nos itens a seguir, são apresentados os gráficos *boxplots* com os resultados de monitoramento (Manganês total, Manganês dissolvido, Ferro total, Ferro dissolvido, Alumínio total, Alumínio dissolvido, Turbidez e Fósforo total) agregados para cada período sazonal de estiagem e para cada uma das regiões. Os resultados dos testes estatísticos da comparação espacial e temporal também são apresentados e discutidos para cada um dos parâmetros mencionados. Ressalta-se, para fins de consulta, que os resultados dos períodos de chuva constam no último relatório de Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2023 (ARCADIS, 2023a).

5.3.2.1. Manganês total e dissolvido

No **Gráfico 5.3.2.1-1** a **Gráfico 5.3.2.1-4**, é apresentado os *boxplots* dos parâmetros Manganês total e dissolvido. Na **Tabela 5.3.2.1-1** e na **Tabela 5.3.2.1-3** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023)

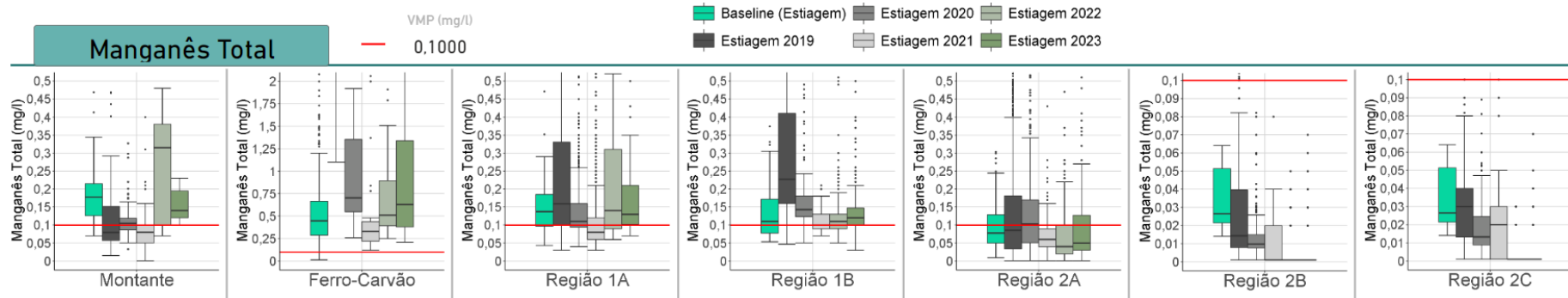
para esses parâmetros. Já na **Tabela 5.3.2.1-2** e na **Tabela 5.3.2.1-4**, são apresentados os resultados do teste de comparação temporal em cada região.

Gráfico 5.3.2.1-1 Boxplots Manganês total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa



Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.2.1-2 Boxplots Manganês total para os períodos de estiagem *baseline* estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável.



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.1-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês total.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	~
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	<	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	~
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	>
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	>
Estiagem Baseline							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	~	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	~

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

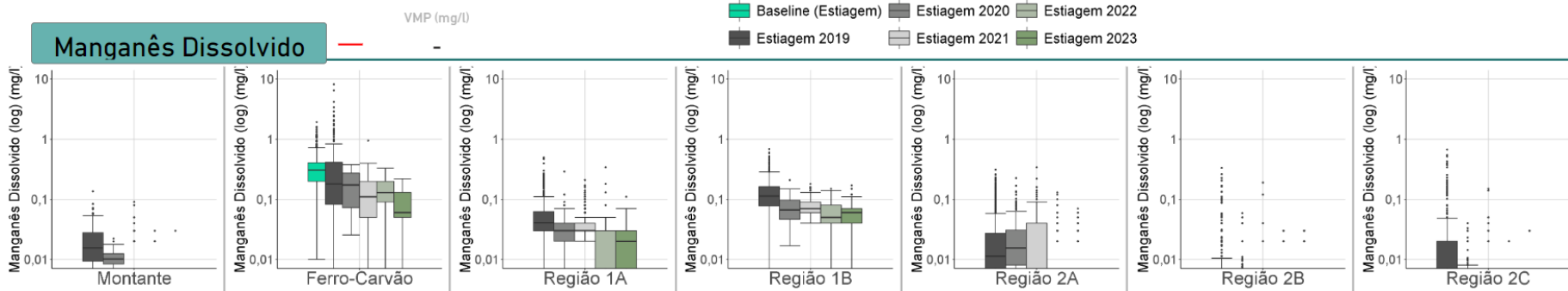
Tabela 5.3.2.1-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	>	~	~	~
Est.23 X Est.21	>	>	>	>	~	~	<
Est.23 X Est.20	~	>	>	<	<	<	<
Est.23 X Est.19	<	>	~	<	<	<	<
Est.23 X Est.Baseline	>	~	~	~	<	<	<
Est.22 X Est.21	>	>	>	~	<	<	<
Est.22 X Est.20	~	>	~	<	<	<	<
Est.22 X Est.19	<	>	~	<	<	<	<
Est.22 X Est.Baseline	~	~	~	~	<	<	<
Est.21 X Est.20	<	<	<	<	<	<	~
Est.21 X Est.19	<	<	<	<	<	<	<
Est.21 X Est.Baseline	~	<	<	~	<	<	<
Est.20 X Est.19	<	>	<	<	>	<	<
Est.20 X Est.Baseline	>	<	~	>	~	<	<
Est.19 X Est.Baseline	>	<	~	>	~	~	~

Legenda:

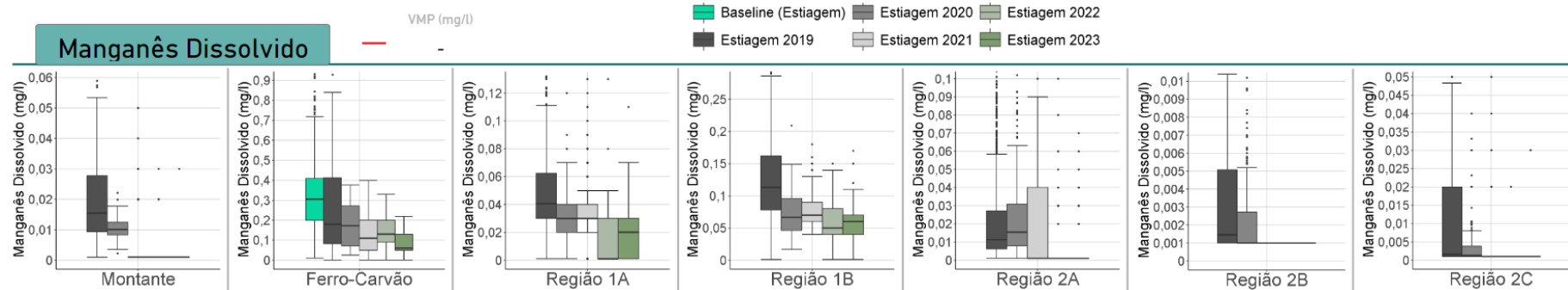
- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Gráfico 5.3.2.1-3 *Boxplots* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa.



Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.2.1-4 *Boxplots* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável.



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês dissolvido.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	~	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	~	~
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	~	~
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	~	<	<	<
Montante	-	-	>	>	>	~	~
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	~	<	<	<
Montante	-	-	>	>	>	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.1-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	<	~	>	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	~	~	<	<	<	~	<
Est.23 X Est.20	<	<	<	<	<	<	<
Est.23 X Est.19	<	<	<	<	<	<	<
Est.23 X Est.Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.22 X Est.21	~	~	<	<	<	~	<
Est.22 X Est.20	~	<	<	<	<	<	<
Est.22 X Est.19	<	<	<	<	<	<	<
Est.22 X Est.Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.21 X Est.20	~	<	>	~	<	<	<
Est.21 X Est.19	<	<	<	<	<	<	<
Est.21 X Est.Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.20 X Est.19	~	<	<	<	>	<	~
Est.20 X Est.Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.19 X Est.Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondente ao LQ

~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)

< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

O Manganês total é um parâmetro marcador do rompimento e representativo da influência da sazonalidade (chuva e estiagem) na variabilidade das concentrações ao longo do tempo e espaço. Essa condição pode ser observada não apenas nos trechos a jusante do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, como também a montante.

A resposta diferenciada entre os períodos sazonais é evidente tanto nos resultados pré-rompimento (*baseline* IGAM) quanto nos dados pós-rompimento (dados Vale). Durante os períodos chuvosos, a energia hidráulica resultante e o aumento correspondente no fluxo de água e escoamento superficial promovem o transporte e ressuspensão de materiais depositados no leito do rio Paraopeba, adicionados àqueles carregados de maneira difusa das áreas de contribuição adjacentes. Esse processo resulta em um acréscimo nas concentrações de Manganês total.

Contrariamente, no período de estiagem, objeto da presente avaliação, quando a pluviometria exerce menor influência nos níveis/vazões fluviais, observa-se uma redução na variabilidade das concentrações desse analito, com predominância de resultados mais amenos em comparação com o período chuvoso. Entretanto, é importante salientar que registros mais elevados de Manganês total durante a estiagem podem ocorrer, estando relacionados tanto aos efeitos das chuvas do período sazonal anterior quanto às chuvas atípicas de maior intensidade que ocorrem dentro do próprio período de estiagem.

Do ponto de vista espacial, ao considerar os períodos de estiagem discretizados, é evidente um padrão consistente entre as estiagens de 2019 e 2020. As regiões 1A e 1B, particularmente afetadas após o rompimento, apresentam concentrações significativamente superiores à Região Montante. Essa disparidade sugere uma relação entre essas regiões e a natureza dos rejeitos presentes nesses trechos fluviais. Notavelmente, a Região 1B exibe concentrações mais elevadas do que a Região 1A, enquanto se observa redução progressiva entre as regiões subsequentes 2A e 2B. A Região 2C, por sua vez, apresenta teores significativamente inferiores que a região anterior, possivelmente por estar submetida a outros aspectos de influência nas áreas incrementais de contribuição a jusante da barragem de Retiro Baixo.

Em parte, o comportamento espacial do Manganês total na estiagem/2021 se assemelha aos períodos de 2019 e 2020, exceto por uma evidente melhora da Região 2A em relação à Região Montante e por uma aproximação de comportamento entre as regiões 2B e 2C.

A partir da estiagem/2022, observa-se a inexistência de diferenças significativas entre as regiões Montante, 1A e 1B, evidenciando um equilíbrio de comportamento, padrão que também se mantém na estiagem/2023. Nota-se, neste último período sazonal, uma melhoria perceptível na Região 2C em relação à Região 2B. Em última análise, ao comparar os resultados da estiagem/2023 com a avaliação dos dados específicos de *baseline* (pontos do IGAM), destaca-se a notável convergência com o comportamento espacial pretérito do sistema.

Através do teste de comparação temporal, ao considerar diferentes períodos de estiagem, nota-se que, para a Região Montante, o período de estiagem/2023 apresentou uma elevação significativa em relação aos períodos sazonais anteriores. No entanto, exceção é observada quando esse período é comparado com a estiagem/2022 e com o *baseline*, indicando, nesses casos, a ausência de diferença significativa e aproximação com as condições pretéritas ao rompimento. Um cenário semelhante foi identificado para a estiagem/2022 ao compará-la com estiagens anteriores, demonstrando que as concentrações de Manganês total foram significativamente mais elevadas do que nos períodos precedentes, com exceção ao *baseline* sazonal. Esses padrões de comportamento podem estar associados à influência de eventos de precipitação mais intensa que ocorreram nos períodos de chuvas antecedentes, especialmente a partir do período chuvoso 2021/2022. Os demais períodos pretéritos comparados indicaram prevalência de similaridade entre si ou condições significativamente inferiores nos teores de Manganês total, incluindo o *baseline* sazonal.

No ribeirão Ferro-Carvão, após redução das concentrações até a estiagem/2021, nota-se aumento significativo na estiagem/2022 e estabilidade na estiagem/2023. Neste último período sazonal, é possível observar aumento significativo quando comparado com o valor de referência do *baseline*.

Para a Região 1A, ao longo do tempo, observa-se uma tendência de redução ou ausência significativa nas concentrações, exceto nos comparativos da estiagem/2022 com a estiagem/2021 e da estiagem/2023 com as estiagens de 2021 e 2020. No que diz respeito aos resultados de *baseline*, as concentrações deste analito não apresentaram diferenças significativas em relação aos valores registrados antes do rompimento, considerando todos os

períodos comparados. Isso sugere uma retomada das condições pretéritas no trecho do rio Paraopeba durante o último período de estiagem.

Em relação à Região 1B, no período de estiagem/2023, foram observadas concentrações significativamente superiores em comparação com as estiagens de 2022 e 2021. No entanto, não houve diferença significativa em relação ao *baseline* regional.

No que se refere à Região 2A, foi observada uma redução progressiva e significativa nas concentrações de Manganês total desde a estiagem/2021, com estabilidade de comportamento em 2022 e 2023. Além disso, vale destacar que sempre as concentrações desse analito estiveram significativamente iguais ou inferiores ao *baseline*.

Para as regiões subsequentes, 2B e 2C, que apresentam atenuação expressiva dos teores em relação aos trechos de montante devido à influência do reservatório de Retiro Baixo, observou-se predominantemente uma redução significativa ao longo do tempo, com teores significativamente inferiores ao *baseline* de referência para a maioria dos períodos comparados. Compreende-se que nos períodos de estiagem, especialmente na Região 2C, as defluências do reservatório de Retiro Baixo e as contribuições pontuais dos tributários nessa bacia incremental exercem uma influência mais predominante. Por outro lado, durante os períodos chuvosos, as contribuições difusas se somam, o que pode interferir de maneira mais marcante em eventuais alterações na qualidade da água.

No que tange ao Manganês dissolvido, por meio da análise espacial, observa-se que seus teores são expressivamente mais reduzidos que as frações totais. Através da avaliação espacial dos períodos de estiagem discretizados, notou-se a partir de 2021, que as regiões mais distais (2B e 2C) não apresentaram diferença significativa em relação à Região Montante. Para a estiagem/2023, o comportamento das regiões 1A e 1B se mantêm em relação à Região Montante, com concentrações significativamente superiores.

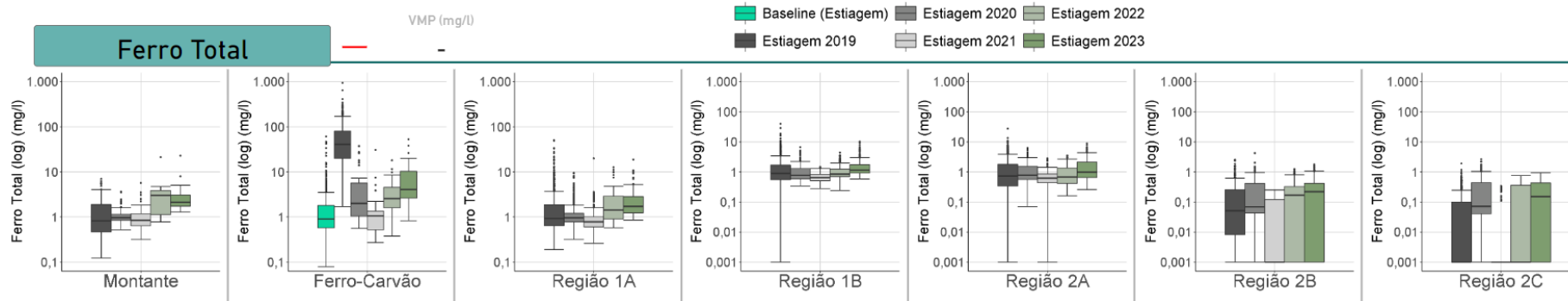
Em termos de comparação temporal, em âmbito geral, ao considerar cada um dos períodos de estiagem, nota-se predominância de comportamento de redução sucessiva ao longo do tempo, com semelhança estatística entre os períodos de estiagem/2023 e estiagem/2022 nas regiões Montante, 1B a 2C. Para a Região Ferro Carvão, ocorreu redução ou similaridade das concentrações nas comparações entre o período de estiagem/2023 com os demais períodos. Para a Região 1A, ao contrário, foram indicados resultados significativamente mais elevados apenas em relação à estiagem/2022. Vale ressaltar que não há *baseline* disponível para fins comparativos, exceto para a Região Ferro-Carvão, para a qual os resultados dos períodos de estiagem subsequentes indicam teores predominantemente inferiores.

5.3.2.2. Ferro total e dissolvido

No conjunto entre o **Gráfico 5.3.2.2-1** e o **Gráfico 5.3.2.2-4** são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Ferro total e dissolvido, respectivamente. Na **Tabela 5.3.2.2-1** e na **Tabela 5.3.2.2-3** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a

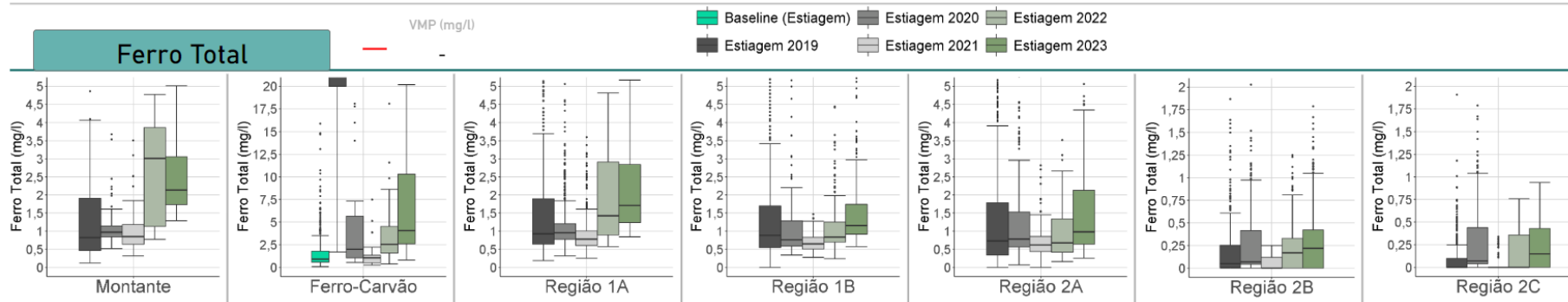
série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para esses parâmetros. Ao passo que, na **Tabela 5.3.2.2-2** e na **Tabela 5.3.2.2-4** são apresentados os resultados do teste de comparação temporal em cada região.

Gráfico 5.3.2.2-1 Boxplots Ferro total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala fixa



Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.2.2-2 Boxplots Ferro total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, com escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.2-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro total

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.2-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	>	~	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.21	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.20	>	>	>	>	>	~	~
Est.23 X Est.19	<	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.22 X Est.21	>	>	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.20	~	>	>	~	<	<	<
Est.22 X Est.19	<	>	>	~	~	~	>
Est.22 X Est.Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.21 X Est.20	<	<	<	<	<	<	<
Est.21 X Est.19	<	~	<	<	<	<	<
Est.21 X Est.Baseline	~	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.20 X Est.19	<	~	~	~	>	>	>
Est.20 X Est.Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.19 X Est.Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondente ao LQ

~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)

< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Gráfico 5.3.2.2-3 *Boxplots* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa

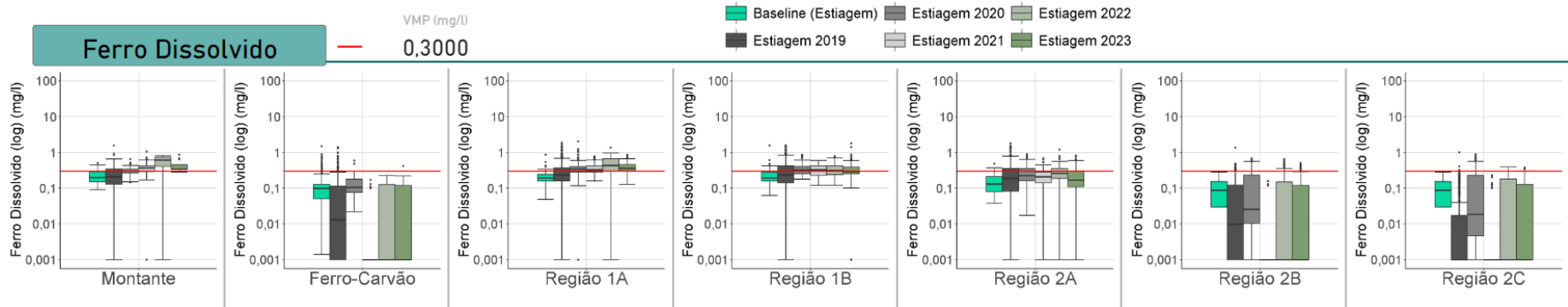
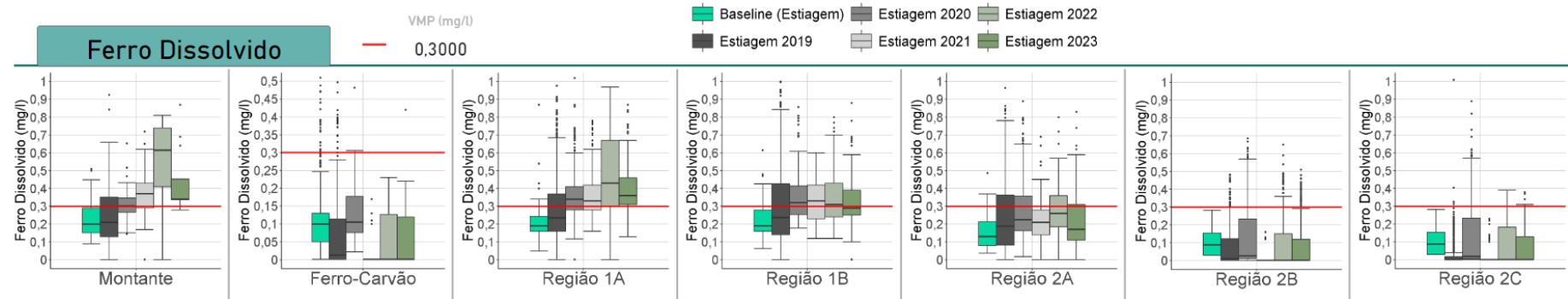


Gráfico 5.3.2.2-4 *Boxplots* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro dissolvido

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	>	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	<
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem Baseline							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	~	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.2-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	<	<	~	<	<	~
Est.23 X Est.21	>	~	>	~	~	>	>
Est.23 X Est.20	<	~	~	~	<	<	<
Est.23 X Est.19	~	>	>	>	~	~	~
Est.23 X Est.Baseline	<	>	>	>	>	<	<
Est.22 X Est.21	~	>	>	~	>	>	>
Est.22 X Est.20	<	>	>	~	~	<	<
Est.22 X Est.19	<	>	>	>	>	<	>
Est.22 X Est.Baseline	<	>	>	>	>	<	<
Est.21 X Est.20	<	>	~	~	<	<	<
Est.21 X Est.19	<	>	>	>	~	<	<
Est.21 X Est.Baseline	<	>	>	>	>	<	<
Est.20 X Est.19	>	>	>	>	>	>	>
Est.20 X Est.Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Est.19 X Est.Baseline	~	~	>	~	>	<	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

O Ferro total, assim como o Manganês total, está presente tanto no rejeito quanto na matriz geológica da região. Esse analito sofre uma influência significativa da sazonalidade, com concentrações mais elevadas durante os períodos chuvosos em comparação com os períodos de estiagem. Esse fenômeno ocorre devido à predominância de frações particuladas durante as chuvas, o que resulta no transporte de sedimentos da bacia por meio do escoamento superficial. Adicionalmente, durante os períodos chuvosos, a ressuspensão de materiais depositados no leito fluvial é intensificada devido às condições hidrodinâmicas mais vigorosas nesses momentos.

Durante os períodos de estiagem, por outro lado, as condições hidrológicas na região experimentam uma significativa redução no volume de chuvas. Essa diminuição na precipitação resulta em mudanças marcantes na concentração de Ferro Total. Com a escassez de chuvas, a quantidade de sedimentos disponíveis para o carreamento diminui consideravelmente e as condições hidrodinâmicas mais atenuadas resultam em menor turbulência nas águas, limitando a remobilização de partículas no leito fluvial.

No âmbito temporal, para a região do Ferro Carvão, destaca-se um padrão de redução sucessiva das concentrações de Ferro total a partir da estiagem/2019 até a estiagem/2021, seguido por aumentos sucessivos na estiagem/2022 e na estiagem/2023. De maneira semelhante, a Região Montante, não impactada pelo rompimento, apresentou estabilidade ou redução até a estiagem/2021, a partir da qual o comportamento passou a ser de aumento

significativo nas concentrações na estiagem/2022 e estabilidade na estiagem/2023. Para todas as outras regiões analisadas houve aumento nas concentrações ao longo dos dois últimos períodos de estiagem. Possivelmente, esse comportamento geral de aumento nos teores a partir da estiagem/2022 seja resultado do intenso período chuvoso de 2021/2022 que o antecedeu e acometeu a bacia como um todo. Sequencialmente, destaca-se a potencial influência do período chuvoso 2023/2023 sobre os períodos iniciais da estiagem/2023, além deste período sazonal também ter sido marcado por eventos chuvosos mais atípicos em alguns meses. Vale destacar que, através da análise espacial, considerando-se os períodos de estiagem discretizados, não foi apontada diferença significativa entre as regiões Montante, 1A e 1B para a estiagem/2023 no tocante ao Ferro total. Nota-se, ademais, predomínio de redução das concentrações entre as diferentes regiões analisadas, especialmente a partir da Região 1B.

Diferentemente da fração total, o comportamento temporal do parâmetro Ferro dissolvido, no rio Paraopeba, revela aumento significativo nos resultados ao longo dos períodos sazonais de estiagem, pelo menos até a estiagem/2022. Na estiagem/2023, nota-se variabilidade comportamental entre as diferentes regiões desse corpo hídrico, onde nas regiões Ferro-Carvão, 1B e 2C é indicada estabilidade em relação ao período de estiagem anterior e, para as demais regiões, aponta-se redução significativa. Particularmente para a Região Ferro-Carvão, com exceção de um aumento sucessivo entre a estiagem/2019 e 2020, há predomínio de redução e estabilidade até a estiagem/2023. No que diz respeito à comparação com o *baseline*, é importante destacar que os teores na estiagem/2023 estiveram significativamente superiores a essa referência nas regiões Montante, 1A, 1B e 2A, indicando um comportamento com ampla abrangência no rio Paraopeba.

Utilizando-se o teste de comparação espacial, constatou-se que, em relação ao Ferro dissolvido, houve um aumento notável na Região 1A durante a estiagem/2020, quando comparada à Região Montante. No entanto, a partir da estiagem/2021, não foram identificadas diferenças significativas entre estas regiões mencionadas. Especificamente para a estiagem/2023, não há diferença significativa nas concentrações entre a Região Montante e as regiões 1A e 1B (mais impactadas). Para as demais regiões do rio Paraopeba, observa-se predominantemente uma tendência de redução ou estabilidade ao longo do espaço. De maneira geral, o teste indica que o comportamento espacial observado na estiagem/2023 se assemelha ao verificado nos pontos de *baseline*.

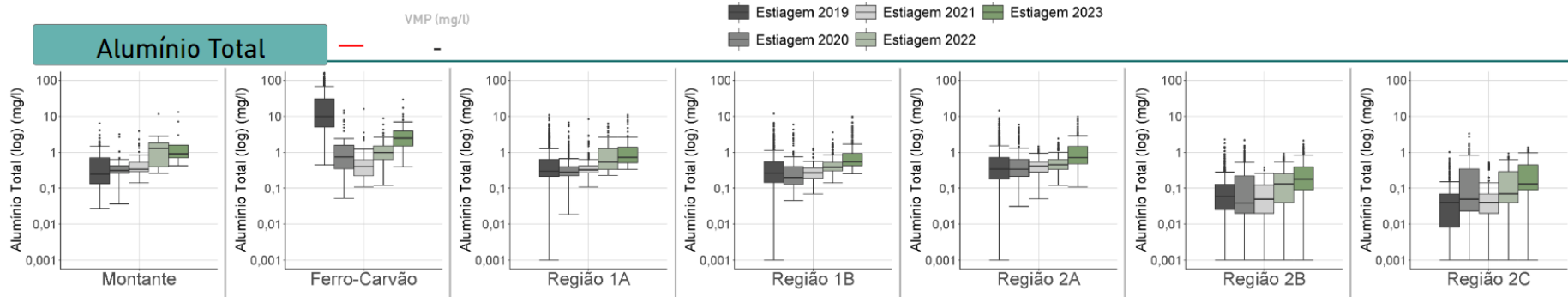
É importante notar que os teores de Ferro dissolvido são mais reduzidos na Região Ferro-Carvão em comparação com as regiões Montante, 1A, 1B e 2A. Essa diferença pode ser explicada pela natureza do elemento ferro associado ao rejeito, que se encontra predominantemente sob formas cristalinas, com destaque para a hematita (Fe_2O_3), apresentando menor potencial de solubilização em água. Em contrapartida, os sedimentos naturais da bacia contêm potencialmente ferro em forma de óxidos e hidróxidos coloidais e amorfos, que possuem maior capacidade de solubilidade em meio aquoso, tornando-os mais

móveis e propensos a interações mais expressivas com a água (água-sedimento) (ARCADIS, 2021c).

5.3.2.3. Alumínio total e dissolvido

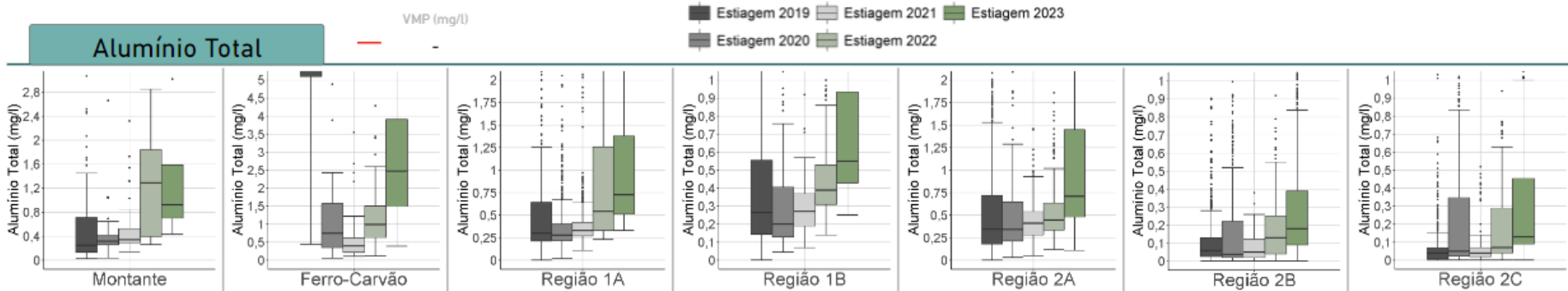
Entre o **Gráfico 5.3.2.3-1** e o **Gráfico 5.3.2.3-4** são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Alumínio total e dissolvido, respectivamente. Na **Tabela 5.3.2.3-1** e na **Tabela 5.3.2.3-3** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para esses parâmetros. Enquanto, na **Tabela 5.3.2.3-2** e na **Tabela 5.3.2.3-4** são apresentados os resultados do teste de comparação temporal em cada região.

Gráfico 5.3.2.3-1 *Boxplots* Alumínio total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa



Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.2.3-2 *Boxplots* Alumínio total para os períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.3-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio total

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	<	~	<	<
Montante	-	-	<	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.3-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	>	~	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.21	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.20	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.19	<	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.22 X Est.21	~	>	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.20	~	>	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.19	<	>	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.21 X Est.20	~	~	>	~	~	~	<
Est.21 X Est.19	<	>	~	~	~	~	~
Est.21 X Est.Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.20 X Est.19	<	~	<	~	~	~	>
Est.20 X Est.Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est.19 X Est.Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondente ao LQ

~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)

< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Gráfico 5.3.2.3-3 Boxplots Alumínio dissolvido para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa

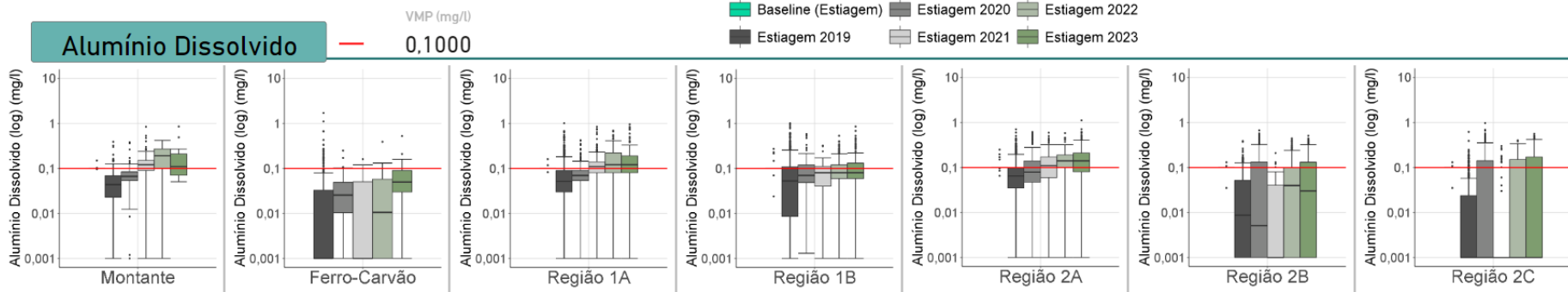
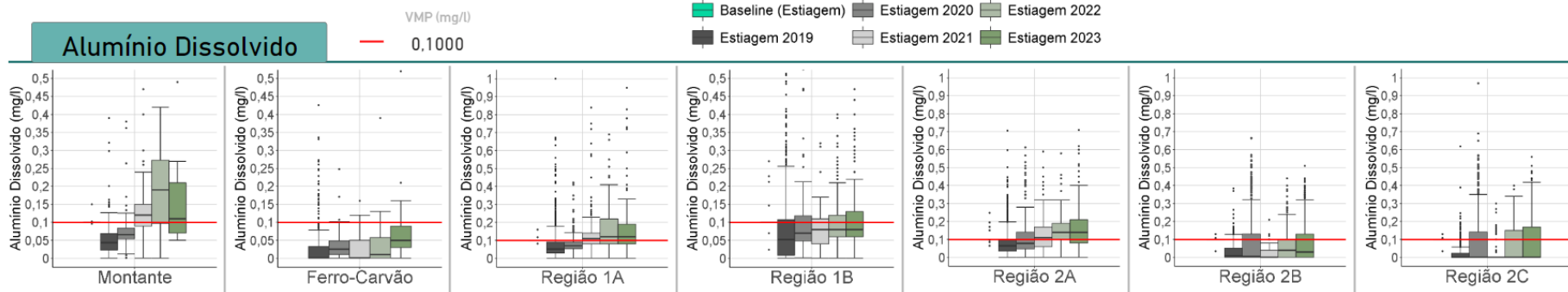


Gráfico 5.3.2.3-4 Boxplots Alumínio dissolvido para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.3-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio dissolvido

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	>	~
Montante	-	-	~	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	<	<	<	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	~	~
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	~	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	>	~
Montante	-	-	~	~	>	<	<
Região 1A	-	-	-	~	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem Baseline							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	~	~	~	~
Montante	-	-	~	~	~	~	~
Região 1A	-	-	-	~	~	~	~
Região 1B	-	-	-	-	~	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	~	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.3-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	>	<	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	>	~	~	~	>	>	>
Est.23 X Est.20	>	>	>	~	>	~	~
Est.23 X Est.19	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	>	>	>
Est.22 X Est.20	~	>	>	~	>	~	~
Est.22 X Est.19	>	>	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est.21 X Est.20	~	>	>	~	>	<	<
Est.21 X Est.19	~	>	>	>	>	~	~
Est.21 X Est.Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est.20 X Est.19	>	>	>	>	>	~	>
Est.20 X Est.Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est.19 X Est.Baseline	NA	~	~	>	>	~	~

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondente ao LQ

~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)

< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Os teores de Alumínio total nas regiões Montante a 2C são significativamente mais reduzidos em comparação com a Região Ferro-Carvão. Ao considerar os períodos de estiagem discretizados, a análise espacial revela um comportamento predominante de redução nas concentrações ou a ausência de diferença significativa para o Alumínio total ao longo das diferentes regiões. Na estiagem/2023, é possível notar que as regiões 1A, 1B e 2A se assemelham à Região Montante para os teores desse analito. Há predominância de tendência de ausência de diferença significativa ou de concentrações significativamente inferiores para todas as demais regiões do rio Paraopeba. Exceção é apontada apenas para a Região 2A, que apresentou concentrações mais elevadas que a Região 1B. Vale ressaltar que as regiões 2A, 2B e 2C fazem parte do contexto geológico Supergrupo Minas (Grupo Bambuí), rico em compostos de Alumínio, o que pode favorecer o aporte desse elemento para o ambiente.

Do ponto de vista temporal, de maneira geral, apesar das concentrações de Alumínio total terem sido mantidas mais estáveis até a estiagem/2021 (exceto para a Região 1A), as regiões demonstram um aumento nas concentrações principalmente a partir da estiagem/2022, o que também corrobora com a possível relação com as chuvas antecedentes mais intensas do período chuvoso 2021/2022. Apenas na Região Montante é indicada estabilidade na estiagem/2023 em relação ao período de estiagem/2022, embora suas concentrações sejam semelhantes estatisticamente às regiões 1A, 1B e 2A do ponto de vista espacial.

Em relação às frações dissolvidas de Alumínio e suas variações espaciais, destacam-se concentrações significativamente mais elevadas para o Alumínio dissolvido nas regiões do rio Paraopeba (Montante a 2A) em comparação com a região do ribeirão Ferro-Carvão na estiagem/2023. Por outro lado, as regiões 1A, 1B e 2A se assemelham à Região Montante. Para as demais regiões, observa-se uma redução na Região 1B e um aumento significativo na Região 2A na estiagem/2023, enquanto nas regiões 2B e 2C são apontadas, predominantemente, concentrações de Alumínio dissolvido significativamente inferiores aos trechos mais a montante.

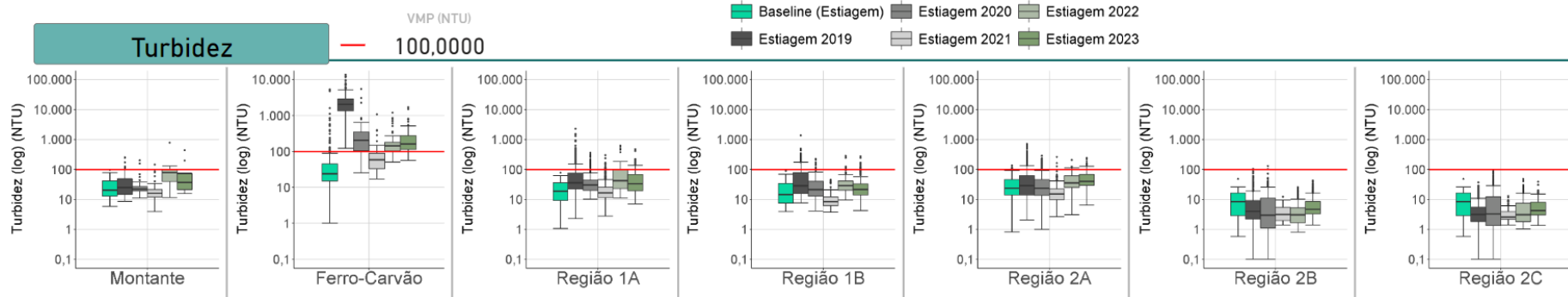
Quanto à variação ao longo do tempo, para a Região Ferro-Carvão é observa aumento significativo dos teores de Alumínio dissolvido no período atual em relação a todos outros períodos de estiagem. Além disso, percebe-se um aumento sucessivo para as regiões Montante e 1A entre as estiagens de 2019 e 2021, seguido de estabilidade até a estiagem/2023, salvo Montante que apresentou redução significativa frente à estiagem/2022. A Região 1B, após uma elevação significativa entre as estiagens de 2019 e 2020, manteve-se sem diferença estatística temporal até a estiagem/2023. Para as regiões seguintes, a Região 2A foi aquela que indicou um aumento sucessivo mais prolongado, estendendo-se até a estiagem/2022, seguido de estabilidade na estiagem/2023. Nas regiões 2B e 2C, o comportamento foi alternado entre os períodos, com estabilidade de comportamento na estiagem/2023, após um aumento significativo entre as estiagens de 2021 e 2022.

Com exceção da Região Ferro-Carvão, para a qual não há *baseline* monitorado, todas as outras regiões apresentam, em geral, níveis significativamente mais altos do que os *baselines* correspondentes durante os períodos de estiagem analisados.

5.3.2.4. Turbidez

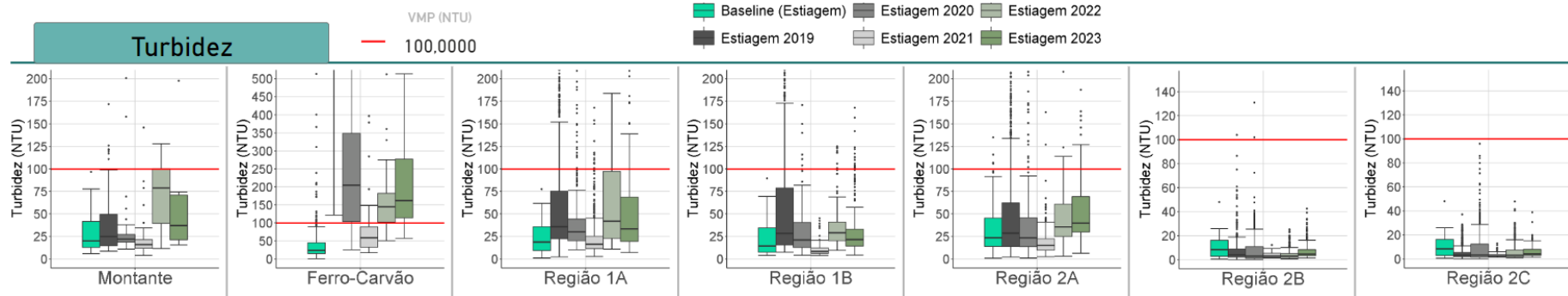
No **Gráfico 5.3.2.4-1** e no **Gráfico 5.3.2.4-2** são apresentados os *boxplot* do parâmetro Turbidez. Na **Tabela 5.3.2.4-1** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para Turbidez. Ao passo que na **Tabela 5.3.2.4-2**, são apresentados os resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.

Gráfico 5.3.2.4-1 Boxplots Turbidez para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa



Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.2.4-2 Boxplots Turbidez para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.2.4-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Turbidez

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	<	<
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem Baseline							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	~	<	<
Montante	-	-	~	<	~	<	<
Região 1A	-	-	-	~	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	>	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.4-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Turbidez em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	<	<	~	>	>
Est.23 X Est.21	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.20	~	~	~	~	>	>	>
Est.23 X Est.19	<	~	~	<	>	>	>
Est.23 X Est.Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Est.22 X Est.21	>	>	>	>	>	~	~
Est.22 X Est.20	~	>	>	>	>	~	~
Est.22 X Est.19	<	>	~	~	>	<	>
Est.22 X Est.Baseline	>	>	>	>	>	<	<
Est.21 X Est.20	<	<	<	<	<	~	~
Est.21 X Est.19	<	<	<	<	<	~	~
Est.21 X Est.Baseline	>	<	~	<	<	<	<
Est.20 X Est.19	<	~	<	<	~	<	~
Est.20 X Est.Baseline	>	~	>	>	~	~	~
Est.19 X Est.Baseline	>	~	>	>	~	<	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

O parâmetro Turbidez pode ser influenciado por diversas contribuições não relacionadas ao rompimento e, assim como observado principalmente nos parâmetros de manganês e ferro nas respectivas frações totais, é fortemente afetado pela sazonalidade. Geralmente, os níveis de Turbidez são mais elevados durante o período sazonal de chuva. Na estiagem, contrariamente, chuvas esporádicas podem contribuir relativamente para o aumento desse parâmetro no curso d'água.

Especialmente, considerando os períodos de estiagem discretizados, observa-se similaridade na Turbidez para as regiões 1A, 1B e 2A em relação à Região Montante na estiagem/2023. Apenas a Região 2A se destoa nesse período, apresentando teores de Turbidez significativamente superiores em relação à Região 1B. Por outro lado, as regiões 2B e 2C apresentam teores significativamente inferiores às demais.

Especialmente, considerando os períodos de estiagem discretizados, observa-se uma similaridade da Turbidez para as regiões 1A, 1B e 2A em relação à Região Montante na estiagem/2023. Apenas a Região 2A apresenta teores de Turbidez significativamente superiores em relação a Região 1B. As regiões 2B e 2C apresentam teores significativamente inferiores às demais.

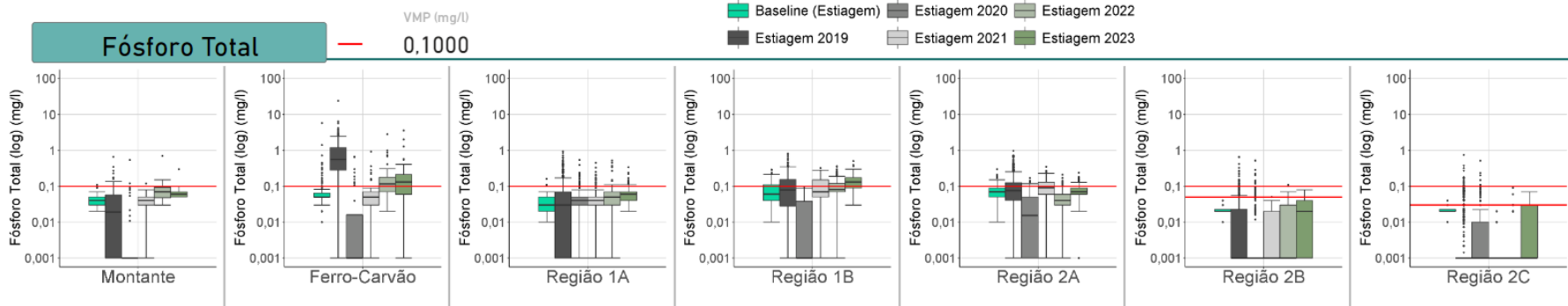
No âmbito temporal, notam-se condições de redução das concentrações entre o período de estiagem/2019 até a estiagem/2021 para todas as regiões, exceto 2B e 2C, que apresentam estabilidade entre as estiagens de 2020 e 2021. A partir da estiagem/2022, ao contrário, é

apontado um aumento significativo frente à estiagem/2021 nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2A. Na estiagem/2023, os teores apresentaram um comportamento predominante de redução (regiões 1A e 1B) ou estabilidade (regiões Montante, Ferro-Carvão, 2A), e nas regiões mais distais (2B e 2C), nota-se aumento das concentrações ao comparar este período com a *baseline* na maior parte do rio Paraopeba, inclusive na Região Montante e na Região Ferro-Carvão. Semelhanças estatísticas com as condições naturais são observadas apenas na Região 2C na estiagem/2023.

5.3.2.5. Fósforo total

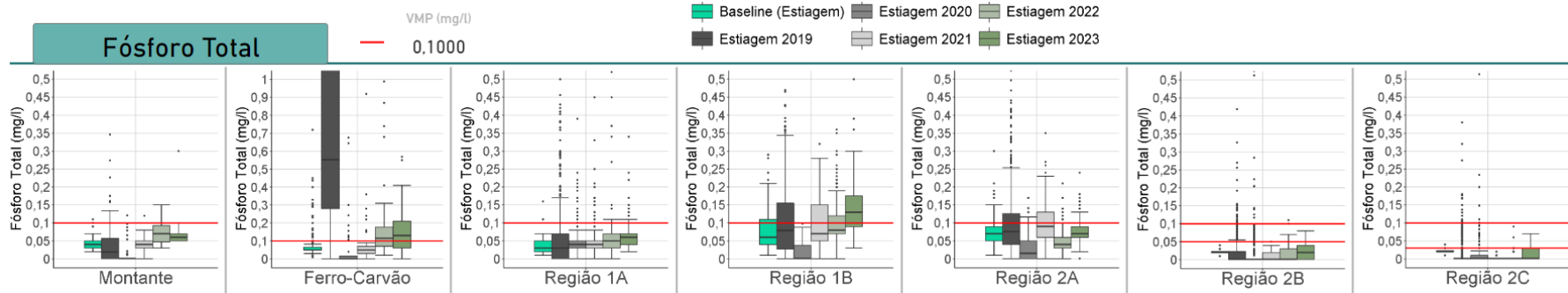
No **Gráfico 5.3.2.5-1** e no **Gráfico 5.3.2.5-2**, é apresentado os *boxplots* do parâmetro Fósforo total. Na **Tabela 5.3.2.5-1** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Fósforo total e, na **Tabela 5.3.2.5-2**, são apresentados os resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.

Gráfico 5.3.2.5-1 Boxplots Fósforo total para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala fixa



Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão. **OBS:** nas regiões de Montante até 2A, considera-se o VMP para ambientes lóticos (0,1 mg/L). Na Região 2B, ambiente intermediário (0,03 mg/L) sendo o BP099 localizado em ambiente lótico (0,1 mg/L). Na Região 2C considera-se o VMP para ambiente lêntico (0,03 mg/L).

Gráfico 5.3.2.5-2 Boxplots Fósforo total para períodos de estiagem *baseline*, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, escala ajustada e variável



Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região.

Tabela 5.3.2.5-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Fósforo total.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	>	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	<	<
Região 1A	-	-	-	>	~	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	~	>	>	<	<
Montante	-	-	~	>	>	<	<
Região 1A	-	-	-	>	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	>	~	>	~	~
Montante	-	-	>	>	>	~	~
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	>	>	<	<
Região 1A	-	-	-	>	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/Baseline							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	~	>	>	~	~
Montante	-	-	~	>	>	<	<
Região 1A	-	-	-	>	>	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	<	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:	~	Não há diferença significativa entre as regiões A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
	<	Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
	>	Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 5.3.2.5-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.21	>	>	>	>	<	>	>
Est.23 X Est.20	>	>	>	>	>	>	>
Est.23 X Est.19	<	>	>	>	~	>	>
Est.23 X Est.Baseline	>	>	>	>	~	~	~
Est.22 X Est.21	>	>	>	~	<	~	~
Est.22 X Est.20	>	>	>	>	>	>	<
Est.22 X Est.19	<	>	>	>	<	~	<
Est.22 X Est.Baseline	>	>	>	>	<	<	<
Est.21 X Est.20	>	>	~	>	>	~	<
Est.21 X Est.19	<	>	>	~	>	~	<
Est.21 X Est.Baseline	~	~	~	~	>	<	<
Est.20 X Est.19	<	<	>	<	<	<	~
Est.20 X Est.Baseline	~	<	~	<	<	<	<
Est.19 X Est.Baseline	>	<	~	~	~	<	<

Legenda:	~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
	<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
	>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Para o Fósforo total, do ponto de vista espacial e considerando os períodos de estiagem discretizados, observa-se um comportamento de similaridade das concentrações a partir da estiagem/2022 para as regiões de Montante em relação às regiões 1A, 1B e 2A. No entanto, concentrações significativamente superiores podem ser observadas a partir das regiões 1B e 2A em relação à Região 1A. As regiões 2B e 2C apresentam teores significativamente inferiores às demais. Tal comportamento pode ser atribuído a diversos fatores, dentre os quais, os usos e ocupações típicos da bacia do rio Paraopeba, como os núcleos urbanos encontrados nas regiões 1A e 1B, bem como as áreas de vocação mais agrária da Região 2A. Aspectos ambientais como o lançamento de efluentes sanitários *in natura* ou oriundos de estações de tratamento sem desempenho adequado para remoção de nutrientes, bem como o escoamento difuso de áreas fertilizadas podem ser importantes fontes de fósforo ao longo dos referidos trechos fluviais.

No contexto de variabilidade temporal, no que diz respeito à região do ribeirão Ferro Carvão, mais afetada pelo rompimento da barragem, observam-se concentrações significativamente mais elevadas na estiagem/2019, indicando associação com o rompimento (contribuição do rejeito, arraste de materiais como solo, matéria orgânica de origem vegetal etc.). Nas regiões

do rio Paraopeba, nos teores de Fósforo total não se diferem do *baseline* regional até pelo menos a estiagem/2021 nas maior parte das regiões a jusante da confluência com o Ferro-Carvão. Após queda significativa na estiagem/2020 em relação ao período anterior, são indicadas elevações significativas a partir da estiagem/2021, com exceção das regiões 1A e 2B (estabilidade) e Região 2C (redução). Para a estiagem/2023, exceto para as regiões Montante e Ferro-Carvão, onde não houve diferença significativa frente à estiagem/2022, todas as demais apontaram elevações. Desde a Região Montante é observada elevação dos teores de Fósforo total em relação ao *baseline* na estiagem/2023 e apenas as regiões 2A, 2B e 2C indicaram similaridade com essa referência.

Nesse contexto, e corroborando com as avaliações anteriores, vale destacar que, segundo informações do Plano de Reparação (ARCADIS, 2022d), ao se avaliar o comportamento do Fósforo total no rio Paraopeba após o rompimento das barragens, verificou-se um notório incremento de seus teores também na Região 1A, cujas concentrações máximas atingiram valores de até 5,2 mg/L no período chuvoso de 2019, o que representa cerca de 18 vezes a máxima registrada no PT-52 (0,285 mg/L) e 52 vezes o valor máximo permitido para águas doces Classe 2 de ambientes lóticos (0,1 mg/L). Dessa forma, é possível verificar que os teores de Fósforo total registrados na água do rio Paraopeba, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, sofreram alterações em decorrência do rompimento, mas foram gradualmente sendo reduzidas ao longo dos meses, especialmente no decorrer da estiagem/2019. Para o período de estiagem/2023, a maior concentração deste analito ocorreu nessa região para o PT-01, um total de 0,34 mg/L.

Ressalta-se que os resultados discutidos para este analito corroboram, em parte, com os apresentados no Projeto Entire (ENTIRE, 2023), especificamente no que diz respeito ao estudo da Modelação do Fósforo na Água do Rio Paraopeba, após o rompimento da barragem de rejeitos B1 em Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), usando o Modelo Hidrológico SWAT. O estudo apresenta a carga de fósforo (vazão x concentração) simulada, considerando os dados pré (2000 a 2018) e pós-rompimento (2019 a 2021). Os resultados indicam que a carga de Fósforo total aumentou em níveis acima da condição pré-rompimento, da região de Montante até próximo a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo Jusante, sendo as maiores cargas de fósforo observadas a partir da Região 2A. Nota-se ainda que, há um aumento da vazão quando comparado os resultados pré e pós rompimento, e isto, devido as alterações sazonais que refletiram no aumento do volume pluviométrico ao longo dos anos. Ressalta-se que é importante discriminar outras fontes de fósforo oriundas da própria área de drenagem da bacia.

5.3.3. Análise de tendência temporal

Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados na **Tabela 5.3.2.5-1** considerando a série completa de dados (todos os períodos sazonais de chuva e de estiagem desde 25/01/2019 até 30/09/2023) e, na **Tabela 5.3.2.5-2**, para a série de

estiagem (todos os períodos de estiagem, desde 2019 até 2023). Ademais, como complemento, os resultados e discussões referentes às séries de chuva podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/04/2023 (ARCADIS, 2023a).

Os testes de hipóteses apresentados no **item 5.3.2** e os testes de tendência temporal apresentados neste item são complementares. Nos testes para comparação temporal, são testadas hipóteses da existência ou não de diferenças significativas entre os períodos avaliados, ou seja, se um determinado período apresenta resultados maiores, menores ou que não diferem entre si. Já para o teste de tendência, são avaliados os resultados em ordem cronológica para identificar ao longo do tempo a existência ou não de tendência na série analisada, determinando se o valor do parâmetro tende a aumentar ou reduzir no decorrer do tempo.

Por exemplo, é possível identificar maiores concentrações em um dado período em comparação com períodos anteriores. Contudo, ao avaliar a série temporal, pode não ser indicada a existência de uma tendência consistente de elevação. Esse aspecto é crucial, pois evidencia a distinção entre variações temporais simples e mudanças consistentes ao longo do tempo na série analisada.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1 Folha 109 / 399

Tabela 5.3.2.5-1 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série completa de dados (todos os períodos sazonais, desde 25/01/2019 até 30/09/2023) – medianas mensais

Parâmetro	Rio Paraopeba																				UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.		UHE TM		
	Mont.	Ferro Carvão		Região 1A				Região 1B				Região 2A								Região 2B			Região 2C					
	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	PT-57	CE-02	JRB-02	PT-22
MAJORITÁRIOS																												
Manganês Total	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST
Manganês Dissolvido	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST
Ferro Total	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Alumínio Total	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Turbidez	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑
OUTROS																												
Fósforo Total	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST

ST Sem tendência significativa | T↓ Tendência significativa de redução | T↑ Tendência significativa de elevação



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1 Folha 110 / 399

Tabela 5.3.2.5-1 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) – medianas mensais

Parâmetro	Rio Paraopeba																				UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.			UHE TM		
	Mont.	Ferro Carvão			Região 1A					Região 1B				Região 2A								Região 2B			Região 2C				
	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	PT-57	CE-02	JRB-02	PT-22	
MAJORITÁRIOS																													
Manganês Total	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST
Manganês Dissolvido	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	
Ferro Total	T↑	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	
Alumínio Total	T↑	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
Turbidez	T↑	T↓	T↓	T↑	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
OUTROS																													
Fósforo Total	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	

ST Sem tendência significativa |
T↓ Tendência significativa de redução |
T↑ Tendência significativa de elevação

5.3.3.1. Manganês total e dissolvido

Ao aplicar o teste de tendência temporal aos dados medianos mensais do parâmetro Manganês em suas frações total e dissolvida, observa-se tendência de redução nas concentrações ou a ausência de tendência na série completa de dados, nos pontos distribuídos nas diferentes regiões. Esse comportamento é mantido ao aplicar o teste apenas para os períodos de estiagem consecutivos, com exceção de alguns pontos onde são indicadas tendência de aumento.

Na série completa de dados para o Manganês total, destaca-se a ausência de tendência na Região Montante. Por outro lado, observa-se uma tendência significativa de redução para a Região Ferro-Carvão como um todo, para a maioria dos pontos da Região 1A (com exceção de PT-01) e para a totalidade da Região 1B. Na Região 2A, a ausência de tendência predomina na maioria dos pontos, com uma tendência significativa de redução para os pontos iniciais PT-53, PT-54 e, próximo ao remanso do reservatório de Retiro Baixo, o ponto PT-55. Na Região 2B, prevalece também uma tendência significativa de redução, estendendo-se para a metade dos pontos da Região 2C subsequente. Para Manganês dissolvido, observa-se também uma predominância de tendência significativa de redução nas concentrações na série completa. Entretanto, em algumas regiões, essa condição se distribui de forma diferenciada, destacando-se a Região Montante (PT-52), onde é apontada uma redução significativa. Não foi constatada nenhuma tendência significativa de aumento de concentrações para o Manganês total nas duas séries analisadas.

No recorte relacionado à série de estiagens, apesar de ainda prevalecer a ausência de tendência ou a tendência significativa de redução para o Manganês total, em pelo menos três pontos da malha amostral (PT-52 na Região Montante; PT-18 e PT-49 na Região 2A), observam-se tendências de aumento. Essas variações podem estar relacionadas a eventos esporádicos de natureza hidroclimatológica ou ações antrópicas que eventualmente ocorreram nas proximidades dos pontos mencionados. Na fração dissolvida, em grande parte sob tendência de redução, estas se apresentam mais distribuídas ao longo do rio Paraopeba, aproximando-se do comportamento observado para a série completa analisada.

Em linhas gerais, os resultados aqui apresentados corroboram aqueles indicados pela aplicação testes de hipóteses apresentados no **item 5.3.2.**

5.3.3.2. Ferro total e dissolvido

Para o analito Ferro total, ao aplicar o teste no recorte da série completa, observa-se predominantemente a ausência de tendência, com reduções significativas em pontos distribuídos nas regiões de Ferro-Carvão, 1A e 1B. Há indicação de aumento significativo em apenas um ponto da Região 2A (PT-19). Por outro lado, para Ferro dissolvido é possível observar condições que variam entre a ausência de tendência e incrementos significativos distribuídos ao longo do rio Paraopeba desde a Região Montante. Esta última condição por ser observada na Região Montante (PT-52), Região 1A (PT-13 e PT-05), em todos os pontos da

Região 1B e na porção mais a jusante da Região 2A (PT-17, PT-18, PT-49, PT-19 e PT-55), o que pode apontar um comportamento de caráter amplo no rio Paraopeba atrelado a aspectos de solubilidade específicos para o Ferro dissolvido da bacia. Logo, sugere-se que as concentrações desse elemento na Região Ferro-Carvão são inferiores àquelas verificadas nas regiões do Paraopeba, possivelmente, em função da forma que este metal se configura no rejeito, com uma estrutura cristalina pouco solúvel, diferentemente dos sedimentos naturais da bacia, onde eventualmente prevalecem estruturas amorfas de óxidos e hidróxidos que são mais solúveis (ARCADIS, 2021c).

Durante o recorte de dados exclusivamente para os períodos de estiagem, observa-se uma tendência de incremento nos níveis de Ferro total em vários trechos do rio Paraopeba, em contraste com a série temporal anterior. Essa condição é notável na Região Montante (PT-52), na porção inicial da Região 1A (PT-01 e PT-13), em um ponto isolado da Região 1B (PT-14) e em grande parte da Região 2A. A hipótese que se apresenta é que esse comportamento pode ser atribuído aos efeitos das precipitações abundantes durante o período chuvoso 2021/2022, refletindo-se na estiagem/2022, aos eventos isolados, em alguns casos localizados, porém intensos, que resultaram em elevações mais acentuadas durante a estiagem/2023, condições morfológicas/hidráulicas de trechos fluviais que possam favorecer ressuspensões mais expressivas de material particulado com passagens de eventuais ondas de cheia e, ademais, a possibilidade de intervenções antrópicas pontuais. Quanto ao Ferro dissolvido, ainda no recorte de estiagem, seu comportamento se aproxima à série completa, com exceção notável na Região 1B onde, em contraste, predomina ausência de tendência significativa.

5.3.3.3. Alumínio total e dissolvido

No que diz respeito ao parâmetro Alumínio total, ao analisar todos os períodos sazonais, observa-se predominantemente a ausência de tendência na maior parte da bacia do rio Paraopeba. Exceção notável ocorre na Região 2A, onde se evidencia uma tendência de elevação a partir do ponto PT-17, estendendo-se até o início do reservatório de Retiro Baixo (PT-20). Quanto ao Alumínio dissolvido, por outro lado, destaca-se uma tendência significativa de aumento para a série completa em grande parte das regiões do rio Paraopeba, desde montante em trecho não impactado pelo rompimento. Isso sugere um comportamento abrangente de origem bacinal e, possivelmente, de mesma natureza daquele observado para Ferro dissolvido.

Em contraste com o recorte anterior, no qual foram considerados todos os períodos sazonais, a análise exclusiva dos períodos de estiagem sucessivos revela uma tendência significativa de aumento no Alumínio total desde a Região Montante até a extensão total do rio Paraopeba. Semelhante ao observado para o Ferro total, indica-se a hipótese de que o comportamento observado está relacionado aos efeitos das precipitações abundantes no período chuvoso de 2021/2022, que tiveram reflexos durante a estiagem/2022. Além disso, eventos isolados, embora localizados, porém intensos, podem ter contribuído para elevações mais acentuadas durante a estiagem/2023. As condições morfológicas e hidráulicas de certos trechos fluviais

também podem induzir a ressuspensões mais significativas de material particulado, especialmente durante a passagem de eventuais ondas de cheia. Além disso, não se pode desconsiderar a influência de possíveis intervenções antrópicas pontuais nessas áreas. Para o Alumínio dissolvido, entre as estiagens, o comportamento se assemelha à série completa, embora se perceba uma maior condição de ausência de tendência ao longo do rio Paraopeba.

Vale ressaltar que na extensa Região 2A, uma variedade de unidades geológicas pode ser observada no mapa geológico regional da bacia do rio Paraopeba (CPRM, 2019). Essa região abrange rochas ígneas e metamórficas do Complexo Belo Horizonte, distribuindo-se ao longo do rio até o limite com as rochas metassedimentares do Grupo Bambuí. No mapa geológico, essas rochas são evidentes nas proximidades do PT-18. Predominam os metassedimentos da Formação Serra de Santa Helena, compostos por metassiltito/metargilito, metaarcósios esverdeados a acinzentados quando frescos, mas com diversas cores de alteração, variando de amarelado a rosado. A mineralogia básica dessas rochas inclui argilas, mica, feldspato ((Na,K Ca), (Al) (Si,Al)Si₂⁻³O₈), quartzo, serpentina, anfibólios, magnetita (Fe₂O₃), óxidos e aluviões ao longo da planície de inundação do rio. Da mesma forma que na Região Montante, o intemperismo das rochas, condições pedogenéticas e o uso do solo contribuem para a disponibilidade de materiais para a água superficial.

Além disso, Campos, L (2018), ao estudar os filossilicatos das formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, identificou índices de variação composicional distintos, atribuindo essa variação à mudança na rocha fonte. Segundo estudos anteriores de Campos, L. (2017), a caulinita, illita, clorita e esmectitas são os argilominerais presentes nos pelitos, seja como partículas detríticas condicionadas pelo contexto tectônico e deposicional, ou como espécies autógenas formadas a partir de reações no sítio deposicional ou transformações de minerais precursoras. Esses argilominerais, hidratados e contendo alumínio e ferro em sua composição, desempenham um papel crucial no ambiente.

5.3.3.4. Turbidez

Na análise da série completa de dados, observa-se predominantemente a ausência de tendência, e de tendências significativas de redução nas regiões mais afetadas (Ferro-Carvão, 1A e início da 1B). Ao final da Região 2A (PT-19 e PT-55) e da Região 2C (JRB-02 e PT-22), são identificadas tendências de aumento.

Ao considerar apenas os períodos de estiagem, intensifica-se a predominância da ausência de tendência, com reduções na Região Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) e na Região 1A (PT-05). Em contrapartida, pontos de elevação são notados no PT-52 (Região Montante), PT-01 (Região 1A) e ao final da Região 2A (PT-49, PT-19 e PT-55).

5.3.3.5. Fósforo total

O Fósforo total na série completa dos dados indica predominantemente a ausência de tendência ao longo do rio Paraopeba. Observou-se aumento nos pontos PT-52 (montante), PT-

01 e PT-05 (Região 1A), PT-03 (Região 1B), PT-17 e PT-55 (Região 2A), e PT-20 (Região 2B). Em contraste, tendência significativa de redução foi detectada apenas na Região 1A (PT-09 e PT-02).

Na série de estiagem, não foram apontadas tendências de redução ao longo do rio Paraopeba, mantendo os pontos com tendência significativa de aumento, acrescidos dos pontos PT-43, PT-18 e PT-49 pertencentes à Região 2A.

A variabilidade das concentrações desse parâmetro ao longo das regiões pode ser justificada pelas diferentes fontes de poluição, sejam elas difusas ou pontuais, ao longo da bacia. Essa diversidade de fontes pode contribuir para a o predomínio de não detecção de tendência temporal ao longo da série histórica.

5.3.4. Mapas temáticos - *baseline*

Nas **Figura 5.3-3** a **Figura 5.3-4**, são apresentadas as variações dos resultados máximos dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez e Fósforo total em relação à concentração máxima de referência (*baseline*) nos diferentes trechos durante os períodos de estiagem. Essa avaliação acrescenta uma camada adicional às diversas análises, com distintas métricas, já apresentadas neste capítulo, com especial atenção aos valores máximos e, portanto, a condições mais críticas observadas durante os períodos analisados.

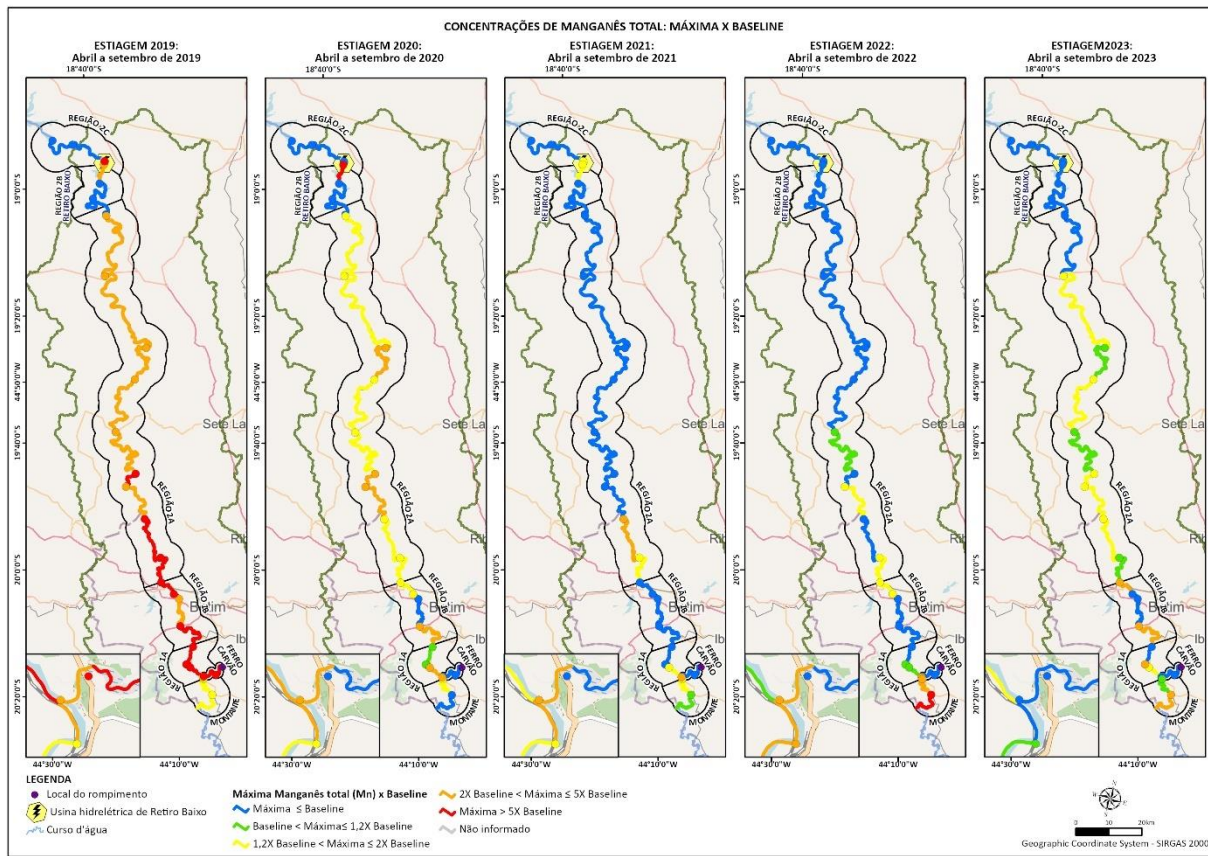
É importante ressaltar que essa ênfase nos valores máximos não busca simplificar a complexidade do comportamento do corpo hídrico, mas sim destacar situações potencialmente mais críticas no contexto de análises realizadas no âmbito do PME. Compreende-se, no entanto, que tais eventos podem estar relacionados a comportamentos específicos do corpo hídrico, influenciados por condições hidrometeorológicas singulares ou extemporâneas ou intervenções antrópicas pontuais.

Em relação ao Manganês total, **Figura 5.3-3**, durante a estiagem/2023, destacam-se concentrações máximas que atingiram até cinco vezes mais do que o *baseline*, especialmente entre a região de Montante e a 1B. Na Região 2A, as concentrações foram inferiores a duas vezes o valor de *baseline*, enquanto nas demais regiões foram iguais ou inferiores à concentração de referência.

Em comparação com os períodos de estiagem anteriores, nota-se que na região de Montante, os menores desvios ocorreram no período de estiagem/2020, enquanto os maiores foram na estiagem/2022. Nas regiões 1A, 1B e 2A, o cenário mais favorável foi na estiagem/2022 e o menos na estiagem/2019. Especificamente para a Região 2A, nota-se um incremento dos teores máximos em relação ao *baseline* (1,2x), estendendo-se até o final desse trecho, o que pode estar relacionado com eventos pluviométricos mais atípicos que ocorreram no período de estiagem/2023. Por outro lado, verifica-se que as regiões Ferro-Carvão, 2B e 2C não apresentaram variações entre os períodos de estiagem/2022 e 2023.

De maneira geral, é evidente que os desvios em relação às concentrações de referência são mais pronunciados na estiagem/2019. Nesta ocasião, registram-se resultados mais de cinco vezes superiores à condição de *baseline* nas regiões de Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2C. Ao longo dos anos, observa-se um claro comportamento de redução dos teores máximos, com atenuação dos desvios em relação à condição de referência.

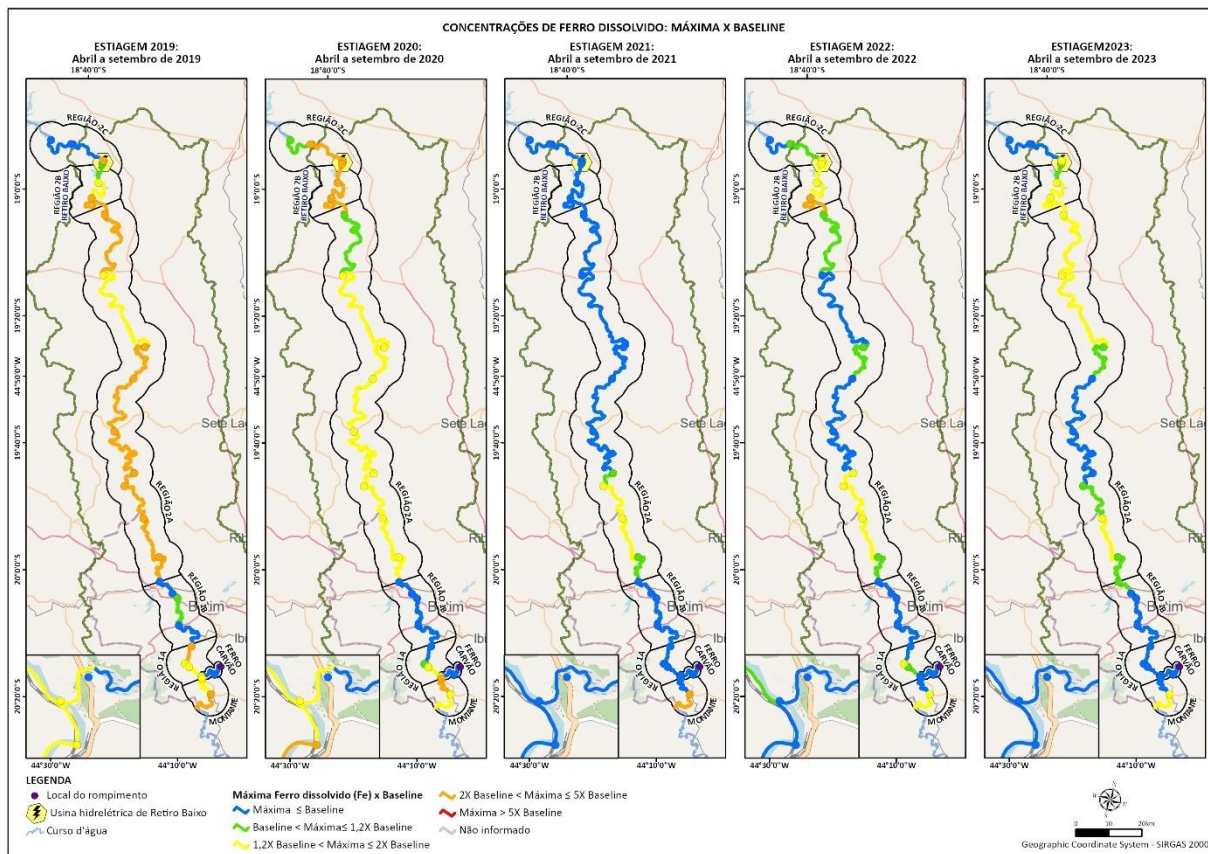
Figura 5.3-3 Teores de Manganês total: variação do valor máximo em relação ao *Baseline* nos respectivos períodos de estiagem.



No contexto do **Ferro dissolvido**, conforme representado na **Figura 5.3-4**, as concentrações máximas ao longo dos períodos de estiagem, na região de Montante, foram semelhantes nas estiagens de 2020, 2022 e 2023. A Região Ferro-Carvão não apresentou variações significativas entre os períodos de estiagem/2021 e 2023. Na Região 1A, os menores desvios ocorreram nas estiagens de 2021 e 2023, enquanto os maiores foram registrados foram indicados na estiagem/2019.

A Região 1B não apresentou variações notáveis entre os períodos de estiagem/2020 e 2022. Em contrapartida, as regiões 2A, 2B e 2C exibiram concentrações inferiores ao *baseline* no período de estiagem/2021, sendo o pior cenário registrado na estiagem/2020. Neste último período (estiagem/2023), as concentrações máximas até 2 vezes maiores que o *baseline* se estenderam para um trecho maior na Região 2A. Para as Regiões 2B e 2C, nota-se manutenção de condições.

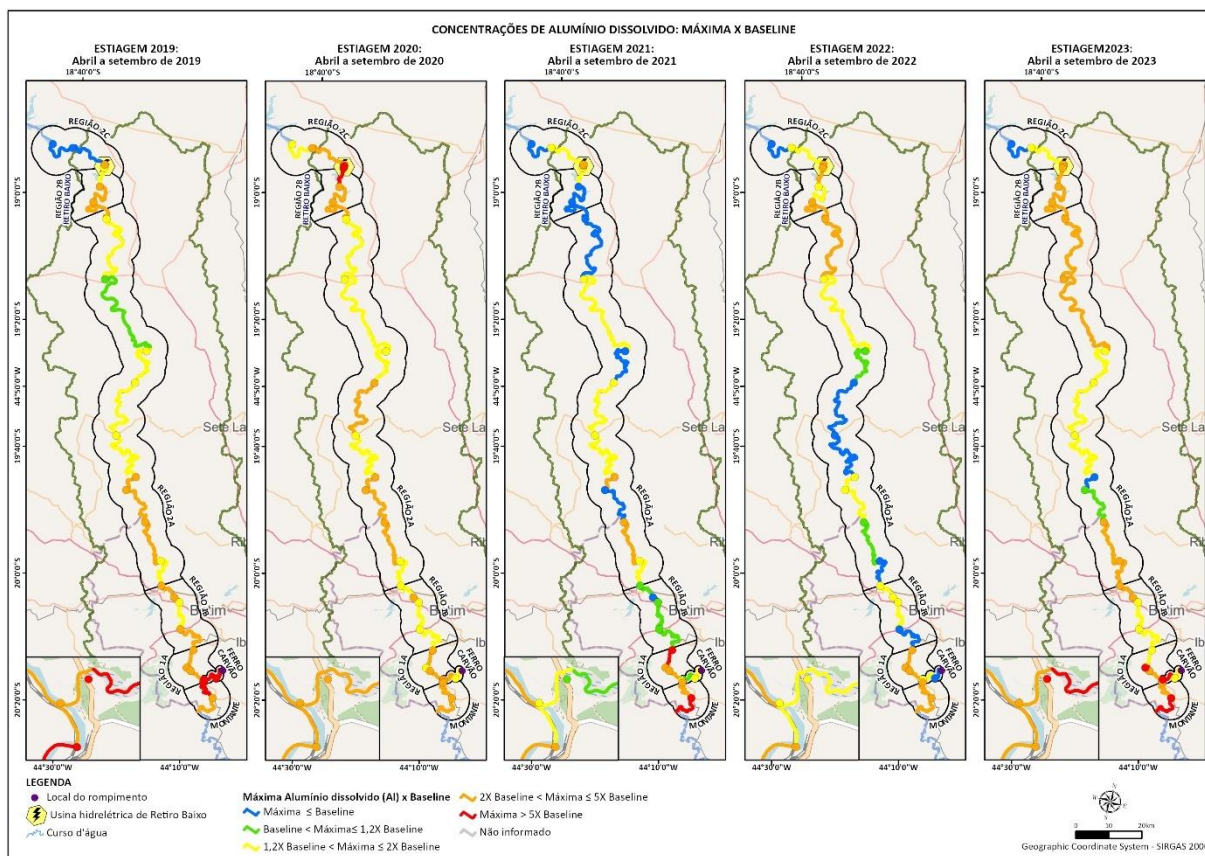
Figura 5.3-4 Teores de Ferro dissolvido: variação do valor máximo em relação ao *Baseline* nos respectivos períodos de estiagem.



Na análise do Alumínio dissolvido, a **Figura 5.3-5** indica um afastamento geral das concentrações máximas em relação às condições de *baseline* durante a estiagem/2023, comparada às estiagens de 2021 e 2022. No entanto, houve uma melhoria em comparação com as estiagens de 2019 e 2020. Destacam-se as regiões Montante, Ferro-Carvão e 1A na estiagem/2023, em que as concentrações máximas atingiram valores até mais de 5 vezes os referenciais. Nas regiões 1B, 2A e 2B, as concentrações variaram entre 1,2 e 5 vezes o *baseline*, enquanto na Região 2C, ficaram até 2 vezes, permanecendo semelhantes à estiagem/2022.

Ao comparar a estiagem/2023 com as anteriores, na Região Montante, os menores desvios ocorreram em 2020 e 2022, enquanto os maiores foram registrados em 2021 e 2023. Na Região Ferro-Carvão, os índices mais favoráveis foram em 2022, contrastando com os menos favoráveis em 2019. Na Região 1A, os teores máximos mais atenuados foram em 2020, enquanto os piores foram em 2021. Nas regiões 1B, 2A, e 2B, os cenários mais favoráveis variaram entre 2021 e 2022, enquanto os menos favoráveis foram em 2019 e 2020. A Região 2C não apresentou variação expressiva entre 2021 e 2023, registrando o melhor cenário em 2019 e o pior em 2020.

Figura 5.3-5 Teores de Alumínio dissolvido: variação do valor máximo em relação ao *Baseline* nos respectivos períodos de estiagem.



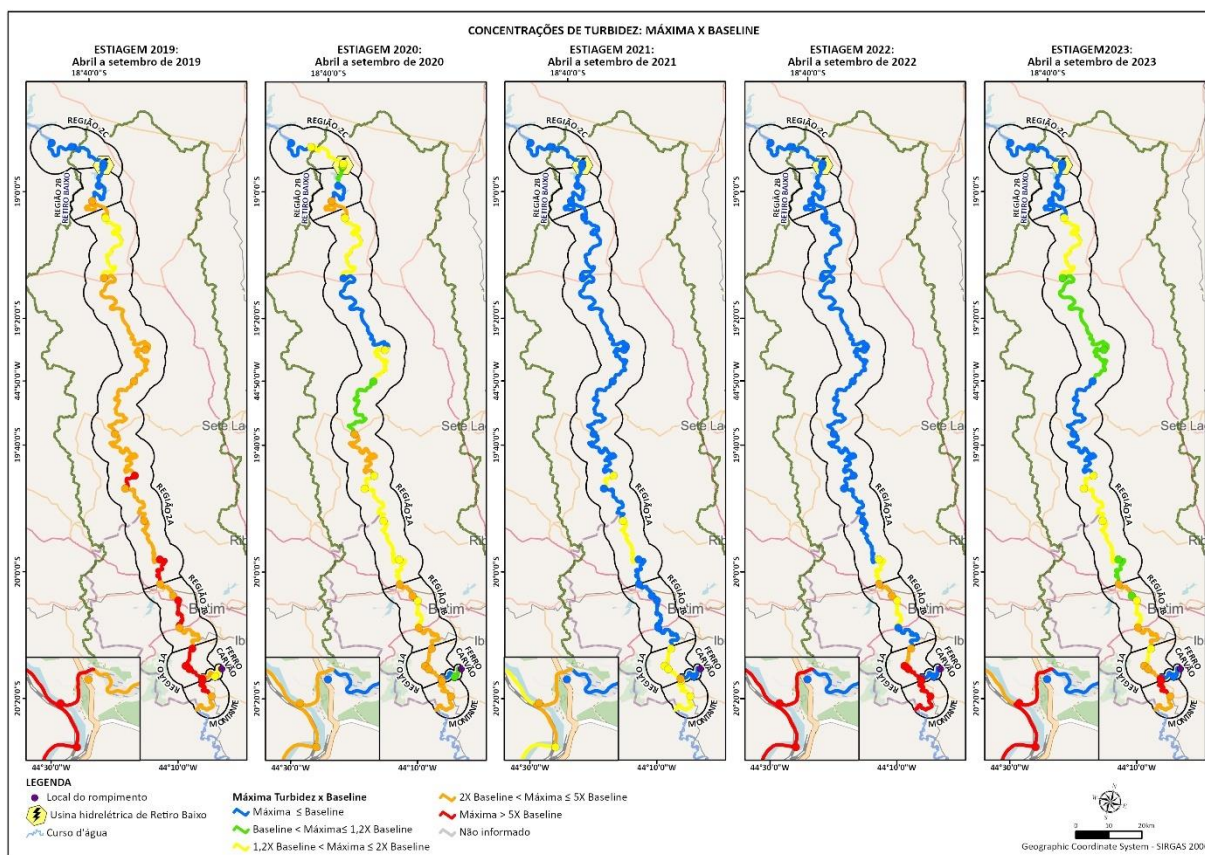
A análise da **Figura 5.3-6** evidencia que, durante a estiagem/2023, a Turbidez apresentou concentrações máximas na Região Montante que atingiram até 5 vezes os valores de referência (*baseline*). Nas regiões 1A e 2B, as concentrações variaram entre 5 e 2 vezes o valor de *baseline*, enquanto nas demais regiões foram iguais ou inferiores a 2 vezes.

Em comparação com estiagens anteriores, as regiões Montante e 1A registraram os menores desvios na estiagem/2021, ao passo que os maiores ocorreram nas estiagens de 2019 e 2022. A Região 1B teve o cenário mais favorável em 2021 e os menos favoráveis em 2019, enquanto a Região 2A apresentou melhores condições em 2022 e piores em 2019. Por outro lado, as regiões Ferro-Carvão, 2B e 2C não demonstraram oscilações claras entre as estiagens de 2021 e 2023.

Considerando o período completo de monitoramento, destaca-se que os afastamentos em relação às concentrações de referência foram mais pronunciados na estiagem/2019, registrando resultados até 5 vezes superiores à condição de *baseline* nas regiões Montante, 1A, 1B e 2A. No entanto, ao longo dos períodos, nota-se uma evidente tendência de redução nos teores máximos, indicando uma gradual atenuação dos afastamentos em relação à condição de referência. Esse comportamento, no entanto, se altera na estiagem/2023, possivelmente atribuído não apenas à influência das chuvas antecedentes (2022/2023), mas

também a episódios de precipitações mais intensas durante esse período, especialmente ao final de abril e início de maio/2023.

Figura 5.3-6 Teores de Turbidez: variação do valor máximo em relação ao *Baseline* nos respectivos períodos de estiagem.

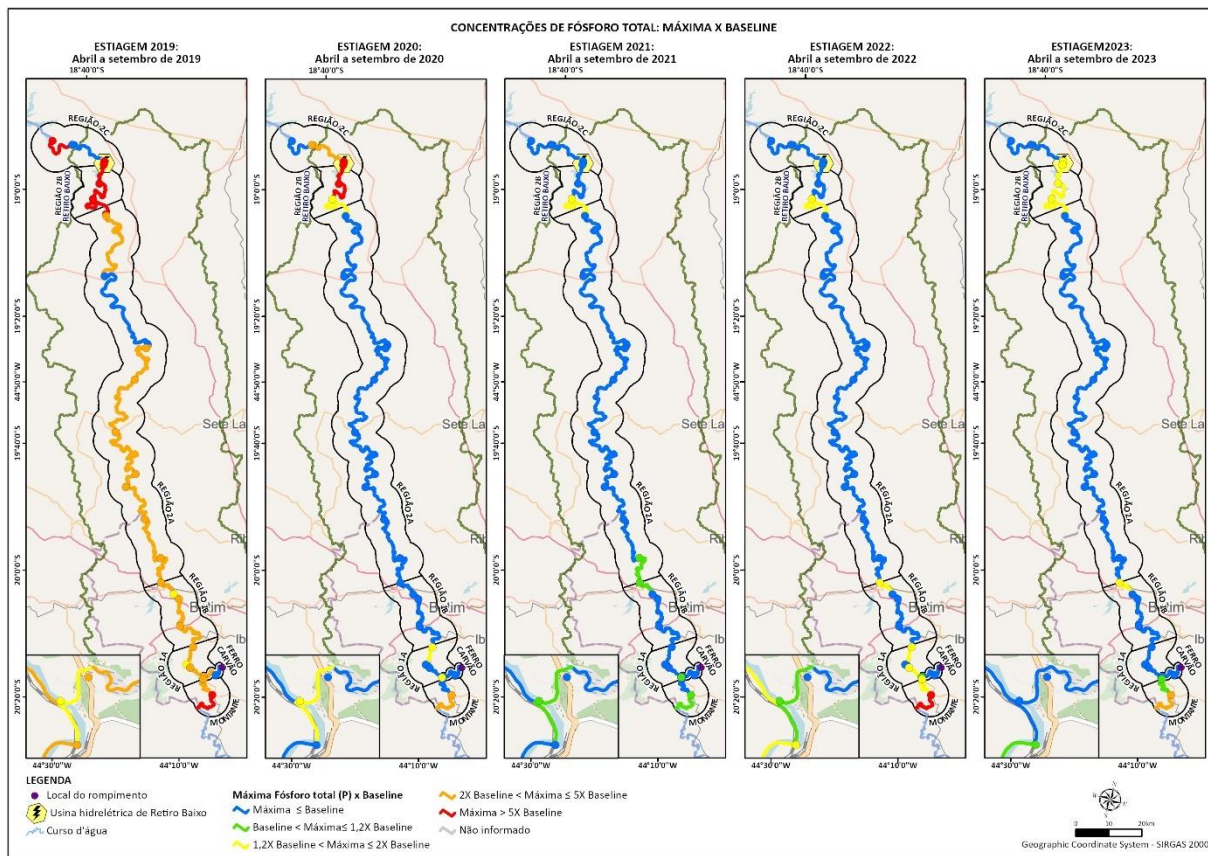


Na análise do Fósforo total, conforme representado na **Figura 5.3-7**, destaca-se a região de Montante durante o período de estiagem/2023. Nessa área, foram observadas concentrações máximas que atingiram até cinco vezes os valores de referência (*baseline*). Ao comparar com estiagens anteriores, destaca-se que na Região Montante, os menores desvios ocorreram durante a estiagem/2021, enquanto os maiores foram registrados na estiagem/2019.

Na Região Ferro-Carvão, verificou-se que os índices mais favoráveis foram observados nas estiagens de 2021 e 2023, em contraste com os menos favoráveis na estiagem/2019. Quanto à Região 1A, os menores afastamentos ao *baseline* foram alcançados nas estiagens de 2021 e 2023, enquanto os piores foram registrados na estiagem/2019.

Nas regiões 2B e 2C, notou-se um aumento nos afastamentos durante a estiagem/2023 em comparação com as estiagens de 2021 e 2022. No tocante às regiões 1B e 2A, estas não apresentaram oscilações significativas entre os períodos de estiagem/2022 e 2023. Além disso, a Região 2A indicou concentrações iguais ou inferiores ao *baseline* na estiagem/2020.

Figura 5.3-7 Teores de Fósforo total: variação do valor máximo em relação ao *baseline* nos respectivos períodos de estiagem.



5.4. Considerações

Por meio das avaliações realizadas para a água superficial, considerando todo o período de monitoramento, observa-se para o Alumínio dissolvido, sabe-se que este não é um marcador primário da presença do rejeito, sem abundância no mesmo e em regiões afetadas mais expressivamente por ele. No que tange ao Ferro dissolvido, seus baixos teores no ribeirão Ferro-Carvão corroboram a forma como esse elemento se encontra no rejeito, sob uma estrutura cristalina pouco solúvel, diferentemente dos sedimentos naturais da bacia, onde prevalecem estruturas amorfas de óxidos e hidróxidos mais solúveis. Em relação ao parâmetro Manganês dissolvido, seu comportamento é distinto do alumínio e do ferro, com concentrações superiores no ribeirão Ferro-Carvão se comparadas às concentrações registradas nas demais regiões monitoradas no rio Paraopeba.

Por meio dos testes de comparação espacial, é possível observar um comportamento predominante de redução das concentrações ou ausência de diferença significativa, em todas as regiões para o Manganês em ambas as frações, Ferro total e Turbidez, salvo alguns pontos que apresentam tendência significativa de elevação na Região 2A e 2C. Ao comparar as regiões mais impactadas (Ferro-Carvão, 1A e 1B) com a Região Montante (não impactada),

verifica-se similaridade em seu comportamento durante a estiagem/2023, aproximando-se, ademais, de um comportamento pretérito ao rompimento (*baseline*).

De maneira geral, nos períodos de estiagem, foi verificado pelos testes de comparação uma proximidade de comportamento dos resultados de Ferro e Alumínio em suas frações totais, com predomínio do aumento dos teores desses elementos, especialmente a partir da estiagem/2022 que sucedeu um intenso período chuvoso em 2021/2022.

Para o Manganês total, as regiões Montante, 1A e 1B apresentam concentrações similares entre si tanto na estiagem/2022 quanto na estiagem/2023. O mesmo comportamento ocorre quanto à ausência de diferença significativa com as concentrações de *baseline* nessas mesmas regiões, indicando aproximação às condições pretéritas da bacia mesmo em trechos afetados pelo rompimento. Comportamento contrário pode ser observado apenas na Região Ferro-Carvão, com aumento na estiagem/2023. Para as regiões mais distais (2A, 2B e 2C), ao longo do tempo e do espaço, predomina o comportamento de redução ou estabilidade estatística para esse analito.

No que diz respeito às frações dissolvidas, especialmente de Ferro e Alumínio, seus teores apresentam um comportamento predominante de aumento ao longo do tempo, em todas as regiões, porém com estabilidade ou redução na estiagem/2023. Nota-se, no entanto, um afastamento progressivo das condições de *baseline*, inclusive para a Região Montante não afetada. Apenas para o Alumínio dissolvido, na Região Ferro-Carvão, o comportamento indicou aumento significativo na estiagem/2023. No tocante ao Ferro dissolvido, seus baixos teores no ribeirão Ferro-Carvão corroboram a forma como esse elemento se encontra no rejeito, sob uma estrutura cristalina pouco solúvel, diferentemente dos sedimentos naturais da bacia, onde predominam estruturas amorfas de óxidos e hidróxidos mais solúveis.

Quanto ao parâmetro Manganês dissolvido, seu comportamento é distinto do alumínio e do ferro, com concentrações superiores no ribeirão Ferro-Carvão em comparação com as concentrações registradas nas demais regiões monitoradas no rio Paraopeba. Em termos de comparação temporal, de modo geral, nota-se uma predominância de comportamento de redução sucessiva e estabilidade ao longo do tempo.

Com relação à Turbidez, este é um parâmetro fortemente influenciado pela sazonalidade, com teores mais elevados na chuva. No entanto, no período de estiagem, chuvas atípicas de maior volume podem influenciar nos níveis/vazões dos trechos hídricos e, por consequência, nos teores de turbidez. Especialmente, a partir da estiagem/2021, todas as regiões apresentavam concentrações inferiores ou similares à Região Montante. A partir da Região 2B, sob influência do reservatório de Retiro Baixo, desde a estiagem/2019, a Turbidez já se apresentava mais reduzida e significativamente inferior aos demais trechos fluviais a montante. No tocante à variação temporal, observam-se condições de aumento das concentrações a partir da estiagem/2022 em relação às estiagens pretéritas, inclusive em relação ao *baseline*, ao longo do rio Paraopeba desde a Região Montante. Especificamente para a estiagem/2023, nota-se um cenário predominante de estabilidade e redução nas regiões de Montante até 2A, porém aumento nas regiões mais distais (2B e 2C).

Considerando o Fósforo total espacialmente, seus teores nas regiões 1A a 2A passam a apresentar similaridade estatística com os teores verificados em Montante a partir da estiagem/2022. Tal variabilidade de comportamento pode ser atribuída a diversos fatores, dentre os quais, os usos e ocupações típicos da bacia do rio Paraopeba, como os núcleos urbanos encontrados nas regiões 1A e 1B, bem como as áreas de vocação mais agrária da Região 2A. Importante destacar que, após o rompimento, foi observado aumento dos teores de Fósforo total nas regiões Ferro-Carvão até 1B, ocorrendo variações diversas ao longo dos diferentes períodos sazonais avaliados, relacionadas às contribuições difusas e pontuais ao longo da bacia. Assim, não é possível associar diretamente a elevação das concentrações de Fósforo total às contribuições do rejeito. Para as regiões 2B e 2C notam-se concentrações significativamente inferiores àquelas localizadas a montante dessas.

Por fim, compreende-se que as modificações observadas ao longo do tempo e espaço no rio Paraopeba resultam tanto dos rejeitos depositados na calha do rio, notadamente evidentes nas regiões próximas à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (regiões 1A e 1B), quanto das variações das condições sazonais e da resposta hidrológica da bacia como um todo. A bacia do rio Paraopeba experimentou condições hidrológicas bastante contrastantes durante o período de monitoramento, abrangendo momentos de alta e baixa pluviosidade/vazão, com potencial para ressuspender materiais (rejeitos + sedimentos) depositados na calha do rio, além do transporte hidráulico de sedimentos naturais da área de drenagem da bacia.

Vale ressaltar, ainda, que o comportamento sazonal precedente pode constituir um fator de influência potencial para o período subsequente, prolongando seus efeitos ao longo do tempo. Além disso, chuvas esporádicas e volumosas, inclusive extemporâneas, podem impactar o comportamento dos níveis dos cursos d'água, refletindo, assim, nos teores dos analitos avaliados. Para esses casos, é possível que o comportamento não mantenha persistência temporal.

6. Evolução das violações da água superficial aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba

6.1. Objetivo

Nesse tópico, objetiva-se avaliar as violações dos parâmetros de qualidade da água superficial monitorados no rio Paraopeba em relação aos padrões legais estabelecidos pela DN COPAM CERH 08/2022. Essa avaliação é feita a partir da análise dos resultados do monitoramento dos períodos sazonais de estiagem, com foco nos resultados obtidos durante a estiagem/2023.

6.2. Metodologia

A fim de identificar as violações em relação aos padrões legais, foram compiladas informações a respeito das amostras de água superficial coletadas no rio Paraopeba. Para isso, consideraram-se os períodos sazonais de estiagem 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023. Maior enfoque é dado a este último (abril/2023 a setembro/2023), uma vez que se trata do período de estiagem mais recente. Os resultados das análises de violações aos padrões nos períodos pretéritos podem ser consultados no último Relatório de Fechamento de Ciclo protocolado e referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2023 (ARCADIS, 2023a).

Confere a esta análise um conjunto de parâmetros do grupo de físico-químicos, sanitários e traço, que são representativos da qualidade hídrica para cada uma das regiões existentes. Além disso, foi considerado o *baseline* IGAM com a finalidade de comparar os dados históricos de antes e após o rompimento. Ressalta-se que muitos dos elementos no escopo desta análise não possuem série histórica e, assim, não faziam parte do programa de monitoramento do órgão ambiental no período de 2000 a 2018.

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Análise de violação aos padrões legais por períodos sazonais de estiagem

As análises de violação aos padrões legais foram segregadas por período sazonal de estiagem, sendo eles, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, para cada uma das regiões (Montante, Ferro Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C), e estão indicadas da **Tabela 6.3.1-1** à **Tabela 6.3.1-7**. Em caráter complementar, enfoque é dado às violações de cada ponto de monitoramento, dentro do contexto do último período de estiagem, abril/2023 a setembro/2023, conforme **Tabela 6.3.1-8**. Nas tabelas também constam os percentuais de violação registrados na série histórica pré-rompimento para o período sazonal de estiagem.

Tabela 6.3.1-1 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Montante

Tabela 6.3.1-2 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023– Ferro Carvão

Tabela 6.3.1-3 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 1A

Tabela 6.3.1-4 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 1B

Tabela 6.3.1-5 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2A

Tabela 6.3.1-6 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2B

Tabela 6.3.1-7 Parâmetros violados *baseline* IGAM X pontos Vale nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 – Região 2C

-	Montante																	
	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	182	26	↓ 14,3 %	96	13	↓ 13,5 %	140	88	↗ 62,9 %	28	20	↗ 71,4 %	12	7	↓ 58,3 %
Ferro Dissolvido	37	9	24,3 %	182	57	↗ 31,3 %	96	50	↗ 52,1 %	140	98	↗ 70,0 %	28	24	↗ 85,7 %	12	11	↗ 91,7 %
Manganês Total	36	31	86,1 %	182	70	↓ 38,5 %	96	54	↗ 56,3 %	140	29	↓ 20,7 %	28	20	↗ 71,4 %	11	10	↗ 90,9 %
Turbidez	37	0	0,0 %	182	9	↗ 4,9 %	96	2	↓ 2,1 %	140	1	↓ 0,7 %	28	7	↗ 25,0 %	12	2	↓ 16,7 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	29	3	10,3 %	181	3	↓ 1,7 %	17	2	↗ 11,8 %	140	0	↓ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	182	3	↗ 1,6 %	96	0	↓ 0,0 %	139	13	↗ 9,4 %	28	1	↓ 3,6 %	12	0	↓ 0,0 %
pH	37	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	139	7	↗ 5,0 %	28	3	↗ 10,7 %	12	0	↓ 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	181	0	▬ 0,0 %	93	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	0	0,0 %	181	5	↗ 2,8 %	93	2	↓ 2,2 %	140	3	↓ 2,1 %	28	8	↗ 28,6 %	12	2	↓ 16,7 %
Outros																		
Cianeto livre	10	0	0,0 %	180	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	139	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	139	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	15	40,5 %	182	11	↓ 6,0 %	17	4	↗ 23,5 %	139	8	↓ 5,8 %	28	18	↗ 64,3 %	12	2	↓ 16,7 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	181	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	138	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	37	1	2,7 %	182	18	↗ 9,9 %	52	2	↓ 3,8 %	140	1	↓ 0,7 %	28	4	↗ 14,3 %	12	1	↓ 8,3 %
Nitrato	37	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	17	0	↓ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	181	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	19	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	37	2	5,4 %	182	0	↓ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	1	↗ 3,6 %	12	0	↓ 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	17	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	182	0	▬ 0,0 %	96	0	▬ 0,0 %	140	0	▬ 0,0 %	28	0	▬ 0,0 %	12	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Ferro - Carvão																		
-	Baseline estiagem Vale			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	-	0	0,0 %	353	32	↗ 9,1 %	50	4	↘ 8,0 %	37	2	↘ 5,4 %	54	3	↗ 5,6 %	49	11	↗ 22,4 %
Ferro Dissolvido	420	33	7,9 %	353	34	↗ 9,6 %	50	3	↘ 6,0 %	37	0	↘ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	1	↗ 2,0 %
Manganês Total	418	416	99,5 %	353	353	↗ 100,0 %	50	50	▬ 100,0 %	37	37	▬ 100,0 %	54	54	▬ 100,0 %	48	48	▬ 100,0 %
Turbidez	424	33	7,8 %	351	351	↗ 100,0 %	50	38	↘ 76,0 %	37	9	↘ 24,3 %	54	42	↗ 77,8 %	49	41	↗ 83,7 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	354	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	7	↗ 14,0 %	37	0	↘ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	420	6	1,4 %	353	272	↗ 77,1 %	50	3	↘ 6,0 %	37	18	↗ 48,6 %	54	4	↘ 7,4 %	49	12	↗ 24,5 %
pH	434	2	0,5 %	353	1	↘ 0,3 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	1	↗ 1,9 %	49	1	↗ 2,0 %
Sólidos dissolvidos totais	420	0	0,0 %	353	0	▬ 0,0 %	50	0	▬ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	1	↗ 1,9 %	49	0	↘ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	418	19	4,5 %	353	335	↗ 94,9 %	50	17	↘ 34,0 %	37	5	↘ 13,5 %	54	17	↗ 31,5 %	49	17	↗ 34,7 %
Outros																		
Cianeto livre	-	0	0,0 %	353	6	↗ 1,7 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
DBO	418	8	1,9 %	353	0	↘ 0,0 %	50	0	▬ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	1	↗ 1,9 %	49	0	↘ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	34	11	32,4 %	353	200	↗ 56,7 %	50	5	↘ 10,0 %	37	0	↘ 0,0 %	53	1	↗ 1,9 %	49	2	↗ 4,1 %
Fenóis Totais	48	0	0,0 %	353	0	▬ 0,0 %	50	0	▬ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	191	28	14,7 %	353	324	↗ 91,8 %	50	10	↘ 20,0 %	37	8	↗ 21,6 %	54	28	↗ 51,9 %	49	25	↘ 51,0 %
Nitrato	179	0	0,0 %	353	0	▬ 0,0 %	50	0	▬ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Nitrito	-	0	0,0 %	353	0	▬ 0,0 %	50	0	▬ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	164	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	354	0	0,0 %	353	44	↗ 12,5 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Bário Total	-	0	0,0 %	353	63	↗ 17,8 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	-	0	0,0 %	353	95	↗ 26,9 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	53	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	354	2	0,6 %	353	320	↗ 90,7 %	50	7	↘ 14,0 %	37	1	↘ 2,7 %	54	4	↗ 7,4 %	49	6	↗ 12,2 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	353	116	↗ 32,9 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	-	0	0,0 %	353	8	↗ 2,3 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	354	0	0,0 %	353	14	↗ 4,0 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	354	0	0,0 %	353	100	↗ 28,3 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	-	0	0,0 %	353	150	↗ 42,5 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	2	↗ 4,1 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	0	↘ 0,0 %	37	0	▬ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	-	0	0,0 %	353	54	↗ 15,3 %	50	2	↘ 4,0 %	37	0	↘ 0,0 %	54	0	▬ 0,0 %	49	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Região 1A																		
Grupo de parâmetros	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	878	191	↗ 21,8 %	514	95	↓ 18,5 %	579	304	↗ 52,5 %	153	90	↗ 58,8 %	113	66	↓ 58,4 %
Ferro Dissolvido	37	5	13,5 %	878	310	↗ 35,3 %	514	338	↗ 65,8 %	579	362	↓ 62,5 %	153	114	↗ 74,5 %	113	85	↗ 75,2 %
Manganês Total	36	26	72,2 %	878	631	↓ 71,9 %	514	306	↓ 59,5 %	577	172	↓ 29,8 %	153	90	↗ 58,8 %	114	85	↗ 74,6 %
Turbidez	37	0	0,0 %	878	177	↗ 20,2 %	514	24	↓ 4,7 %	578	14	↓ 2,4 %	153	33	↗ 21,6 %	114	14	↓ 12,3 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	29	2	6,9 %	867	36	↓ 4,2 %	216	2	↓ 0,9 %	473	0	↓ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	871	96	↗ 11,0 %	513	4	↓ 0,8 %	578	22	↗ 3,8 %	153	0	↓ 0,0 %	114	2	↗ 1,8 %
pH	37	0	0,0 %	872	1	↗ 0,1 %	514	0	↓ 0,0 %	574	7	↗ 1,2 %	153	1	↓ 0,7 %	114	3	↗ 2,6 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	877	0	▬ 0,0 %	512	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	0	0,0 %	877	102	↗ 11,6 %	512	18	↓ 3,5 %	579	11	↓ 1,9 %	153	33	↗ 21,6 %	114	9	↓ 7,9 %
Outros																		
Benzo(a)antraceno	-	0	0,0 %	862	0	▬ 0,0 %	168	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	100	2	↗ 2,0 %	80	1	↓ 1,3 %
Benzo(a)pireno	-	0	0,0 %	862	0	▬ 0,0 %	168	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	101	3	↗ 3,0 %	80	1	↓ 1,3 %
Benzo(b)fluoranteno	-	0	0,0 %	862	0	▬ 0,0 %	168	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	101	2	↗ 2,0 %	80	1	↓ 1,3 %
Benzo(k)fluoranteno	-	0	0,0 %	859	0	▬ 0,0 %	111	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	101	1	↗ 1,0 %	80	1	↗ 1,3 %
Cianeto livre	10	0	0,0 %	584	24	↗ 4,1 %	216	2	↓ 0,9 %	473	0	↓ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	878	0	▬ 0,0 %	514	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Criseno	-	0	0,0 %	862	0	▬ 0,0 %	168	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	100	1	↗ 1,0 %	78	1	↗ 1,3 %
DBO	37	0	0,0 %	867	1	↗ 0,1 %	216	3	↗ 1,4 %	465	0	↓ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	35	94,6 %	866	246	↓ 28,4 %	216	97	↗ 44,9 %	469	402	↗ 85,7 %	151	99	↓ 65,6 %	114	49	↓ 43,0 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	867	3	↗ 0,3 %	216	0	↓ 0,0 %	469	0	▬ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	37	3	8,1 %	873	111	↗ 12,7 %	459	27	↓ 5,9 %	579	19	↓ 3,3 %	153	10	↗ 6,5 %	113	11	↗ 9,7 %
Nitrato	37	0	0,0 %	867	0	▬ 0,0 %	216	0	▬ 0,0 %	473	0	▬ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	867	0	▬ 0,0 %	216	0	▬ 0,0 %	473	0	▬ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	867	0	▬ 0,0 %	216	0	▬ 0,0 %	473	0	▬ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	19	0	0,0 %	877	0	▬ 0,0 %	514	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	878	0	▬ 0,0 %	216	0	▬ 0,0 %	473	0	▬ 0,0 %	151	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	878	1	↗ 0,1 %	514	0	↓ 0,0 %	579	1	↗ 0,2 %	153	0	↓ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	29	0	0,0 %	878	25	↗ 2,8 %	514	0	↓ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	1	↗ 0,7 %	114	0	↓ 0,0 %
Cobre Dissolvido	14	0	0,0 %	878	0	▬ 0,0 %	514	0	▬ 0,0 %	577	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	878	0	▬ 0,0 %	515	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	877	0	▬ 0,0 %	514	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	878	3	↗ 0,3 %	514	0	↓ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	878	0	▬ 0,0 %	514	0	▬ 0,0 %	579	0	▬ 0,0 %	153	0	▬ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	878	5	↗ 0,6 %	514	0	↓ 0,0 %	578	1	↗ 0,2 %	153	0	↓ 0,0 %	114	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Região 1B																		
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	22	4	18,2 %	737	209	↗ 28,4 %	104	36	↗ 34,6 %	95	25	↘ 26,3 %	240	80	↗ 33,3 %	247	83	↗ 33,6 %
Ferro Dissolvido	74	16	21,6 %	737	291	↗ 39,5 %	104	58	↗ 55,8 %	95	50	↘ 52,6 %	240	121	↘ 50,4 %	247	114	↘ 46,2 %
Manganês Total	72	39	54,2 %	737	714	↗ 96,9 %	104	91	↘ 87,5 %	95	42	↘ 44,2 %	240	133	↗ 55,4 %	246	169	↗ 68,7 %
Turbidez	74	0	0,0 %	737	117	↗ 15,9 %	104	9	↘ 8,7 %	94	0	↘ 0,0 %	240	10	↗ 4,2 %	246	19	↗ 7,7 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	58	6	10,3 %	737	36	↘ 4,9 %	104	10	↗ 9,6 %	95	0	↘ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	246	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	74	0	0,0 %	737	203	↗ 27,5 %	104	11	↘ 10,6 %	94	8	↘ 8,5 %	240	6	↘ 2,5 %	247	72	↗ 29,1 %
pH	74	0	0,0 %	737	3	↗ 0,4 %	104	0	↘ 0,0 %	94	1	↗ 1,1 %	240	32	↗ 13,3 %	247	37	↗ 15,0 %
Sólidos dissolvidos totais	60	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	74	1	1,4 %	737	62	↗ 8,4 %	104	3	↘ 2,9 %	95	0	↘ 0,0 %	240	7	↗ 2,9 %	246	8	↗ 3,3 %
Outros																		
Cianeto livre	28	2	7,1 %	736	1	↘ 0,1 %	104	0	↘ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	246	0	▬ 0,0 %
Cobre Total	14	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	246	0	▬ 0,0 %
DBO	74	1	1,4 %	737	0	↘ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	92	13	↗ 14,1 %	240	16	↘ 6,7 %	246	3	↘ 1,2 %
Escherichia/Coliformes	74	63	85,1 %	737	584	↘ 79,2 %	104	78	↘ 75,0 %	94	52	↘ 55,3 %	240	180	↗ 75,0 %	246	162	↘ 65,9 %
Fenóis Totais	74	2	2,7 %	737	0	↘ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	74	22	29,7 %	737	308	↗ 41,8 %	104	0	↘ 0,0 %	95	42	↗ 44,2 %	240	72	↘ 30,0 %	247	169	↗ 68,4 %
Nitrato	74	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	245	0	▬ 0,0 %
Nitrito	62	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	246	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	74	0	0,0 %	737	1	↗ 0,1 %	104	0	↘ 0,0 %	95	1	↗ 1,1 %	240	2	↘ 0,8 %	247	0	↘ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	38	0	0,0 %	736	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Bário Total	38	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	74	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	74	2	2,7 %	737	16	↘ 2,2 %	104	0	↘ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	28	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	54	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	38	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	56	0	0,0 %	737	1	↗ 0,1 %	104	0	↘ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	737	0	▬ 0,0 %	104	0	▬ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	56	0	0,0 %	737	7	↗ 0,9 %	104	0	↘ 0,0 %	95	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %	247	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Região 2A																		
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
	Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	33	4	12,1 %	1644	408	↗ 24,8 %	232	89	↗ 38,4 %	214	115	↗ 53,7 %	239	174	↗ 72,8 %	241	151	↘ 62,7 %
Ferro Dissolvido	111	7	6,3 %	1644	538	↗ 32,7 %	232	81	↗ 34,9 %	214	41	↘ 19,2 %	239	94	↗ 39,3 %	240	63	↘ 26,3 %
Manganês Total	108	41	38,0 %	1644	717	↗ 43,6 %	232	117	↗ 50,4 %	214	40	↘ 18,7 %	239	58	↗ 24,3 %	240	71	↗ 29,6 %
Turbidez	111	4	3,6 %	1644	187	↗ 11,4 %	231	24	↘ 10,4 %	212	3	↘ 1,4 %	239	9	↗ 3,8 %	241	31	↗ 12,9 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	87	9	10,3 %	1640	48	↘ 2,9 %	232	18	↗ 7,8 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	111	0	0,0 %	1644	42	↗ 2,6 %	232	9	↗ 3,9 %	212	12	↗ 5,7 %	239	9	↘ 3,8 %	242	2	↘ 0,8 %
pH	111	0	0,0 %	1644	3	↗ 0,2 %	231	0	↘ 0,0 %	214	4	↗ 1,9 %	237	14	↗ 5,9 %	242	8	↘ 3,3 %
Sólidos dissolvidos totais	90	0	0,0 %	1640	0	▬ 0,0 %	232	0	▬ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	111	3	2,7 %	1640	44	↘ 2,7 %	232	5	↘ 2,2 %	214	2	↘ 0,9 %	239	3	↗ 1,3 %	240	13	↗ 5,4 %
Outros																		
Cianeto livre	38	2	5,3 %	1538	5	↘ 0,3 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
DBO	111	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	210	6	↗ 2,9 %	238	0	↘ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	111	25	22,5 %	1644	172	↘ 10,5 %	232	36	↗ 15,5 %	214	8	↘ 3,7 %	238	19	↗ 8,0 %	239	7	↘ 2,9 %
Fenóis Totais	94	5	5,3 %	1644	1	↘ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	111	16	14,4 %	1644	566	↗ 34,4 %	232	4	↘ 1,7 %	214	89	↗ 41,6 %	239	10	↘ 4,2 %	242	45	↗ 18,6 %
Nitrato	111	0	0,0 %	1644	0	▬ 0,0 %	232	0	▬ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Nitrito	93	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	240	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	111	0	0,0 %	1639	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	57	0	0,0 %	1644	0	▬ 0,0 %	231	3	↗ 1,3 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Bário Total	57	0	0,0 %	1644	0	▬ 0,0 %	232	0	▬ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	241	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	111	0	0,0 %	1644	2	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	111	2	1,8 %	1644	8	↘ 0,5 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	241	0	▬ 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	1644	0	▬ 0,0 %	232	0	▬ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	66	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	69	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	57	0	0,0 %	1644	4	↗ 0,2 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	1644	1	↘ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	1644	0	▬ 0,0 %	232	0	▬ 0,0 %	214	0	▬ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	75	3	4,0 %	1644	2	↘ 0,1 %	232	1	↗ 0,4 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	▬ 0,0 %	242	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Região 2B																		
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	549	58	↓ 10,6 %	392	114	↑ 29,1 %	72	3	↓ 4,2 %	537	119	↑ 22,2 %	532	160	↑ 30,1 %
Ferro Dissolvido	20	0	0,0 %	549	24	↑ 4,4 %	392	87	↑ 22,2 %	72	0	↓ 0,0 %	537	40	↑ 7,4 %	531	35	↓ 6,6 %
Manganês Total	20	2	10,0 %	549	34	↓ 6,2 %	392	1	↓ 0,3 %	72	3	↑ 4,2 %	537	0	↓ 0,0 %	528	0	— 0,0 %
Turbidez	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	2	↑ 0,5 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	— 0,0 %	531	0	— 0,0 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	20	3	15,0 %	549	8	↓ 1,5 %	392	26	↑ 6,6 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	20	0	0,0 %	547	61	↑ 11,2 %	392	5	↓ 1,3 %	72	7	↑ 9,7 %	537	0	↓ 0,0 %	523	15	↑ 2,9 %
pH	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	390	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	536	2	↑ 0,4 %	517	52	↑ 10,1 %
Sólidos dissolvidos totais	16	0	0,0 %	547	0	— 0,0 %	390	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	20	0	0,0 %	547	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	2	↑ 0,4 %	525	0	↓ 0,0 %
Outros																		
Cianeto livre	14	0	0,0 %	447	5	↑ 1,1 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
DBO	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	391	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	20	3	15,0 %	549	3	↓ 0,5 %	392	1	↓ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	534	1	↑ 0,2 %	525	0	↓ 0,0 %
Fenóis Totais	20	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	391	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Fósforo Total	20	0	0,0 %	549	82	↑ 14,9 %	392	44	↓ 11,2 %	72	0	↓ 0,0 %	537	8	↑ 1,5 %	531	31	↑ 5,8 %
Nitrato	20	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Nitrito	19	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	529	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	20	0	0,0 %	548	3	↑ 0,5 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	520	0	— 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	11	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	530	0	— 0,0 %
Cádmio Total	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	1	↑ 0,2 %	532	0	↓ 0,0 %
Chumbo Total	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	— 0,0 %	531	0	— 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	20	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Cromo Total	15	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	549	0	— 0,0 %	392	0	— 0,0 %	72	0	— 0,0 %	537	0	— 0,0 %	532	0	— 0,0 %
Zinco Total	16	1	6,3 %	549	3	↓ 0,5 %	392	2	↓ 0,5 %	72	0	↓ 0,0 %	537	1	↑ 0,2 %	531	0	↓ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Região 2C																		
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022			Estiagem - Abril a Setembro/2023		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários																		
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	562	41	↓ 7,3 %	260	71	↗ 27,3 %	74	10	↓ 13,5 %	379	117	↗ 30,9 %	360	116	↗ 32,2 %
Ferro Dissolvido	20	0	0,0 %	562	4	↗ 0,7 %	260	56	↗ 21,5 %	74	0	↓ 0,0 %	380	16	↗ 4,2 %	360	5	↓ 1,4 %
Manganês Total	20	2	10,0 %	562	56	↓ 10,0 %	260	0	↓ 0,0 %	74	5	↗ 6,8 %	380	0	↓ 0,0 %	359	0	▬ 0,0 %
Turbidez	20	0	0,0 %	560	0	▬ 0,0 %	259	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	360	0	▬ 0,0 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	20	3	15,0 %	562	7	↓ 1,2 %	259	28	↗ 10,8 %	74	0	↓ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	20	0	0,0 %	561	120	↗ 21,4 %	259	6	↓ 2,3 %	74	4	↗ 5,4 %	380	2	↓ 0,5 %	359	17	↗ 4,7 %
pH	20	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	256	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	7	↗ 1,8 %	359	22	↗ 6,1 %
Sólidos dissolvidos totais	16	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	359	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	20	0	0,0 %	562	1	↗ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	1	↗ 0,3 %	354	0	↓ 0,0 %
Outros																		
Cianeto livre	14	0	0,0 %	277	4	↗ 1,4 %	246	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
DBO	20	0	0,0 %	562	1	↗ 0,2 %	259	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	360	0	▬ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	20	3	15,0 %	562	1	↓ 0,2 %	259	2	↗ 0,8 %	74	0	↓ 0,0 %	379	0	▬ 0,0 %	355	0	▬ 0,0 %
Fenóis Totais	20	0	0,0 %	377	1	↗ 0,3 %	245	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	20	0	0,0 %	562	31	↗ 5,5 %	260	9	↓ 3,5 %	74	0	↓ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	355	0	▬ 0,0 %
Nitrato	20	0	0,0 %	561	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Nitrito	19	0	0,0 %	561	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	360	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	20	0	0,0 %	562	1	↗ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	356	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	11	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	404	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	20	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	20	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	360	0	▬ 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	404	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	20	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	1	↗ 0,3 %	361	0	↓ 0,0 %
Cromo Total	15	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	562	1	↗ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	260	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	562	0	▬ 0,0 %	246	0	▬ 0,0 %	74	0	▬ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	16	1	6,3 %	562	3	↓ 0,5 %	260	1	↓ 0,4 %	74	0	↓ 0,0 %	380	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %

Obs.: Os percentuais de violações para cada parâmetro no período foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das violações em relação ao período anterior.

Tabela 6.3.1-8 Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco no período de estiagem/2023

Parâmetro	Resolução COPAM 08/22 VMP	Rio Paraopeba																												UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.		UHE TM									
		Mont.		Ferro Carvão				Região 1A					Região 1B					Região 2A							Região 2B			Região 2C																
		BP036	PT-52	FEI-COR-01	FEI-COR-03-AS	FEI-COR-07	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	BP068	PT-05	BP070	PT-03	PT-14	PT-48	BP072	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	BP082	PT-16	PT-17	PT-18	BP083	PT-49	BP078	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28		PT-21	PT-57	CE-02	BP099	JRB-02	PT-22			
MAJORITÁRIOS																																												
Manganês Total	0,1 mg/l	86	91	99	97	100	100	100	83	69	77	65	72	83	61	92	46	77	47	69	100	100	57	33	60	67	33	42	33	39	25	22	-	-	-	-	-	10	-	-				
Ferro Dissolvido	0,3 mg/l	24	92	7	11	8	-	4	82	77	88	92	14	38	16	50	23	35	27	51	33	40	43	14	20	33	50	3	25	3	25	24	15	5	1	2	2	-	-	-				
Alumínio Dissolvido	0,1 mg/l	18	58	NA	NA	NA	9	35	55	54	77	73	18	29	27	58	35	31	9	32	33	40	57	9	60	33	33	9	67	18	50	67	30	30	31	33	34	18	20	-				
Turbidez	100 NTU	-	17	11	-	6	100	69	25	12	12	15	-	4	-	25	4	-	-	8	17	20	14	-	20	17	17	5	17	5	17	12	-	-	-	-	-	-	-	-				
TRAÇOS																																												
Chumbo Total	0,01 mg/l	5	-	1	-	1	26	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Níquel Total	0,025 mg/l	-	-	NA	NA	NA	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Zinco Total	0,18 mg/l	-	-	NA	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	3	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-		
FÍSICO-QUÍMICOS																																												
DBO	5 mg/l	-	-	3	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Oxigênio dissolvido	5 mg/l	-	-	2	-	2	13	35	-	-	-	-	-	4	-	33	-	15	-	35	-	-	14	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	2	1	6	7	4	-	-	-			
pH	6 a 9	-	-	1	-	1	-	4	-	4	-	-	9	-	17	15	8	-	16	17	-	29	-	20	17	-	-	25	-	-	-	7	14	11	6	6	-	-	-	-	-			
Sólidos suspensos totais	100 mg/l	-	17	6	-	4	70	4	17	8	8	12	-	-	3	8	-	-	-	4	17	20	14	3	20	17	17	3	17	3	17	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
OUTROS																																												
Escherichia coli	1000 NMP/100ml	41	17	63	23	NA	9	-	17	8	23	81	95	75	84	92	58	77	86	64	50	40	-	35	40	-	-	24	-	8	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-				
Fósforo Total	0,1(Lót); 0,05(Interm.)	3	8	17	-	17	91	15	9	8	15	15	8	-	8	17	4	54	51	83	67	100	100	32	100	83	50	8	58	3	33	3	15	2	1	-	-	-	-	-	-			
Benzo(a)antraceno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Benzo(a)pireno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Benzo(b)fluoranteno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Benzo(k)fluoranteno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Criseno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Dibenzo(a,h)antraceno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,5 ug/l	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
N coletas realizadas		37	12	199	36	199	23	26	12	26	26	26	37	24	37	12	26	26	37	183	6	5	7	37	5	6	6	37	12	37	12	183	179	176	177	163	167	20	25	6				

Menor % Desconformidade Legal Maior % desconformidade legal

Nota:
 Os pontos com marcação em cinza são referentes ao *baseline*, e foram assim feitos para diferenciar dos demais pontos de monitoramento da Vale.
 N coletas realizadas = número de coletas realizadas no ponto. Este número não equivale ao N amostral e pode variar de acordo com o parâmetro. Ou seja, o resultado de um determinado parâmetro pode estar disponível para uma determinada coleta, mas o de outro parâmetro não necessariamente.
 - = Não houve violações no período.
 NA = Não analisado.
 NC = Não houve coleta.
 NR = Resultado não disponibilizado na data de fechamento do banco de dados.

Na região de Montante, de acordo com a **Tabela 6.3.1-1**, observa-se redução do percentual de violações para Alumínio dissolvido e Turbidez, e aumento para Ferro dissolvido e Manganês total, no período de estiagem/2023 (Alumínio dissolvido: 58,3%; Turbidez: 16,7%; Ferro dissolvido: 91,7%; Manganês total: 90,9%) em relação ao período de estiagem anterior (2022) e, para todos os parâmetros majoritários, percentis mais elevados do que na condição do *baseline* sazonal (Alumínio dissolvido: 18,2%; Ferro dissolvido: 24,3%; Manganês total: 86,1%; Turbidez: 0%).

Já para os parâmetros físico-químicos, ocorreu elevação dos percentuais no período de estiagem atual para Sólidos suspensos totais (16,7%), destacando-se a não ocorrência de violações na condição do *baseline*. Para Oxigênio dissolvido e pH, a condição foi de redução das violações nos períodos de estiagem/2023 em relação ao pretérito (2022) e, para ambos os parâmetros, notou-se manutenção do percentual de violação em relação ao quantificado no contexto do *baseline* IGAM.

Quanto aos parâmetros vinculados a contribuições difusas e de origem sanitária, têm-se a *Escherichia coli* apresentando redução no período sazonal 2023 em relação ao período de estiagem/2022 (16,7%), sendo este quantitativo menor que aqueles verificados nos demais períodos de estiagem (exceto na estiagem/2021) e *baseline*, e para o Fósforo total, têm-se uma diminuição em relação ao período de estiagem/2023 (8,3%) e elevação em relação a condição de *baseline* (2,7%).

Dentre os parâmetros traço analisados, nota-se que não houve violações no período sazonal de referência (estiagem/2023), sendo que o parâmetro Chumbo total apresentou redução no percentual apesar de nenhuma violação. Vale ressaltar que alguns parâmetros categorizados como físico-químicos, traços e outros não apresentaram violações em nenhum período de estiagem e/ou condição de *baseline*. Representa essa região, o ponto PT-52, ponto localizado no rio Paraopeba, a montante do ribeirão Ferro-Carvão conforme indicado na **Tabela 6.3.1-8**.

O Manganês total, Ferro dissolvido e Alumínio dissolvido (de forma secundária), como já destacado, são elementos indicadores de alteração da qualidade da água associados ao rejeito. Ainda assim, os resultados indicam que mesmo nas áreas não afetadas pelo material proveniente no rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, alguns parâmetros apresentam valores acima do VMP, inclusive na série histórica pré-rompimento, evidenciando que há diferentes fontes de contribuição para o aumento desses analitos no meio. Na região a montante do rompimento, tais violações podem refletir as atividades de mineração da porção mais alta da bacia e a constituição geológica regional no alto rio Paraopeba. Além disso, vale ressaltar que os efeitos de períodos sazonais antecedentes podem influenciar nos períodos seguintes, dada a capacidade da bacia em transportar e acomodar sedimentos ao longo do rio no decorrer do tempo, o que contribuiria como potencial fonte adicional disponível para um próximo ciclo de chuvas e escoamento na bacia.

Na região do ribeirão Ferro-Carvão, de acordo com a **Tabela 6.3.1-2**, todos os parâmetros majoritários apresentaram violações aos padrões legais no período de estiagem/2023, e em

proporções variáveis para os metais, diferindo de montante que, apesar da diferença do N amostral, apresentou violações em maior ordem de grandeza para todos eles, conforme pode ser verificado na **Tabela 6.3.1-1**.

Para Alumínio dissolvido, houve elevação do percentual de violação (22,4%) em relação ao período de estiagem anterior, porém o percentual se manteve acima do *baseline* de estiagem, sendo nulo para esta região. Para o Ferro dissolvido e Turbidez, o comportamento foi de aumento das violações em relação ao período de estiagem/2022, equivalendo a 2% e 83,7%, respectivamente, sendo apenas o Ferro dissolvido abaixo do valor de *baseline*. Enquanto para Manganês total, o comportamento foi de manutenção no percentual de violação.

Conforme **Tabela 6.3.1-8**, violações de Turbidez são mais recorrentes nas amostras do PT-11, situado espacialmente em uma área com recorrentes intervenções e obras relacionadas à reparação e manutenção da região de Ferro-Carvão.

Quanto ao Ferro dissolvido, nota-se a partir da **Tabela 6.3.1-1**, em termos de comparação temporal, uma redução sucessiva das violações desde 2020, assim como é possível observar este mesmo comportamento para os resultados bruto deste analito, conforme discutido no **item 5**.

Já para o Manganês total, observam-se violações equivalentes em todos os períodos anteriores de estiagem (100%), valor superior ao percentual indicado no *baseline*. Ambos os pontos dessa região, PT-11 e PT-12, apresentaram violações em todas as amostras coletadas, conforme pode ser observado na **Tabela 6.3.1-8**.

Complementarmente, verifica-se que os pontos de *baseline* Vale (FEI-COR-01; FEI-COR-03-AS; FEI-COR-07) também possuem percentuais de violação mais elevados, acima de 99%, já apontando para condições de alteração da qualidade da água previamente ao rompimento das barragens na região.

Em suma, nota-se menor variabilidade no comportamento das violações no período de estiagem/2022 (aumento e redução), ao passo que nos períodos pretéritos este comportamento torna-se muito variável dentro de um mesmo período de estiagem.

A região do ribeirão Ferro-Carvão foi a primeira área a ser afetada pelo rejeito oriundo das barragens B1, B4 e B4-A, sendo o ribeirão Ferro-Carvão o corpo hídrico mais impactado e tendo a maior parte de sua extensão alterada morfológicamente pela força e volume de rejeito carregado, estando seu leito sob influência de obras e, para a região onde se encontra o reservatório Estaca Prancha, disposição de material dragado. Dito isso, vale ressaltar que no período de estiagem/2023, as atividades de dragagem, no âmbito da reparação, que estavam paralisadas desde 12/12/2022, retornaram 26/07/2023.

Importante destacar, ademais, que para evitar que a água e sedimentos deste ribeirão continuassem a fluir diretamente para o rio Paraopeba, a Vale instalou uma cortina metálica (Estaca Prancha) neste ribeirão e escavou uma área para acúmulo de água e sedimentos, os

quais foram limitados pela citada cortina metálica. O fluxo natural das águas do ribeirão Ferro-Carvão foi desviado para a Estação de Tratamento de Águas Fluviais 1 (ETAF1) e, posteriormente, lançado no curso d'água denominado ribeirão Casa Branca, afluente direto do rio Paraopeba pela margem direita. Objetivou-se com essas obras a retenção de sedimentos nas barreiras hidráulicas, dique de contenção e barreiras de estabilização de calha fazendo com que o ribeirão Ferro-Carvão apresentasse melhorias em suas águas e em sua morfologia ao longo do tempo. Tal condição pode ser evidenciada por uma redução dos percentuais de violação na qualidade da água superficial nos anos posteriores a 2019, principalmente ao se considerarem os parâmetros majoritários e traço.

Em relação aos físico-químicos, no período de estiagem/2023, na região do ribeirão Ferro-Carvão, foi observada elevação das violações para Oxigênio dissolvido (24,5%), pH (2%) e Sólidos suspensos totais (34,7%), quando comparado com o período de estiagem/2022, enquanto os parâmetros Cor verdadeira e Sólidos dissolvidos totais apresentaram manutenção e redução, respectivamente. Todos os parâmetros que apresentaram violações no período de estiagem atual (2023) obtiveram percentual mais elevado que o *baseline*. Para os demais parâmetros, houve aumento para Chumbo total (12,2%) e Níquel total (4,1%), ambos acima da condição de *baseline* sazonal. De acordo com a **Tabela 6.3.1-2**, o analito Chumbo total, apresentou reduções até o período de estiagem/2021, sendo verificado aumento das violações em 2022 e 2023, em função das chuvas atípicas a este período sazonal. No último período de estiagem (2023), nota-se um maior quantitativo de violações na região de Ferro-Carvão se comparado a montante, ficando as maiores violações condicionadas ao PT-11. Para os traços, houve aumento das violações para o Chumbo (12,2%) e Níquel (4,1%) em suas frações totais, se comparado os dois últimos períodos de estiagem, enquanto para o Chumbo total, as violações apresentaram-se superiores aos percentuais registrados em todos os períodos de de estiagem pretéritos (exceto a estiagem/2020), e, superior ao *baseline*. Para este grupo, todas as violações ocorreram no PT-11, ponto localizado em região de constante movimentação de maquinário e intervenções para fins reparação (**Tabela 6.3.1-8**).

Após a região do ribeirão Ferro-Carvão, a Região 1A (**Tabela 6.3.1-3**), monitorada pelos pontos BP068 (*Baseline* IGAM) e PT-01, PT-13, PT-09, PT-02, PT-05 (Vale), foi a primeira a ser afetada pelo rompimento e, assim, a região do rio Paraopeba mais sujeita a alterações, especialmente quando sob influência das operações de dragagem ativas nesse trecho fluvial (que cessaram a partir do dia 12/12/2022 no último período de chuva completo e retornaram dia 26/07/2023) e que tem influência pontual e rapidamente reversível, e das obras de reparação e manutenção do trecho a montante, Ferro-Carvão.

No período de estiagem/2023, verificou-se que a Região 1A apresentou, para os metais majoritários, percentuais de violação mais reduzidos que no período de estiagem anterior, para Alumínio dissolvido e Turbidez, e para todos mais elevados que o *baseline* sazonal. De acordo com a **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos apresentaram violações mais elevadas para os metais majoritários. Para a Turbidez, o comportamento foi de redução das violações. No âmbito

espacial, têm-se todos os pontos apresentando violações abaixo de 30% das amostras. Quanto aos parâmetros físico-químicos, têm-se aumento das violações para Oxigênio dissolvido (1,8%) e pH (2,6%), sendo ambos os parâmetros superiores ao *baseline* sazonal. Para os Sólidos suspensos totais, no período de estiagem/2023, houve redução das violações (7,9%) em relação ao período de estiagem/2022, e aumento em relação ao *baseline* sazonal. Este analito apresentou violações mais elevadas em todos os pontos contemplados nessa região, exceto no ponto de *baseline* BP068. Quanto aos outros parâmetros, as reduções das violações ocorreram para *E. coli* (43% em quase todos os pontos da região, exceto o PT-09); Criseno (1,3%, no ponto PT-13); Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno e Benzo(b)fluoranteno (1,3%, no ponto PT-13), e elevação para Benzo(k)fluoranteno (1,3%). Com exceção do parâmetro sanitário *E. coli*, a presença dos demais elementos é considerada pontual e infrequente, visto a baixa representatividade dessas violações frente ao N amostral considerado, podendo elas serem relacionadas à presença de máquinas que operam em atividades diversas a montante da área de dragagem e ao longo do rio Paraopeba e que podem, eventualmente, ser fontes de vazamentos de combustíveis ou óleos lubrificantes derivados do petróleo. Na análise por pontos, tendo como referência a **Tabela 6.3.1-8**, têm-se violações mais elevadas para *E. coli* quanto mais próximo do final dessa região. Dentre os parâmetros traço, redução de violações foram verificadas para o Chumbo (nulo), em suas frações totais, que apresentou maiores resultados em 2019, e, para o período atual (estiagem/2023) valor equivalente ao *baseline* sazonal.

Ainda no que se refere as ocorrências dos parâmetros orgânicos ao longo do rio transitam embarcações e com presença de dragas para extração de areia, com destaque para as presentes próximas ao PASU-DR0 (ponto de monitoramento do Plano de Monitoramento de Obras, localizado a montante do PT-01).

De acordo com a **Tabela 6.3.1-4**, na Região 1B, monitorada pelos pontos BP070 e BP072 (*baseline* IGAM) e PT-03, PT-14, PT-48 e PT-15 (Vale), observa-se registro de violações em todos os períodos analisados, inclusive *baseline*, para todos os majoritários, Oxigênio dissolvido, pH, Sólidos suspensos totais, DBO, *E. coli*/Coliformes e Fósforo total. No período de estiagem/2023, ocorreram violações para todos os parâmetros majoritários: Alumínio dissolvido (33,6%), Ferro dissolvido (46,2%), Manganês total (68,7 %) e Turbidez (7,7%) e físico-químicos: Oxigênio dissolvido (29,1%), pH (15%), e Sólidos suspensos totais (3,3%), cujos percentuais de desvios, de modo geral, sofreram aumento quando comparado ao ciclo de estiagem anterior (2022), exceto para Ferro dissolvido, mas foram superiores às condições de *baseline* de estiagem. De acordo com a **Tabela 6.3.1-8**, nota-se que, de modo geral, os menores percentuais observados para os parâmetros majoritários e Sólidos suspensos totais ocorreram nos pontos de *baseline* BP070 e BP072, ainda que desvios tenham sido observados em todos os pontos de monitoramento da 1B. Desvios do padrão legal também foram observados para Oxigênio dissolvido e Sólidos suspensos totais.

Para os parâmetros de cunho sanitário, houve registro de violações para DBO (1,2%), *E. coli*/Coliformes (65,9%), Fósforo total (68,4%) e Nitrogênio amoniacal (nulo). Dentre estes, para DBO, *E. coli* e Nitrogênio amoniacal o percentual se manteve abaixo do *baseline* de estiagem (1,4%, 85,1% e 0%, respectivamente), bem como do período de estiagem anterior (6,7%, 75% e 0,8%, respectivamente), ao passo que Fósforo total apresentou aumento em relação aos dois períodos (*baseline* = 29,7% e 2022 = 30%). As violações ocorreram de forma pontual para DBO no PT-15, enquanto as violações para *E. coli* e Fósforo total se estenderam ao longo dos pontos monitorados na Região 1B, com destaque para elevados percentuais já na série histórica pré-rompimento (**Tabela 6.3.1-8**).

Para os parâmetros traço, nota-se que não houve violação para nenhum parâmetro desta categoria, como pode ser observado na **Tabela 6.3.1-8**.

É importante considerar a marcante influência urbana na Região 1B, com destaque para parâmetros associados às possíveis contribuições sanitárias e aqueles que representam suas eventuais consequências. Destaca-se a presença do afluente direto do rio Paraopeba (próximo ao PT-14), denominado rio Betim, a montante do ponto PT-48, monitorado pelo ponto TT-01. Ademais, ainda vale destacar, a presença na região de três rodovias de médio a grande porte, como a BR-381 (PT-03), BR-262 (PT-06) e MG-050 (mais próximo do PT-04), cuja drenagem pluvial das vias e suas contribuições potencialmente podem influenciar na qualidade da água nesse trecho, principalmente nos períodos chuvosos. Por fim, entende-se que a usina termelétrica denominada UTE Igarapé, com sua soleira vertente disposta na calha do rio Paraopeba, seja uma condição de contorno importante para a retenção e, também, ressuspensão de sedimentos nas passagens das ondas de cheia observadas.

Na Região 2A, monitorada pelos pontos agregados BP082, BP083, BP078 (*baseline* IGAM) e PT-53; PT-54; PT-43; PT-16; PT-17; PT-18; PT-49; PT-19; PT-55 (Vale), **Tabela 6.3.1-5**, observa-se registro de violações em todos os períodos analisados, inclusive *baseline*, para todos os majoritários, Oxigênio dissolvido, pH, Sólidos suspensos totais, *Escherichia*/Coliformes e Fósforo total. Observa-se queda dos percentuais de violação dos parâmetros majoritários, Alumínio dissolvido e Ferro dissolvido, dos parâmetros categorizados como físico-químico (exceto Sólidos suspensos totais) e “Outros” (exceto Fósforo total) se comparados àqueles registrados nas regiões anteriormente analisadas. É importante ressaltar que o trecho fluvial da Região 2A se situa em porção da bacia do rio Paraopeba de menor caráter urbano e mais distante do rompimento das barragem B1. Portanto, considera-se que esta região apresenta menor efeito do material depositado no leito do rio Paraopeba. Além disso, essa região apresenta longa extensão e sua posição, em porção mais a jusante na bacia, implica em maiores vazões dada a maior área de drenagem/contribuição da mesma nesse trecho.

Em termos dos parâmetros majoritários, no período de estiagem/2023, foram registradas inconformidades para Alumínio dissolvido (62,7%), Ferro dissolvido (26,3%), Manganês total (29,6%) e Turbidez (12,9%). Esses percentuais de violação se apresentaram mais elevados

que os valores de *baseline* de estiagem da região (com exceção de Manganês total), porém inferiores aos observados no ciclo de estiagem anterior (2022), exceto para Manganês total e Turbidez que apresentaram um aumento de 24,3% para 29,6%, e, de 3,8% para 12,9%, respectivamente. De acordo com a **Tabela 6.3.1-8**, observa-se ocorrência de violações para todos esses parâmetros em todos os pontos da Região 2A, embora os menores percentuais tenham sido registrados, de modo, geral, nos pontos de PT-55 e PT-19. Cabe destacar a recorrência de violações do Alumínio dissolvido na região, que pode ser explicada pelo fato dela se encontrar em meio à formação geológica do Complexo Bambuí, rica em Alumínio.

Na Região 2A, em relação aos físico-químicos analisados, ocorreram violações na estiagem/2023 para Oxigênio dissolvido (0,8%), pH (3,3%) e Sólidos suspensos totais (5,4%). Exceto para Sólidos suspensos totais, houve redução no percentual de desvios identificados do ciclo anterior (2022) para o atual (2023). De modo geral o percentual de violação no ciclo de referência foi superior aos de *baseline*. Além disso, ocorreram violações para os parâmetros *E. coli* /Coliforme (2,9%) e Fósforo total (18,6%), sendo *E. coli* com percentual inferior ao observado no período de estiagem anterior e inferior aos percentuais do *baseline* enquanto Fósforo total apresentou comportamento contrário. Já para os traços, assim como observado na região anterior, nota-se que não houve registro de violações apenas para nenhum desses parâmetros (**Tabela 6.3.1-8**).

Para a Região 2B, **Tabela 6.3.1-6**, a qual compreende os pontos de monitoramento PT-20, PT28 e PT21 (Vale) e o BP099 (*baseline* IGAM), que se localizam no interior do reservatório da UHE Retiro Baixo, os percentuais de violação se tornam ainda mais reduzidos, dada a mudança do regime hidráulico de ambiente lótico para lântico, favorável à sedimentação das partículas e conseqüente atenuação das concentrações na superfície da água. Nesta região, no período de estiagem/2023, houve violação para Alumínio dissolvido (30,1%) e Ferro dissolvido (6,6%), sendo para Alumínio dissolvido percentual superior ao registrado no período de estiagem/2022 (22,2%) e superior, para o Ferro dissolvido, ao período de estiagem anterior (estiagem/2022) e ao *baseline* de estiagem para ambos os parâmetros. Destaca-se que Alumínio dissolvido apresentou desvios, em maior grau, em todos os períodos de estiagens analisados, inclusive *baseline*. Conforme indicado na **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos localizados na Região 2B registraram desvio para os majoritários no período de estiagem/2023, sendo os maiores percentuais identificados no PT-21 e PT-28.

Para os físico-químicos, no período de estiagem/2023 houve violação para Oxigênio dissolvido (2,9%), pH (10,1%) e Sólidos suspensos totais (nulo), que também registraram desvio em períodos de estiagem anteriores. Comparando com o período anterior (2022), percebe-se elevação no percentual de violação para Oxigênio dissolvido e pH (0% para 2,9% e 0,4% para 10,1%, respectivamente) e uma redução para Sólidos suspensos totais (0,4% para 0%). Conforme **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos de monitoramento da região violaram Oxigênio dissolvido e pH no período de estiagem/2023.

Para os parâmetros traço, não foram registrados desvios ao longo dos períodos analisado, com redução dos percentuais de Cádmio total e Zinco total (0% para ambos). Para os demais parâmetros analisados, houve registro de violação para Fósforo total em todos os períodos analisados (exceto *baseline* e em 2021), sendo no último ciclo (2023) identificados para todos os pontos (**Tabela 6.3.1-8**). Para o parâmetro *E. coli* foi observado redução do percentual sem registros de desvios.

Conforme mencionado anteriormente, a Região 2B se situa em um ambiente cujas condições hidráulicas de escoamento fluvial são distintas dos trechos de montante do rio Paraopeba. Ademais, o reservatório apresenta configuração na qual o volume reservado e o elevado tempo de detenção hidráulica, dentre outros fatores, são determinantes para favorecer a atenuação de boa parte dos parâmetros avaliados.

Por fim, a Região 2C, **Tabela 6.3.1-7** tende a apresentar condições que se assemelham às águas contidas no reservatório da UHE Retiro Baixo em sua porção mais próxima ao barramento e, em função disso, os percentuais de violação foram, em geral, mais baixos que os das demais regiões, principalmente comparada ao trecho de Montante a 2A. Dentre os majoritários, na estiagem/2023, houve violação para Alumínio dissolvido (32,2%) e Ferro dissolvido (1,4%), sendo para Alumínio dissolvido percentual superior aos registrados no período de estiagem/2022 (30,9%) e inferior, para Ferro dissolvido, ao período de estiagem anterior (2022), contudo, ambos os parâmetros superiores ao *baseline* de estiagem (18,2%, e 10 %, respectivamente). Destaca-se que esses parâmetros apresentaram desvios, em maior ou menor grau, em todos os períodos de estiagem analisados, inclusive *baseline*. Conforme indicado na **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos localizados na Região 2C registraram desvio para os majoritários (exceto o PT-22) no período de estiagem/2023, incluindo o BP099 (*baseline*).

Para os físico-químicos, houve violação para Oxigênio dissolvido (4,7%) e pH (6,1%), que também registraram desvio em períodos de estiagem anteriores. Nesse período observa-se, de modo geral, uma condição de redução no percentual de violações. Exemplo de exceção se deu para Alumínio dissolvido, cujo percentual aumentou de 30,9% para 32,2% nos últimos ciclos analisados (2022 para 2023), e para Oxigênio dissolvido e pH, de 0,5% para 4,7% e de 1,8% para 6,1%, respectivamente. Conforme **Tabela 6.3.1-8** todos os pontos de monitoramento da região (exceto PT-22) violaram Alumínio dissolvido no período de estiagem/2023, e os únicos pontos que registraram desvios para os dois físico-químicos mencionados anteriormente foram os PT-57 e CE-02.

Para os parâmetros traço, foram registrados desvios pontuais ao longo do período analisado, sem nenhuma violação identificada no ciclo de 2023. Para os demais parâmetros analisados, não houve registro de violação, porém comportamento de redução para Cobre dissolvido no último ciclo (2023) (**Tabela 6.3.1-8**).

De maneira geral, para os elementos Ferro e Alumínio, em suas frações dissolvidas, dentro dos períodos de estiagem analisados, notaram-se violações inferiores na Região 2A se

comparado às demais regiões, Montante (não impactada), Ferro-Carvão e 1A a 2C, localizadas no rio Paraopeba.

Temporalmente, esses desvios apresentam um comportamento gradual de redução das violações em todas as regiões analisadas, com aumentos na estiagem/2023, possivelmente associadas a chuvas esporádicas no período, contudo de grande expressão. Em geral e especificamente no período de 2023, comparando-se com 2022, têm-se redução do quantitativo de violações, o que pode estar associado à redução das precipitações.

De maneira particular, uma menor quantidade de violações é registrada para o Ferro dissolvido no ribeirão Ferro-Carvão, e isto, pode ser corroborado com a forma que este metal se configura no rejeito, com uma estrutura cristalina pouco solúvel, diferentemente dos sedimentos naturais da bacia, onde prevalecem estruturas amorfas de óxidos e hidróxidos mais solúveis. Já para o Manganês total, observa-se em geral, um número superior de violações no Ferro-Carvão se comparado as demais regiões nos diferentes períodos de estiagem, exceto pelas regiões 2B e 2C, que apresentam redução na magnitude dos desvios.

Já a Turbidez, assim como evidenciado na análise de qualidade da água expressa no **item 5**, é um parâmetro que têm influência da sazonalidade e do reservatório de Retiro Baixo quando avaliados os dados obtidos para a Região 2B e a jusante desta, nas quais, observa-se um quantitativo inferior de violações se comparado aos trechos, a montante, que possuem regime de fluxo lóxico.

Complementarmente, foram analisados pontos localizados nas seções de captações de água para abastecimento público que foram desativadas em função do rompimento. Compreendem os seguintes pontos: PT-02-Captação COPASA (Região 1A), PT-43-Captação Águas de Pará de Minas (Região 2A) e PT-49-Captação COPASA (Região 2A). Ao analisar os resultados desconformes para os referidos pontos, compreendendo os períodos de estiagem/2022 e 2023, observou-se redução de violação para os metais majoritários e aumento ou redução (no PT-49), e aumento para a Turbidez. Para os parâmetros traços, nota-se os mesmos metais apresentando violações, entretanto, em baixos percentuais. Para os parâmetros sanitários *E. coli* e Fósforo total, observou-se de forma predominante o aumento dos desvios no período de estiagem/2023. O mesmo comportamento foi observado para os Sólidos suspensos totais. Ao comparar os desvios registrados nesses pontos com a condição de *baseline* sazonal, nota-se proximidade das violações principalmente para o Manganês total e *E. coli* (ponto: PT-02; *baseline*: BP068) e Manganês total (ponto: PT-49; *baseline*: BP083).

6.3.2. Mapas temáticos - VMP

Nas **Figuras 6.3-1 a Figura 6.3-8**, são apresentados mapas temáticos que permitem visualizar o comportamento da bacia do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço, no que diz respeito às violações aos limites legais para classes de enquadramento segundo a DN COPAM-CERH nº 08/2022. Nos referidos mapas, é apresentada a métrica estatística

correspondente aos máximos valores dos resultados de monitoramento agregados pelo conjunto de pontos de cada uma das regiões avaliadas.

Os parâmetros contemplados no presente item, em ordem de apresentação dos mapas, são: Manganês total (**Figura 6.3-1**), Ferro dissolvido (**Figura 6.3-3**), Alumínio dissolvido (**Figura 6.3-5**) e Turbidez (**Figura 6.3-7**). Assim, é possível visualizar a condição de afastamento e aproximação de tais resultados em relação aos limites legais nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Verifica-se que, após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, nos primeiros meses subsequentes, os metais marcadores apresentaram substancial comportamento de violações aos padrões em função dos impactos do citado evento e tendência de aumento em função das precipitações registradas na época.

▪ **Manganês total**

Figura 6.3-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP

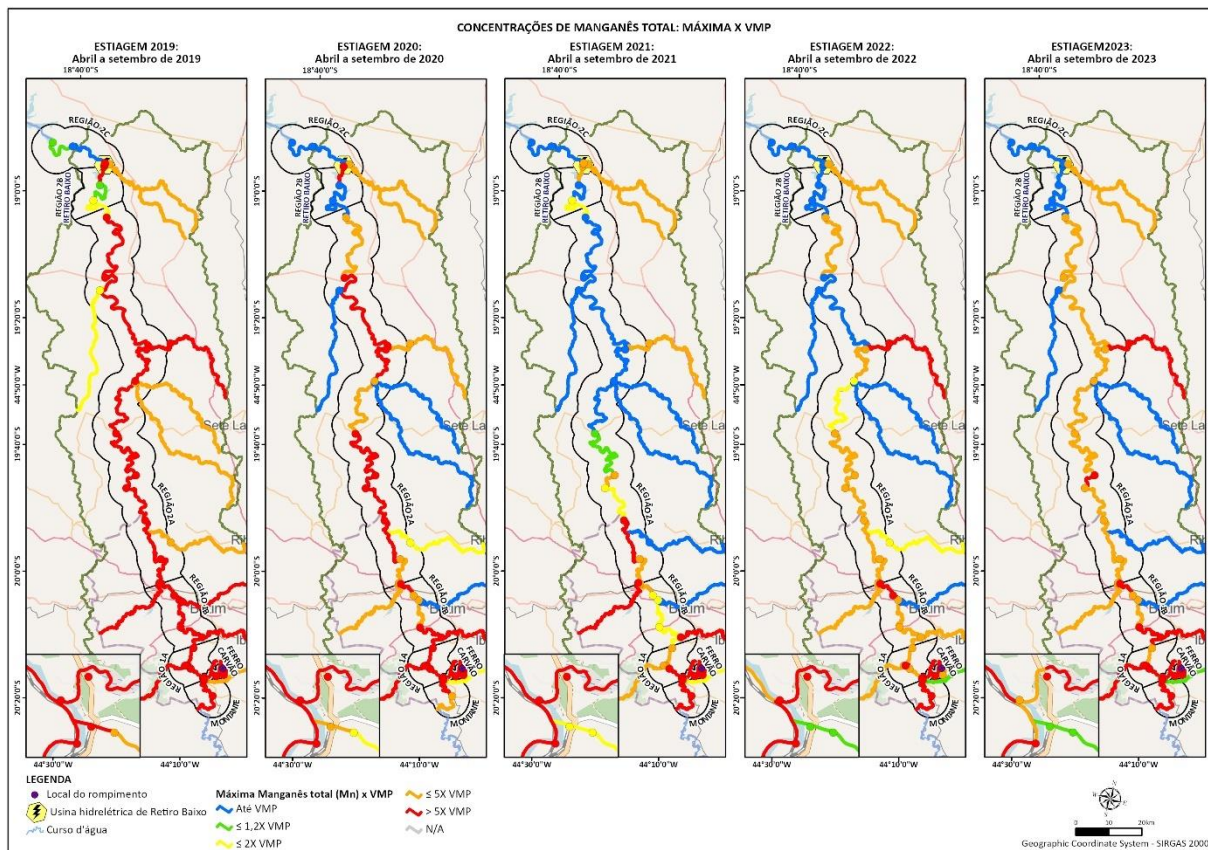
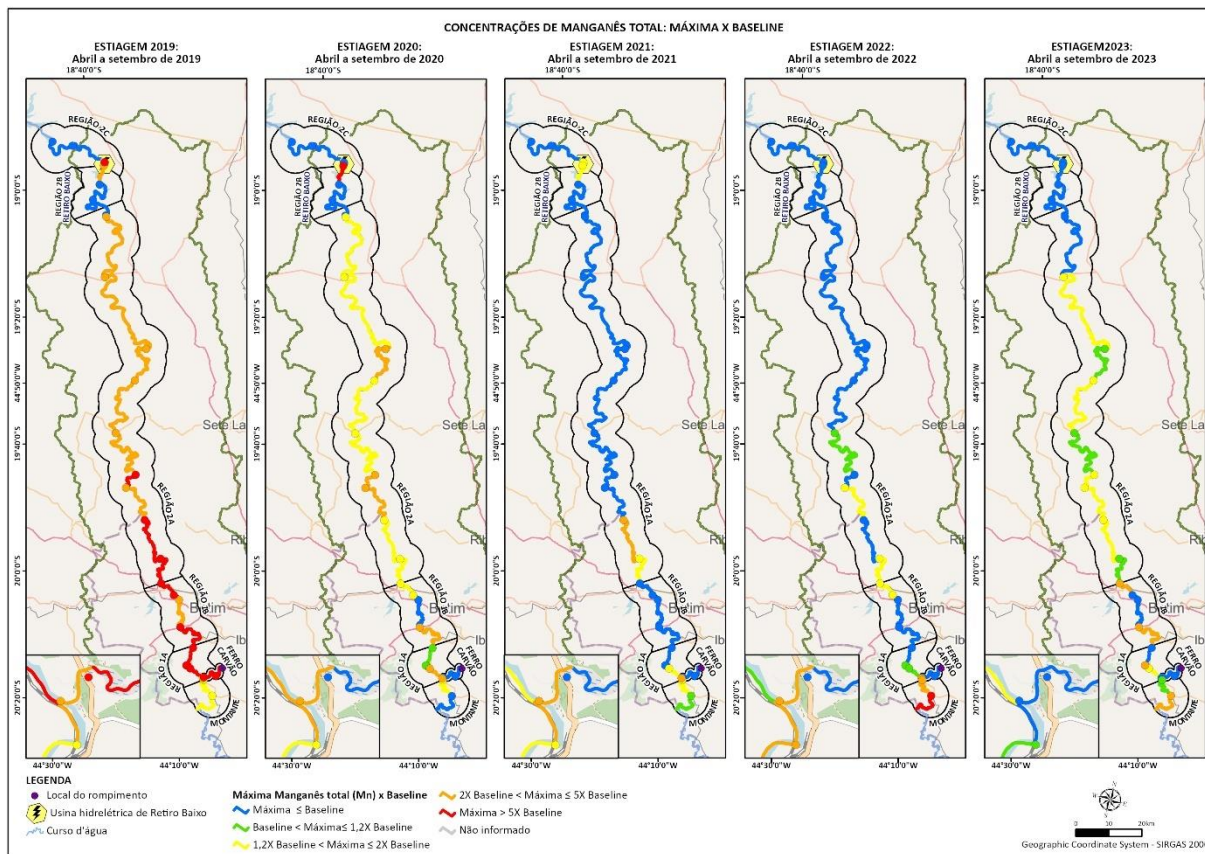


Figura 6.3-2 Mapa de comparação do máximo do *baseline* de Mn total



Para Manganês total (**Figura 6.3-1**), comparando-se o período de estiagem mais recente (2023) com os pretéritos, na Região 2C é verificada aproximação em relação ao VMP, com resultados superiores ou iguais a cinco vezes o valor preconizado em legislação, assim como no período anterior (2022).

Ao longo de toda calha do rio Paraopeba, há predomínio de resultados máximos cinco vezes superiores ou iguais ao VMP, levando em consideração o ciclo de estiagem de referência (estiagem/2023). No que tange aos tributários, especificamente para os localizados à margem direita na Região 2A, nota-se diminuição do afastamento ao VMP comparando-se com os períodos de estiagem pretéritos, com exceção do ribeirão do Cedro que apresentou afastamentos mais evidentes anteriormente.

De acordo com o mapa do máximo do *baseline*, em comparação com períodos anteriores, (**Figura 6.3-2**), é possível observar afastamento em relação ao *baseline*, principalmente na Região 2A, com valores 1,2 vezes superiores a 2 vezes inferiores ou iguais ao *baseline*.

▪ **Ferro dissolvido**

Figura 6.3-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP

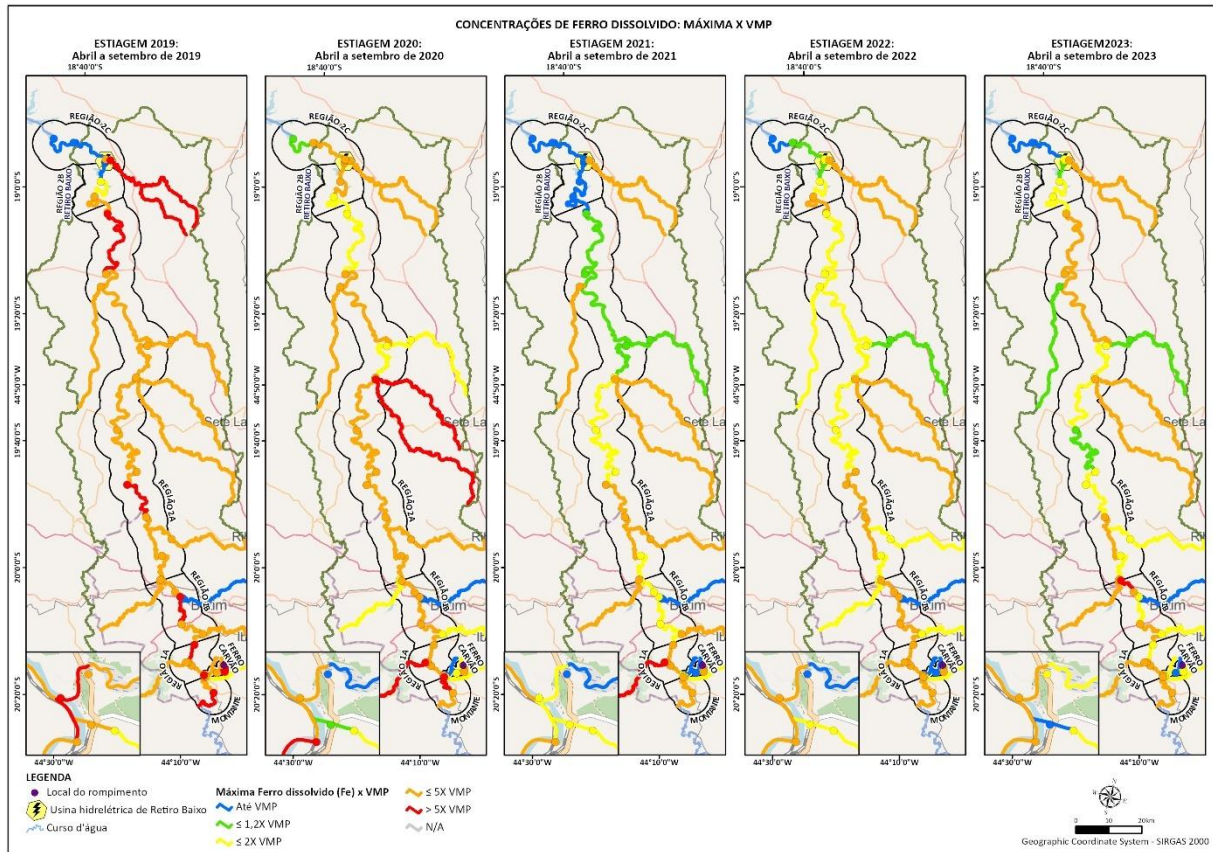
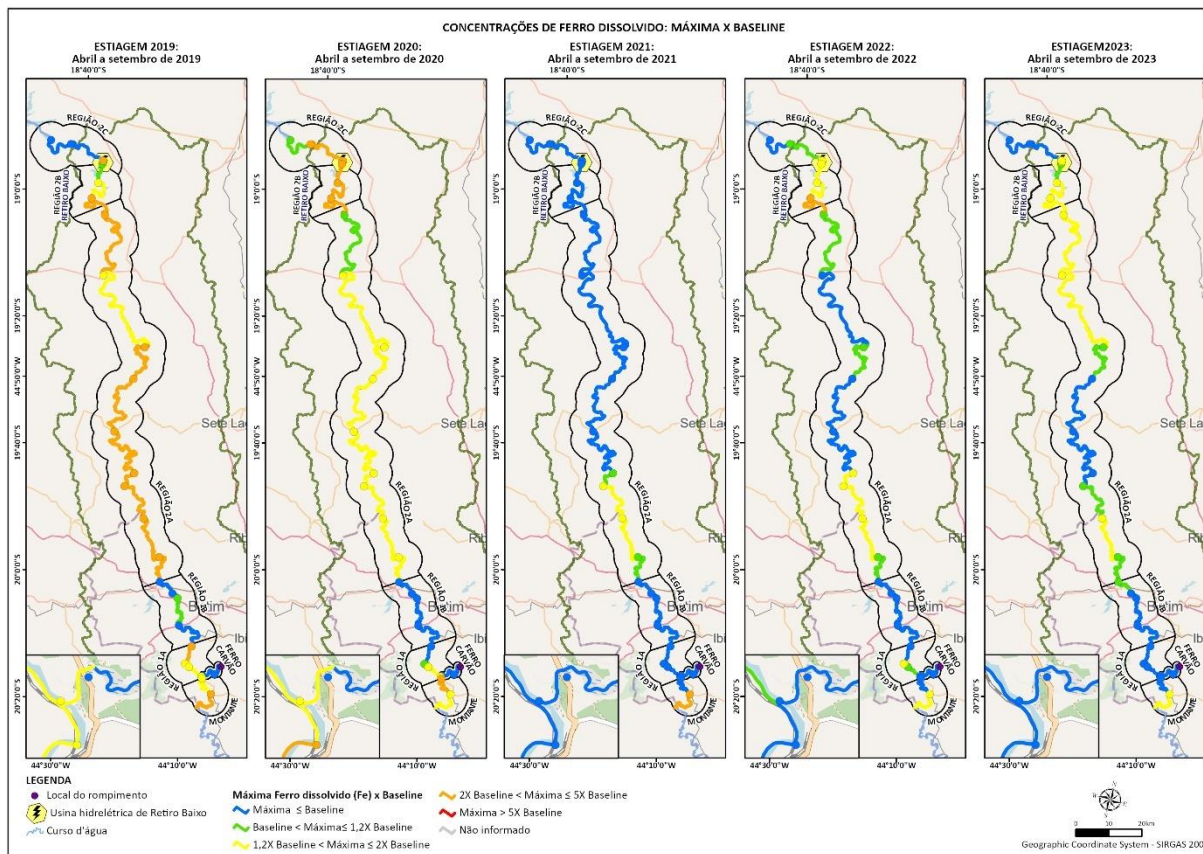


Figura 6.3-4 Mapa de comparação do máximo do *baseline* de Fe dissolvido



Para Ferro dissolvido (Figura 6.3-3), ao se analisar as concentrações máximas ao longo do monitoramento durante os períodos de estiagem, é verificada manutenção de valores em grande parte da calha principal entre a estiagem de 2021 e 2023, com valores predominantemente inferiores ou equivalentes a duas vezes o VMP. Em contrapartida, tal cenário não é verificado na estiagem/2023, no qual uma porção pequena do rio na Região 1A apresentou resultados cinco vezes maiores que o VMP.

Com foco nas regiões afetadas, percebe-se que há atenuação dos afastamentos no decorrer dos períodos de estiagem até 2023, no qual foi registrado resultado menor ou igual a 2x o VMP, enquanto no período sazonal anterior, nessa mesma porção, o registro foi inferior ou cinco vezes o VMP. Por fim, nas regiões mais a jusante (2B e 2C) são verificadas, assim como nas regiões afetadas, atenuação entre as faixas de classificação em relação ao VMP em relação a estiagem/2022.

De acordo com o mapa do máximo do *baseline*, em comparação com períodos anteriores, (Figura 6.3-4), é possível observar aproximação em relação ao *baseline*, principalmente na Região 2A, com a máxima sendo inferior ou igual ao *baseline* e ainda com máximas entre o valor de *baseline* e até 1,2 vezes menores ou iguais.

▪ **Alumínio dissolvido**

Figura 6.3-5 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP

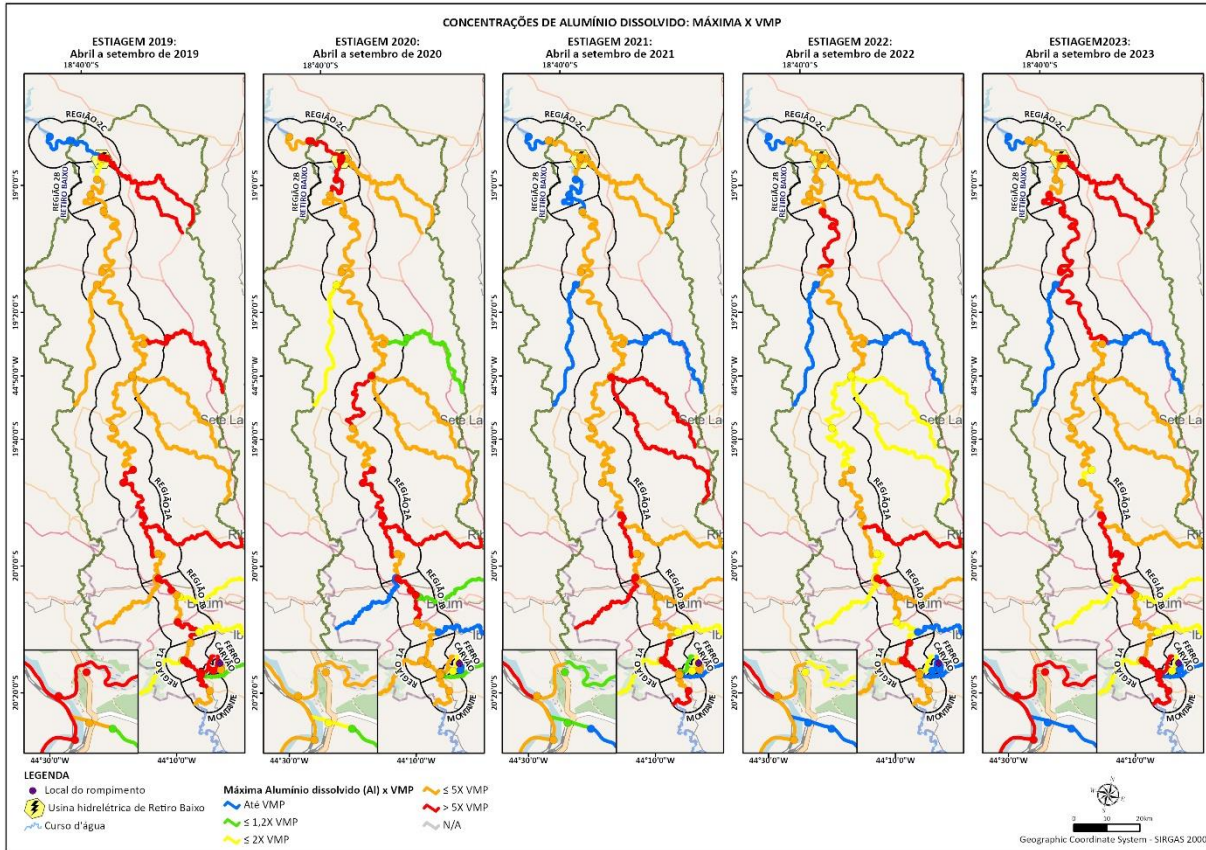
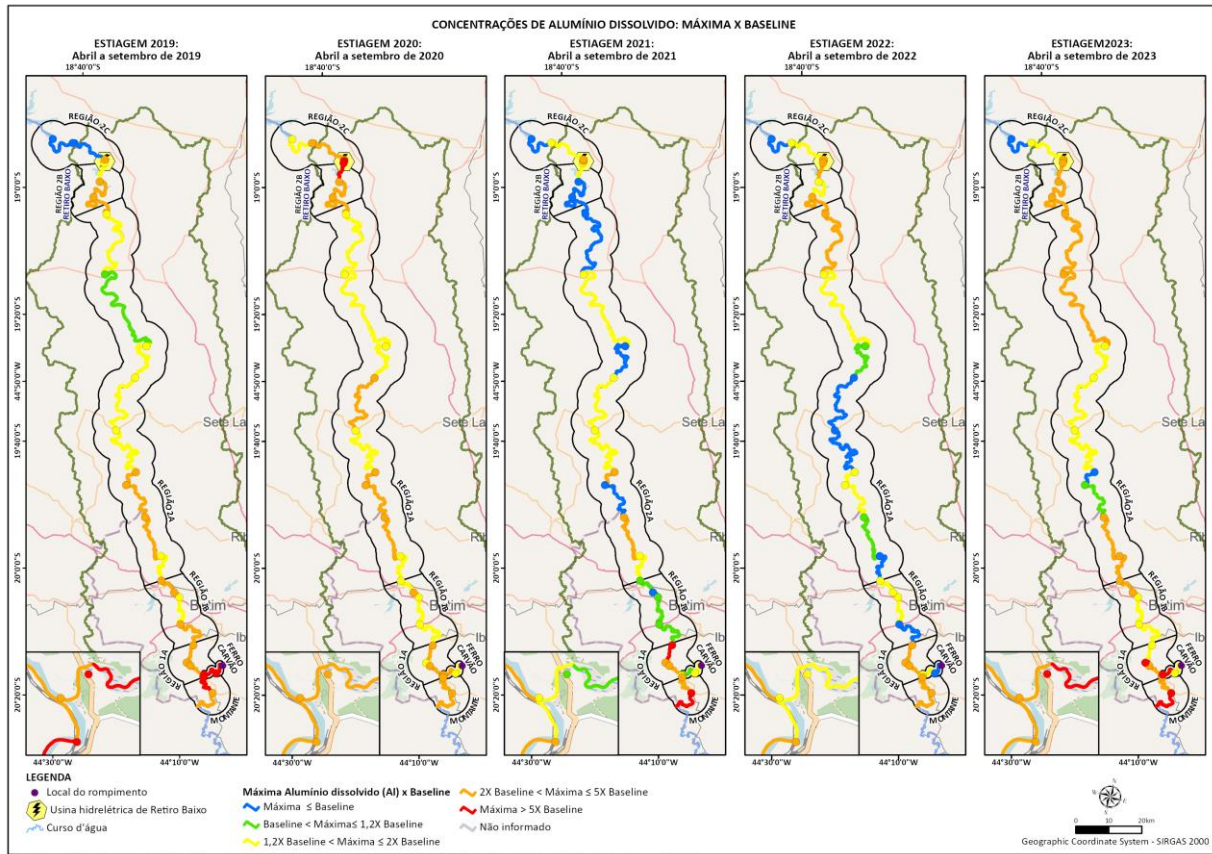


Figura 6.3-6 Mapa de comparação do máximo do *baseline* de Al dissolvido



Para o Alumínio dissolvido (**Figura 6.3-5**), observa-se, de maneira geral, que este parâmetro apresenta concentrações máximas de 1,2x a 2x o VMP ao longo de toda bacia e períodos analisados, incluindo os afluentes monitorados do rio Paraopeba, com afastamentos em relação ao VMP bem evidentes, excetuando-se o primeiro período monitorado (estiação/2022). De modo geral, no período de estiagem recente, as maiores violações para Alumínio dissolvido centralizam-se nas regiões de montante, Ferro-Carvão, 1A, 2A e 2B. Na Região 2A, alguns trechos apresentam afastamentos menores, mas ainda sim resultados superiores ao VMP.

Nas porções de montante da bacia, as violações observadas na refletem as atividades de mineração existentes e a constituição geológica regional no alto rio Paraopeba. De forma similar, a Região 2A configura uma área de condições geológicas regionais com riqueza natural de compostos contendo alumínio, haja vista, também, o panorama dos tributários da referida região. Sobre as regiões da porção de jusante da bacia, ressalta-se influência direta das defluências do reservatório da UHE Retiro Baixo e interferência da contribuição advinda da bacia do tributário ribeirão dos Gomes, representado pelo ponto CE-01, no qual as concentrações máximas foram até 5 vezes superiores ao VMP.

De acordo com o mapa (Figura 6.3-6), em comparação com períodos anteriores, é possível observar afastamento em relação ao *baseline*, principalmente nas regiões a montante, com a máxima sendo até 3 vezes superior ao *baseline*.

- Turbidez

Figura 6.3-7 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP.

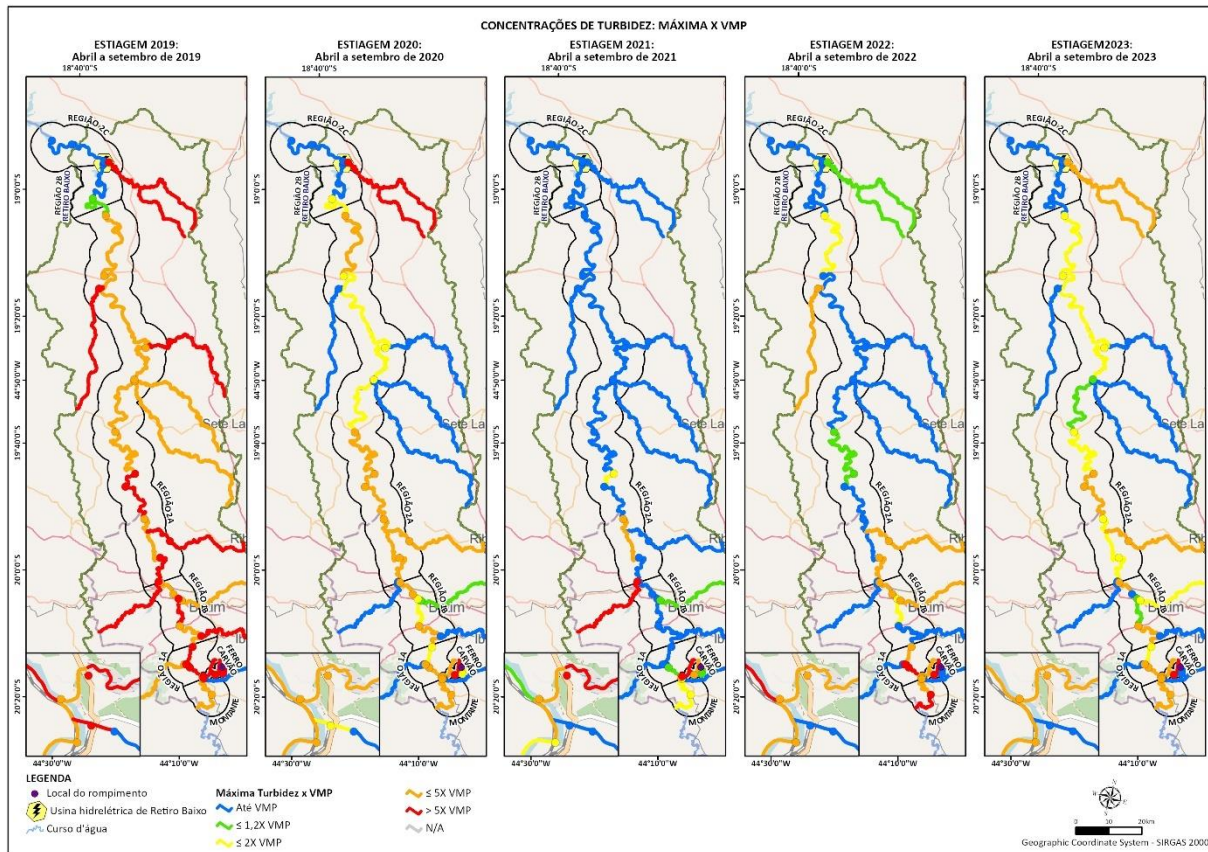
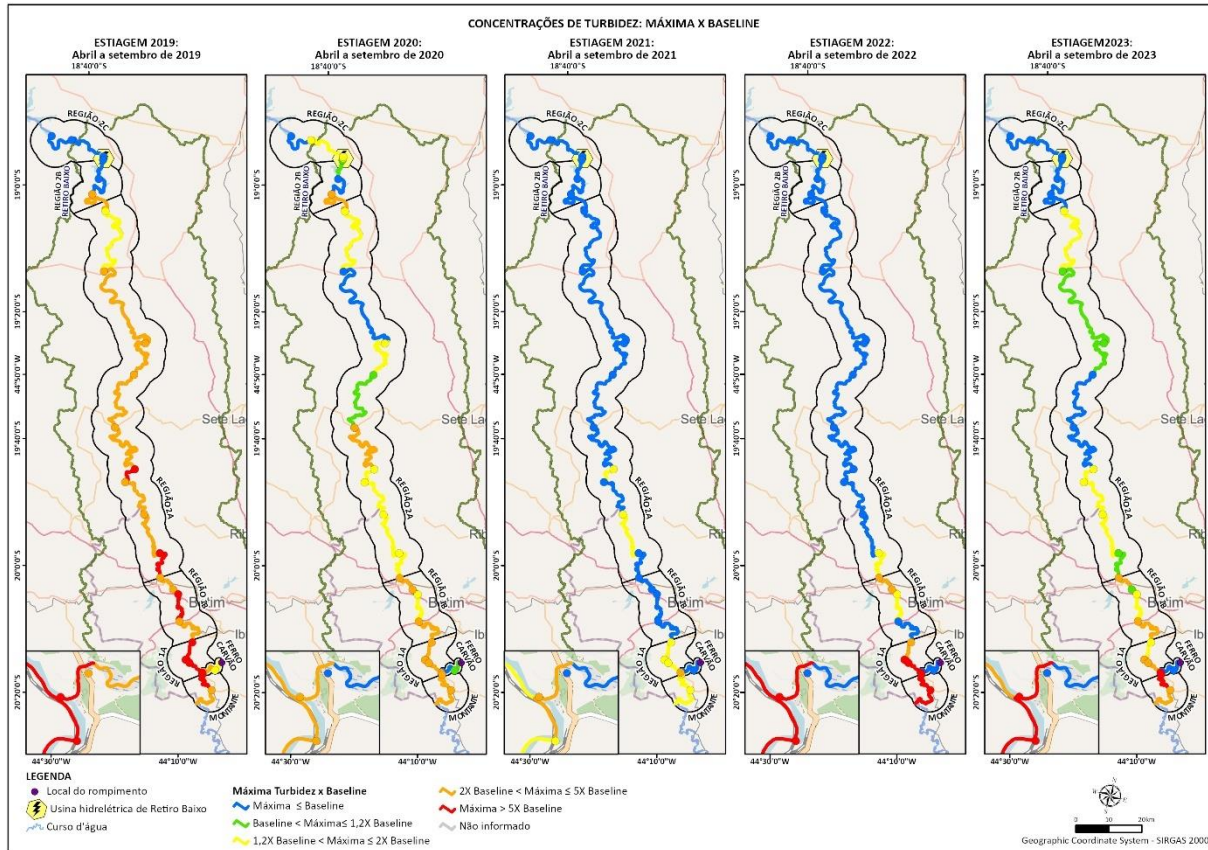


Figura 6.3-8 Mapa de comparação do máximo do *baseline* de Turbidez0,



Em relação aos valores analisados para Turbidez (Figura 6.3-7), nota-se no último período sazonal de estiagem, comportamento de redução das concentrações máximas em seus tributários, localizados na Região 1A (margem direita), 1B (margem esquerda), 2A e 2C, e aumento na Região 2B. Especificamente no último período analisado, de forma pontual nas regiões 2B e 2C, têm-se para este analito valores máximos de turbidez o VMP.

Em geral, ao longo de toda a bacia do Paraopeba, desde a estiagem/2019, pode ser observado maiores atenuações (teores máximos até duas vezes acima do limite legal), salvo poucas exceções como as regiões de montante, Ferro-Carvão e pontualmente nas regiões 1B e 2A, que podem esta relacionadas com as atividades de manutenção e reparação do Ferro-Carvão que podem alterar a qualidade da água neste trecho assim como promover alterações também nos trechos a jusante.

De acordo com o mapa (Figura 6.3-8), em comparação com períodos anteriores, é possível observar afastamento em relação ao *baseline*, em todas as regiões, mas principalmente nas regiões a montante, com a máxima entre 2 vezes o valor de *baseline* e até 5 vezes menores ou iguais ao *baseline*.

6.4. Considerações

No período de estiagem/2023, em geral, foram observados percentuais de violação menores ou iguais àqueles obtidos no período de estiagem/2022, o que pode estar relacionado a volumes pluviométricos também consideráveis na estiagem/2023. Nesse contexto, destaca-se um maior número de violações para os metais majoritários, com ênfase para o Ferro dissolvido e o Manganês total na região de Montante até a 2A. Além disso, o Alumínio e o Ferro, em suas frações dissolvidas, apresentam violações na Região 2C.

Ao longo das regiões de Montante até 2B foi quantificado *E. coli*/Coliformes e Fósforo total nas amostras coletadas. Especificamente na Região 1A, registrou-se, ainda que em baixo percentual, violação de parâmetros orgânicos como benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno (elementos quantificados em 4 de 26 amostras) e criseno (elemento quantificado em 4 de 26 amostras). A presença desses elementos é considerada pontual e infrequente, visto o conjunto amostral considerado e pode estar vinculada a presença de máquinas que operam em atividades diversas a montante da área de dragagem e ao longo do rio Paraopeba que podem, eventualmente, ser fontes de vazamentos de combustíveis ou óleos lubrificantes derivados do petróleo.

Dentre os parâmetros traço, apontam-se violações de Chumbo total ao longo da bacia hidrográfica (exceto na Região 1A), inclusive na região de Montante, área não afetada pelo rompimento. Na região de Ferro-Carvão têm-se, além do Chumbo total, Níquel total e, na Região 2A, também aparecem o Zinco total. Tal categoria de parâmetros não foi evidenciada nas regiões 1A e 2B. As violações desses elementos não ultrapassam 30% do conjunto amostral e, espacialmente, não há persistência desses elementos.

Na Região 2B, de característica lântica, e na Região 2C a jusante do reservatório de Retiro Baixo, os resultados apresentaram-se mais atenuados, assim como, os percentuais de violação mais reduzidos.

Quanto aos pontos de captação PT-02, PT-43 e PT-49, em uma comparação entre os períodos de estiagem/2022 e estiagem/2023, observou-se aumento das violações para os metais majoritários e Turbidez, exceto para o PT-02, em que se verificou redução das violações de Turbidez. Para os parâmetros traço e físico-químicos, observou-se similaridade das porcentagens de violação e dos parâmetros violados nos pontos PT-02 e PT-43, enquanto no PT-49 que na estiagem/2022 não apresentou violações, no período atual verificou-se violações para pH e Sólidos suspensos totais. Por fim, no que tange os demais parâmetros, percebeu-se redução para as violações de *E.coli* e aumento para Fósforo total.

Complementarmente, por meio dos mapas temáticos, é possível verificar o comportamento espacial das violações, nas suas diferentes magnitudes, em toda as regiões analisadas. Para os elementos majoritários, em geral, é verificada elevação da condição de violação ao longo dos períodos de estiagem, com reduções principalmente nos tributários.

Considerando a avaliação do período de estiagem/2022, apresentada detalhadamente no último Relatório de Fechamento de Ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b), notou-se indicação de violação de alguns elementos como traços, sanitários e orgânicos, mas de forma geral, com baixa magnitude se comparados aos demais elementos.

Ao longo da calha do rio Paraopeba, é possível verificar de forma representativa a condição de violações mais relevantes para os parâmetros majoritários, excetuando-se pelas regiões mais distais do rompimento, 2B e 2C, que apresentaram redução dos desvios no período de estiagem/2023.

7. Qualidade da água no reservatório de Retiro Baixo e no trecho de jusante na bacia do rio Paraopeba

7.1. Objetivo

A avaliação visa compreender a dinâmica da qualidade da água entre o reservatório da UHE Retiro Baixo e o remanso da UHE Três Marias, considerando aspectos da hidrodinâmica vertical do reservatório e da qualidade da água a jusante dele. A análise tem início em abril/2019, concentrando-se nos ciclos sazonais dos períodos de estiagem de 2019 a 2023.

7.2. Metodologia

A fim de compreender a qualidade da água superficial no reservatório da UHE Retiro Baixo e no trecho de jusante, ao longo dos períodos mencionados, foram elaborados os seguintes elementos para auxiliar as avaliações:

- Gráficos de interpolação do perfil limnológico do ponto RB-02 (inserido no PMQS-TM) para os parâmetros de interesse (Temperatura, OD, Mn total, Fe total e Al total);
- Gráfico de variação das operações de turbinamento e vertimento da UHE Retiro Baixo, utilizando dados fornecidos pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR);
- Gráfico de médias e medianas das vazões defluentes da usina, utilizando dados fornecidos pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR);
- Análise espacial e temporal dos parâmetros de qualidade das águas superficiais por meio de gráficos *boxplots*.

Os valores máximos permitidos pela legislação seguem o enquadramento estabelecido pela DN COPAM-CERH nº 08/2022. Nesse capítulo, além dos pontos PME (PT-21, PT-57, CE-01, CE-02, PT-22/TM-01), são analisados pontos do Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno (PMQS-TM):

- RB-02 (reservatório da UHE Retiro Baixo);
- JRB-01 (rio Paraopeba a jusante da confluência com ribeirão dos Gomes);
- JRB-02 (rio Paraopeba entre o JRB-01 e a entrada do reservatório da UHE Três Marias);
- TM-02 (reservatório da UHE Três Marias, ainda no remanso, a jusante do PT-22);
- TM-03 (reservatório da UHE Três Marias, ainda no remanso, a jusante do TM-02 e a montante da confluência com o rio São Francisco);

Cabe destacar que uma síntese das principais análises sobre a qualidade da água superficial na região de interesse é apresentada aqui, enquanto nos relatórios do PMQS-TM encontram-se análises mais específicas e detalhadas sobre o tema (ARCADIS, 2022a; 2023a).

7.3. Resultados e discussão

No contexto do rio Paraopeba, a presença do reservatório da UHE Retiro Baixo provoca alterações em seu padrão de fluxo, transitando de um regime hidráulico de escoamento lótico para um regime lântico. Essa mudança favorece os processos de decantação/sedimentação, diluição e outros processos de decaimento associados ao aumento do tempo de detenção hidráulica (TDH) e pelo acúmulo de substancial do volume de água. Além disso, as características morfométricas do reservatório favorecem a estratificação térmica, permitindo tanto a estratificação quanto a desestratificação, resultando na circulação vertical da massa de água.

A qualidade da água do reservatório é regularmente avaliada pelos pontos em sequenciais PT-20, PT-28 e PT-21, com amostragens em superfície. Complementarmente, há monitoramento em diferentes profundidades através dos pontos RB-01/PT-20 e RB-02, que fazem parte do PMQS-TM. Esses pontos estão situados em trechos distintos, sendo o RB-01/PT-20 localizado no início do remanso e o RB-02 na região central, mais próxima ao maciço da barragem.

7.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo

A dinâmica comportamental do reservatório de Retiro Baixo pode ser verificada pelos diagramas mostrados a seguir (**Gráfico 7.3.1-1** a **Gráfico 7.3.1-5**), especificamente para o ponto de monitoramento RB-02. Este ponto foi considerado para a análise por ser representativo e localizado em trecho de escoamento mais lântico e, assim, mais sujeito aos fenômenos de circulação e estratificação térmica e, especificamente, nos períodos chuvosos à circulação forçada causada pela abertura e fechamento das comportas da UHE Retiro Baixo. Os referidos gráficos representam diagramas da variação dos teores ao longo da profundidade e do tempo com destaque para interpolação dos resultados entre camadas superficiais, intermediárias e de fundo do reservatório.

Gráfico 7.3.1-1 Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

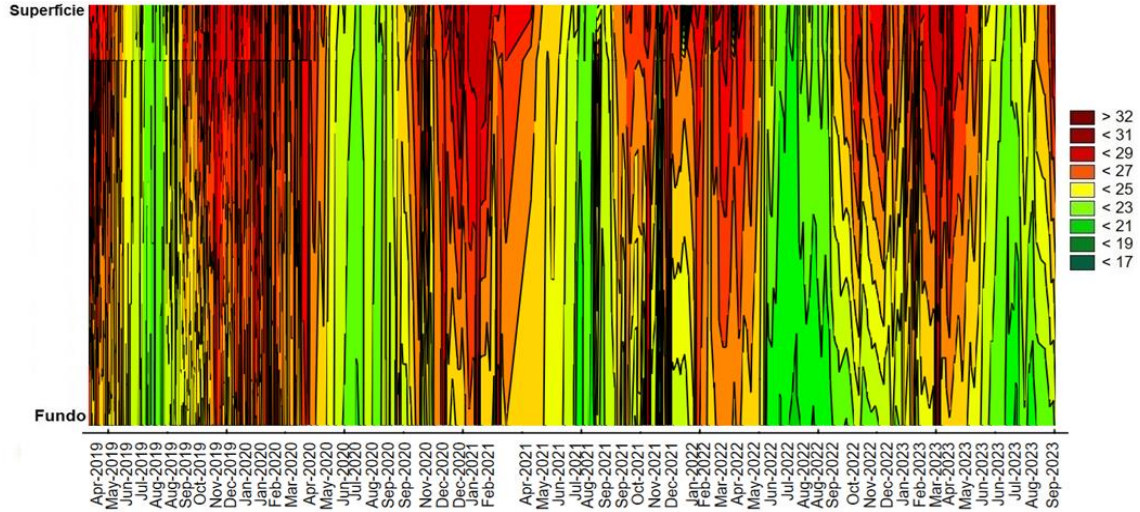


Gráfico 7.3.1-2 Diagrama da variação de Oxigênio dissolvido (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

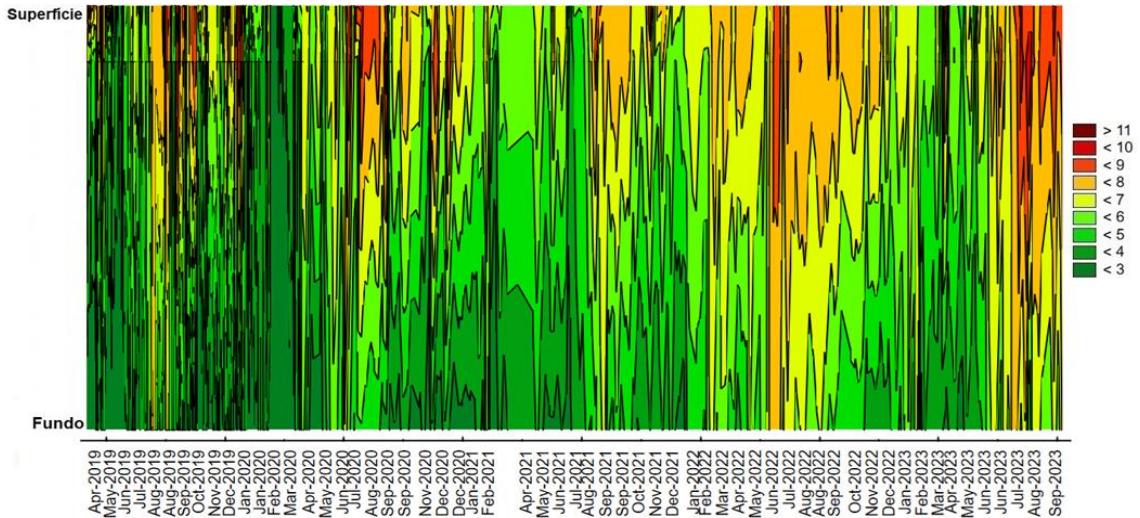


Gráfico 7.3.1-3 Diagrama da variação de Manganês total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

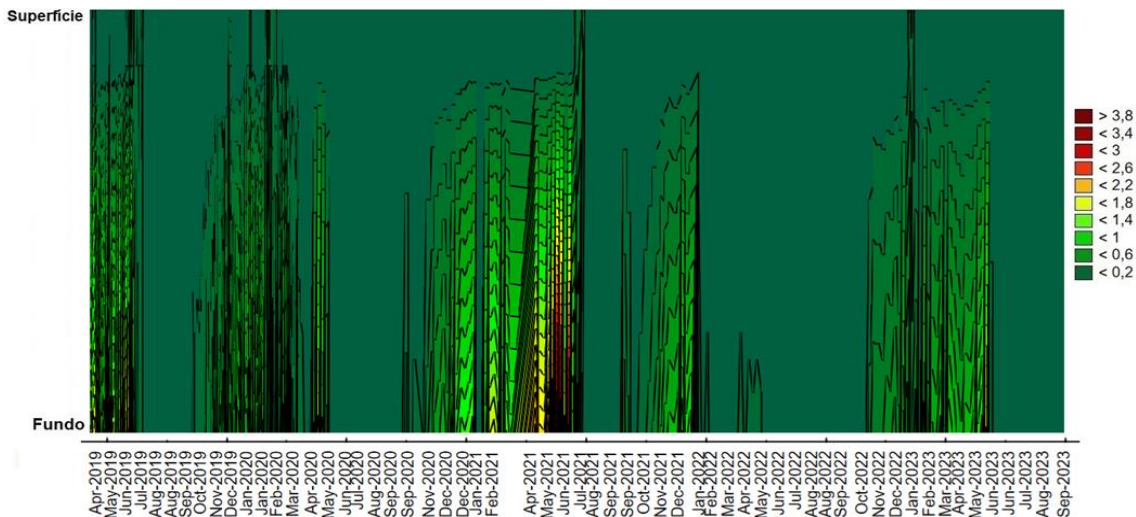


Gráfico 7.3.1-4 Diagrama da variação de Ferro total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

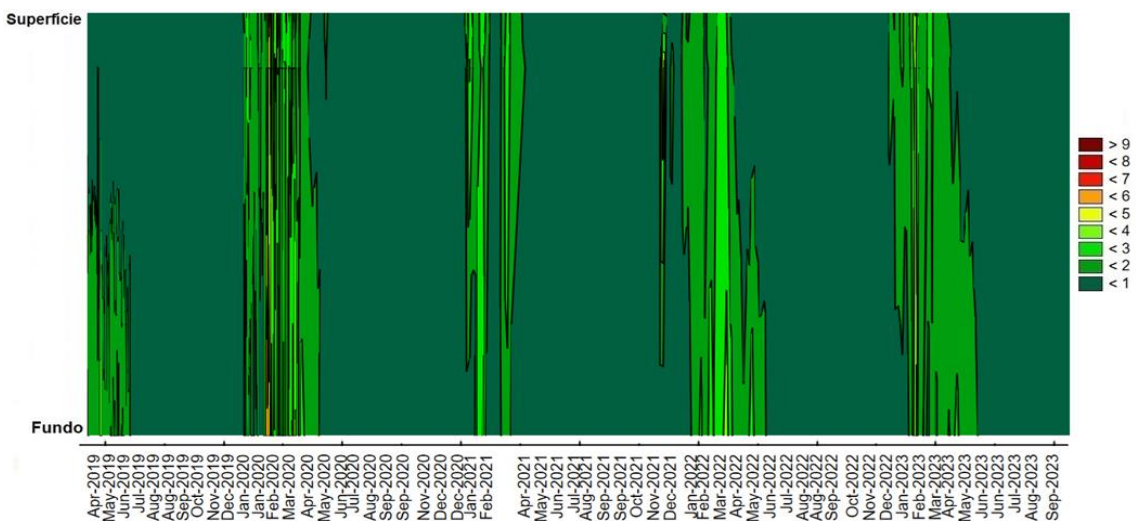
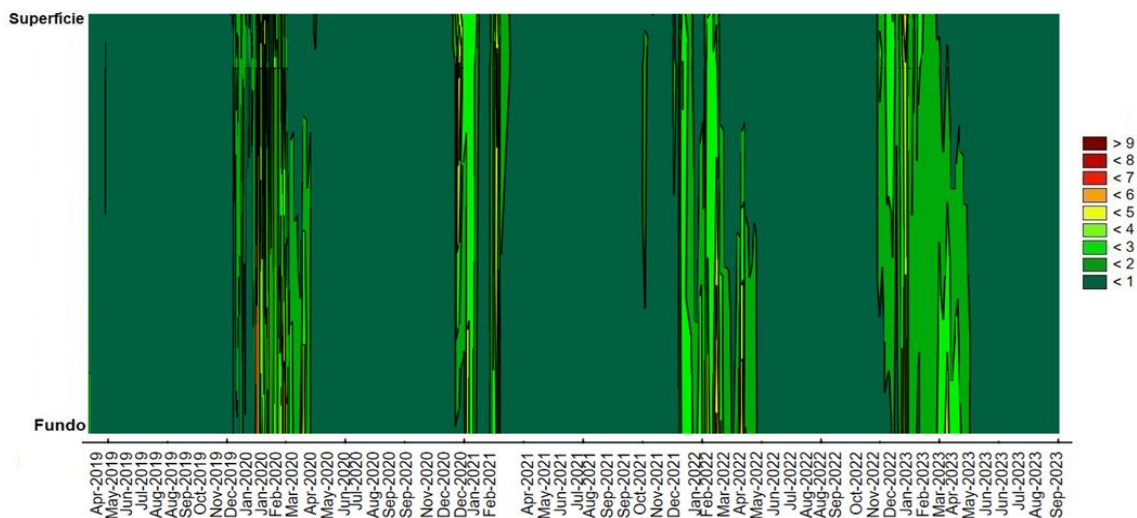


Gráfico 7.3.1-5 Diagrama da variação de Alumínio total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02



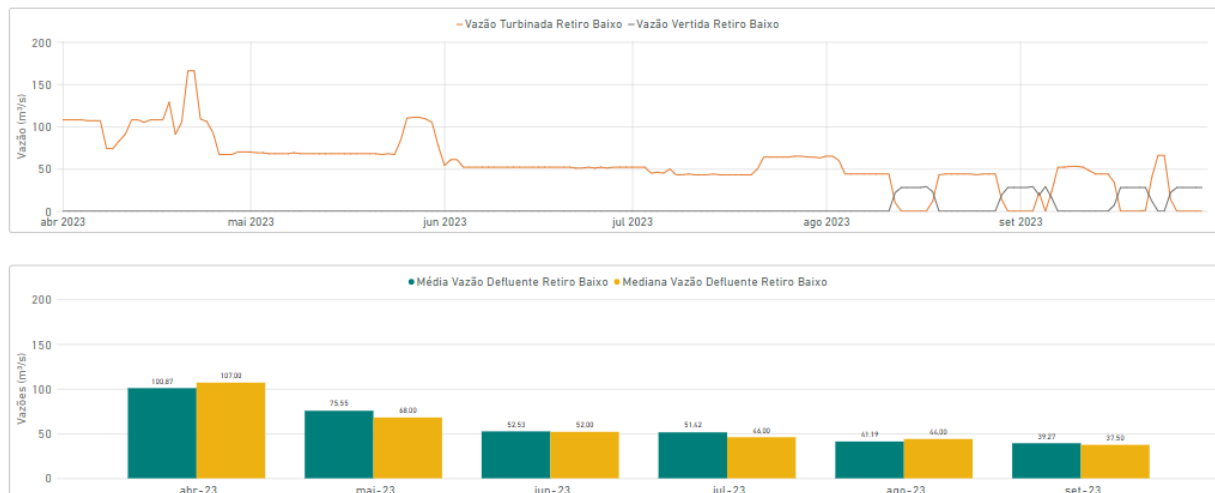
Durante o período de estiagem/2023, foi observada uma demarcação menos acentuada entre as temperaturas, indicando possível comportamento de desestratificação térmica, principalmente nos meses de junho e julho/2023. Nesse intervalo, não foi evidente a distinção entre as camadas térmicas, sugerindo um processo de mistura vertical da água. Enquanto nos meses de maio e setembro/2023, a diferenciação entre as camadas térmicas foi mais notória.

É importante destacar a relação conhecida entre o oxigênio dissolvido (OD) e a temperatura na água, onde a solubilidade do oxigênio aumenta à medida que a temperatura diminui. Nesse sentido, durante a estiagem/2023, observou-se uma queda nas temperaturas, o que pode influenciar no aumento da solubilidade de oxigênio. Além disso, assim como para a temperatura, percebem-se indícios de homogeneidade nos teores de Oxigênio dissolvido (OD) no perfil de profundidade, especialmente em junho/2023, sugerindo uma distribuição mais uniforme ao longo da coluna d'água.

O aumento das concentrações de Oxigênio dissolvido exerce influência nas concentrações de metais, uma vez que favorece os processos de oxidação-redução, contribuindo para a redução da disponibilidade de metais dissolvidos. Assim sendo, em relação ao comportamento dos metais durante a estiagem/2023, observam-se concentrações baixas, tanto para Alumínio quanto para Ferro e Manganês em suas frações totais.

No que diz respeito às operações da UHE Retiro Baixo, o **Gráfico 7.3.1-6**, ilustra a variação temporal das vazões vertidas e turbinadas ao longo do período de estiagem/2023. Além disso, são destacadas as médias e medianas das vazões defluentes correspondentes a este período.

Gráfico 7.3.1-6 Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de estiagem/2023



Fonte: ANA, 2023a.

No que diz respeito às regras de operações do período de estiagem/2023, pode ser verificado que a operação de turbinamento apresentou oscilações durante todos os meses, sendo as maiores vazões registradas no mês de abril. A respeito do vertimento, nota-se que as maiores vazões foram indicadas durante os meses de agosto e setembro, possivelmente relacionadas a episódios de manutenção das operações de turbinamento, uma vez que estas foram paralisadas.

A respeito das variações médias e medianas relacionadas aos vertimentos ao longo do tempo, podem ser considerados as seguintes condições:

- **Abril/2023:** A mediana é um pouco maior que a média, o que sugere que as vazões foram em geral consistentes, mas houve alguns momentos em que a vazão foi relativamente baixa, o que reduziu a média. Isso pode indicar que, embora o período seja de estiagem, as condições de chuvas antecedentes ainda permitiam manter uma liberação de água mais regular na maior parte do tempo, com ocasionais reduções para possivelmente conservar água para os meses subsequentes.
- **Maio a Julho/2023:** Houve redução mais expressiva dos resultados médios e medianos e maior proximidade entre essas métricas. Isto sugere que a liberação de água da barragem foi consistente, com menos variações extremas, indicando uma operação mais estável das águas da barragem, talvez como resultado de uma estratégia de conservação de água antecipando os meses mais secos vindouros.
- **Agosto e Setembro/23:** Nesses meses, as vazões continuaram decaindo, o que corrobora o avanço da estiagem e um menor índice de precipitações. Em agosto, a média é um pouco menor que a mediana, mas em setembro, a média é ligeiramente maior que a mediana. Essa inversão pode indicar uma alteração nas condições

hidroclimatológicas ou na operação. Pode haver uma tendência de conservar água em agosto, que é ajustada em setembro, possivelmente devido a uma mudança nas expectativas de chuva ou na necessidade de manutenção de vazão residual a jusante.

As análises completas, incluindo a avaliação comparativa dos períodos de estiagem anteriores, podem ser consultadas no item 4 deste relatório.

7.3.2. Comportamento da qualidade da água a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo nos diferentes períodos sazonais

Em caráter complementar, os resultados do monitoramento da Vale em termos de qualidade hídrica no reservatório da UHE Retiro Baixo e do trecho de jusante do rio Paraopeba foram agregados e avaliados para os diferentes períodos de estiagem desde o rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A. Levou-se em conta o comportamento dos principais parâmetros considerados como marcadores e que apresentam limite legal: Manganês total, Alumínio dissolvido e Ferro dissolvido, além dos parâmetros Fósforo total e Turbidez.

Para tal, alguns pontos representativos do monitoramento do trecho fluvial foram selecionados a montante (PT-21) e a jusante do barramento do reservatório (PT-57, CE-02, JRB-01, JRB-02, PT-22). É dado destaque, também, ao ponto CE-01 que representa o principal tributário do rio Paraopeba (ribeirão dos Gomes/das Almas) monitorado nesse trecho e que pode influenciar a qualidade da água do rio Paraopeba, devido a características fisiográficas específicas de sua bacia. Em sua porção leste e nas áreas próximas ao seu baixo curso e ao exutório, é observado grau de vulnerabilidade mais elevado e, assim, áreas mais sujeitas a contribuir com material carregado pelo escoamento superficial advindo de chuvas.

Além desses pontos anteriormente citados, foram incluídos os pontos TM-02 e TM-03, localizados no reservatório da UHE Três Marias entre o TM-01/PT-22 e a confluência com o rio São Francisco.

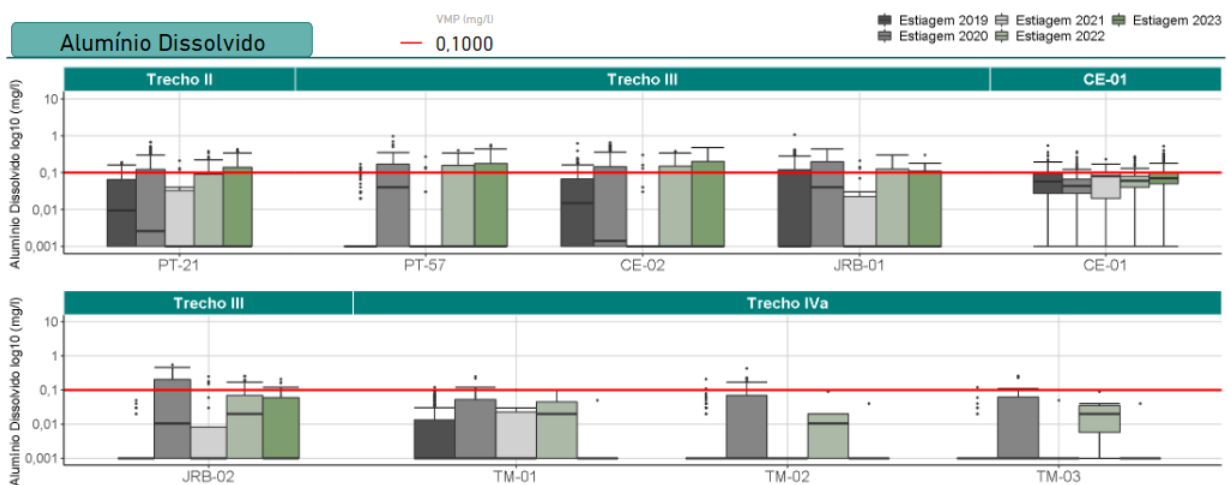
Destaca-se, como já definido em premissa no presente documento, que as análises feitas consideram os limites legais conforme as classes de enquadramento definidas pela DN COPAM-CERH nº 08/2022, sendo, especificamente, o ponto CE-01 enquadrado como Classe 1, e os demais pontos, como Classe 2. Os resultados agregados para os diferentes períodos de estiagem nos citados pontos estão apresentados em gráficos do tipo *boxplot*, que evidenciam a distribuição dos resultados (máximos, mínimos, medianas, percentis 25% e 75% e *outliers*). Ressalta-se que, em Arcadis (2023a), são apresentadas as análises temporal e espacial completas para todos os pontos do reservatório de Três Marias, além dos parâmetros que não possuem VMP.

Alumínio dissolvido

No **Gráfico 7.3.2-1**, podem ser visualizados os resultados de Alumínio dissolvido nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem. Em uma análise temporal, observa-se semelhança de comportamento entre os pontos do reservatório de Três Marias e os pontos localizados a montante deste. No atual período de análise (estiagem/2023), verifica-se que os resultados dos pontos do Trecho IVa foram iguais ou menores que o limite de quantificação e por este motivo não foram quantificados. Verifica-se, também, que as maiores concentrações tiveram ocorrência nos trechos II e III, principalmente nos pontos PT-57 e CE-01, considerando todos os períodos de estiagem.

De modo geral, o período em que foram verificadas as concentrações mais dispersas entre si foi a estiagem/2020 e, a partir desse, houve predominantemente comportamento de redução da dispersão e aumento das concentrações medianas até a estiagem/2022, ano em que ocorreram índices pluviométricos notavelmente elevados, seguida de aparente redução, exceto para os pontos PT-21, PT-57 e CE-02.

Gráfico 7.3.2-1 Boxplots dos resultados de Al dissolvido dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar



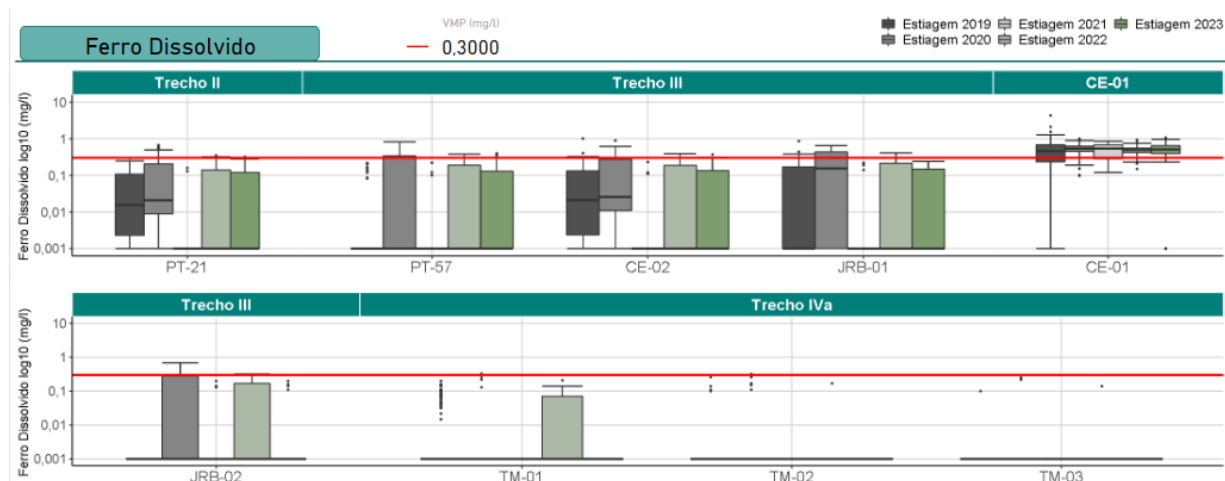
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

Ferro Dissolvido

O **Gráfico 7.3.2-2** apresenta os resultados para o Ferro dissolvido nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem. Em um recorte temporal, percebe-se que os maiores valores foram observados durante a estiagem/2020, considerando todos os pontos apresentados no referido gráfico. Além disso, as maiores concentrações são observadas no ribeirão dos Gomes (CE-01), e que mantém menor variabilidade de teores ao longo do tempo, com resultados muito próximos entre os períodos sazonais. Este ponto ainda apresenta

resultados historicamente mais elevados do que os pontos localizados no rio Paraopeba, Trecho III, comportamento também observado para o período de estiagem/2023.

Gráfico 7.3.2-2 *Boxplot* dos resultados de Fe dissolvido dos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar



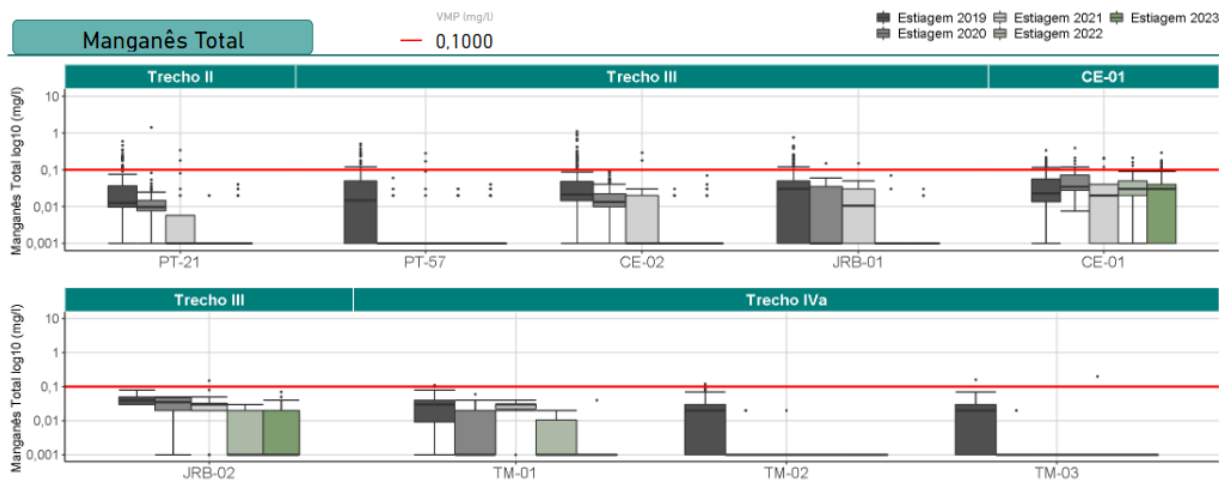
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IIIa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

▪ Manganês Total

O **Gráfico 7.3.2-3** apresenta os resultados para o Manganês total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem. Em relação à evolução temporal do parâmetro, observa-se redução da concentração ao longo do tempo, em relação aos valores medianos em todos os pontos. Nos pontos localizados nos reservatórios de Três Marias e em Retiro Baixo, tal comportamento não é claramente evidenciado, devido as concentrações estarem menores ou iguais ao LQ, o que impede sua quantificação nos *boxplots*.

No período de estiagem/2023, as concentrações medianas mais elevadas são observadas no ponto CE-01 e, com exceção do ponto supracitado juntamente com os pontos do Trecho III, percebe-se predominância do comportamento de concentrações abaixo do LQ. Por fim, os resultados mostram uma aparente atenuação temporal e espacial desse analito, conforme evidenciado e mais detalhado no relatório do Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno protocolado em setembro/2023 (ARCADIS, 2023).

Gráfico 7.3.2-3 *Boxplot* dos resultados de Mn total dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar



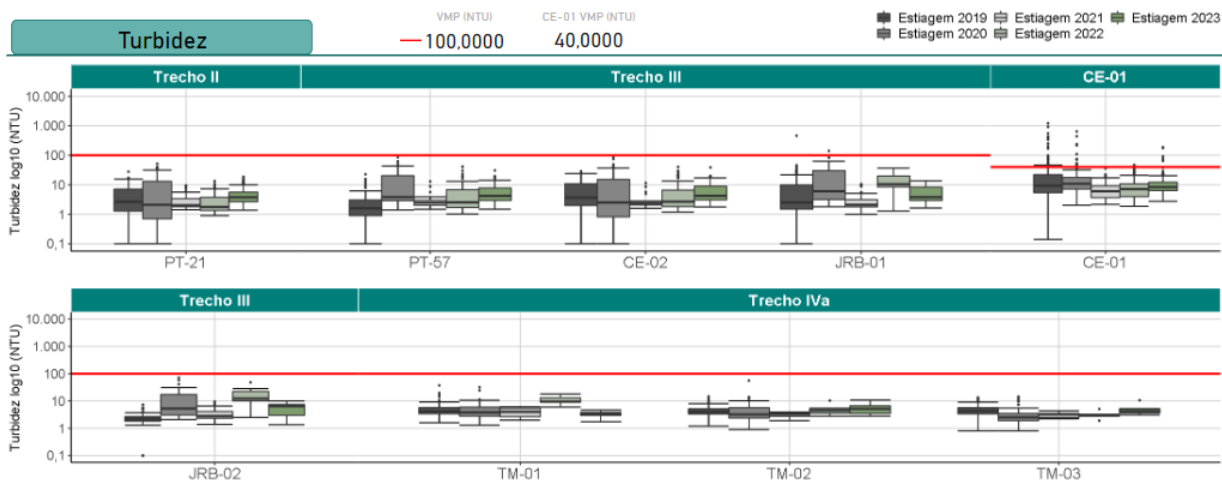
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

▪ Turbidez

No **Gráfico 7.3.2-4**, podem ser observados os resultados para Turbidez nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem analisados. Em uma análise temporal, percebe-se que a maior parte dos pontos apresentam elevação da variabilidade de resultados entre as estiagens de 2019 e 2020 e, posteriormente, diminuição da dispersão desses resultados na estiagem/2021, elevação dos resultados em 2022 e, no período de estiagem atual (2023), redução nos teores de Turbidez. Todos os resultados dos pontos localizados em todos os trechos se mantiveram abaixo do VMP, inferiores ao limite definido em legislação, exceto no ponto CE-01.

Ainda, assim como as concentrações observadas para os metais majoritários, os maiores teores de Turbidez tiveram ocorrência no ponto CE-01. Por fim, percebe-se que os pontos do Trecho IVa, principalmente pelo fato de estarem localizados em um trecho lântico, apresentaram os menores teores e a menor variabilidade, levando em consideração todos os períodos de estiagem.

Gráfico 7.3.2-4 *Boxplot* dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar



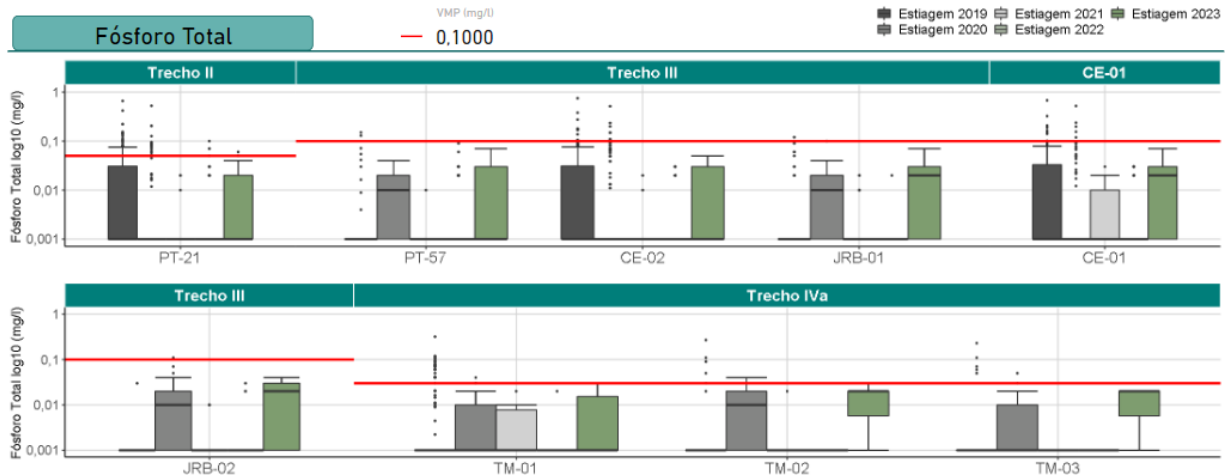
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

▪ **Fósforo total**

No **Gráfico 7.3.2-5**, podem ser observados os resultados de Fósforo total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem analisados. Percebe-se que, para o período de referência (estiagem/2023), ocorreram violações apenas no Trecho IVa. Contudo, o comportamento geral é de elevação da variabilidade de resultados bem como das concentrações máximas.

De modo geral, o Fósforo total se apresenta com baixas variações durante os períodos sazonais de estiagem, sendo as maiores dispersões observadas nos trechos III e ponto CE-01 no período atual de estiagem. Nas estiagens de 2020, 2021 e 2022, para quase todos os pontos, os resultados foram predominantemente iguais ou inferiores ao limite de quantificação (LQ = 0,001 mg/L para o laboratório Bioagri, 0,01 mg/L até março/2021 e 0,002 mg/L após março/2021 para o laboratório SGS) em consequentemente, abaixo do VMP (0,1 mg/L) em todos os períodos chuvosos desde o início do monitoramento, com exceção de alguns *outliers*.

Gráfico 7.3.2-5 *Boxplot* dos resultados de Fósforo total dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unificar.



Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

7.4. Considerações

Com base nos dados apresentados nos diagramas e análises do ponto de monitoramento RB-02 no reservatório de Retiro Baixo durante o período de estiagem/2023, destaca-se que em meses específicos, como junho e julho, ocorreu uma notável desestratificação térmica, indicando processos de mistura vertical. Esta observação é condizente com a relação esperada entre a temperatura e o oxigênio dissolvido (OD), onde a queda nas temperaturas favoreceu o aumento da solubilidade de oxigênio, resultando em concentrações mais homogêneas ao longo da coluna d'água, principalmente em junho/2023. No que diz respeito a concentração de metais nesse ponto, nas zonas superficiais, observa-se concentrações baixas de Alumínio, Ferro e Manganês, em suas frações.

Ao analisar a operação da UHE Retiro Baixo durante o mesmo período, foram identificadas oscilações expressivas nas vazões de turbinamento e vertimento, com reduções progressivas das vazões defluentes ao longo do período de estiagem.

Quanto aos resultados do monitoramento da qualidade hídrica na região do reservatório da UHE Retiro Baixo, observou-se que as maiores concentrações são encontradas no ribeirão dos Gomes (CE-01), com menor variabilidade ao longo do tempo e resultados próximos entre os períodos sazonais. Esse ponto também mostrou concentrações historicamente mais elevadas do que os pontos localizados no Trecho III do rio Paraopeba. Nos demais pontos e trechos, ao longo de diferentes períodos de estiagem, foi observado que as concentrações dos metais foram maiores nos trechos II e III.

Em relação à Turbidez, observou-se menores variações entre os períodos. Na maioria dos pontos, foi identificada uma maior variabilidade e resultados mais altos nas estiagens de 2019

e 2020, seguidos por uma diminuição na estiagem/2021 e aumento em 2022. No período de estiagem/2023, as medidas de Turbidez foram reduzidas e a variabilidade foi pequena, permanecendo abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) estabelecido pela legislação, exceto no ponto CE-01.

No tocante ao Fósforo total, o comportamento geral na estiagem/2023 foi de elevação da variabilidade de resultados bem como das concentrações máximas.

8. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos

8.1. Objetivo

A qualidade da água do rio Paraopeba é monitorada pela Vale por meio das coletas realizadas em pontos de monitoramento convencionais e, de forma complementar, por meio de estações telemétricas, com a geração de um conjunto substancial de informações. Tendo em vista que os resultados analíticos para os metais marcadores obtidos a partir das campanhas convencionais de monitoramento são disponibilizados pelo laboratório entre 3 e 5 dias, entende-se que a obtenção de uma correlação (estatística) entre dados telemétricos e resultados de parâmetros convencionais poderia permitir a estimativa de comportamentos e alterações específicas na qualidade da água em um menor intervalo de tempo.

Nesse contexto, o presente item visa avaliar o comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba, por meio da relação linear estabelecida entre os dados de Turbidez reportados nas telemétricas e os resultados das concentrações dos metais majoritários monitorados nos pontos convencionais da Vale próximos às estações.

8.2. Metodologia

Na região da área de estudo, foram instaladas quatorze estações telemétricas, a saber: AUT-MD, AUT-EP, AUT-JD, AUT-CB (PT-02), AUT-BETIM, AUT-MTI (PT-14), AUT-MG 050, AUT-CPM Ativa, AUT-CP (PT-49), AUT-MRB-01 (PT-19), AUT-JRB-01, UMF_TM-02, UMF_TM-05 e UMF_TM-08. Cabe ressaltar que essas três últimas são estações flutuantes, equipadas com duas sondas cada. Para efeitos deste estudo, considera-se a utilização das sondas rasas. Os dados de telemetria são reportados com frequência horária, exceto pela AUT-EP, que fornece resultados a cada dez minutos durante o período de vertimento no reservatório da Estaca Prancha. Essa frequência de comunicação dos resultados permite uma análise mais ágil e precisa, favorecendo respostas ambientais mais assertivas.

Desse modo, por meio dos referidos dispositivos, é possível a realização de monitoramento contínuo dos parâmetros físico-químicos Turbidez, pH, Oxigênio dissolvido, Temperatura, Potencial de Oxi-Redução e Condutividade Elétrica utilizados para tomadas de decisões nos diversos planos de monitoramento implementados pós rompimento da Barragem BI. Além do monitoramento de clorofila nas estações UMF-TM-02, UMF-TM-05 e UMF-TM-08. Especificamente para as análises do presente relatório, o parâmetro Turbidez foi utilizado para as avaliações da qualidade da água ao longo do rio Paraopeba, uma vez que ele pode, guardadas as devidas peculiaridades, indicar alterações importantes.

Já no servidor da CLEAN, os dados passam por uma pré-análise automática pela empresa que classifica dados inconsistentes como inválidos. Destaca-se que apenas os dados que

extrapolam as faixas mínimas e máximas, de acordo com cada parâmetro, conforme a **Tabela 8.2-1** são considerados inconsistentes. Essas faixas estão relacionadas à limitação de registro do dispositivo.

Tabela 8.2-1 Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos

Parâmetro	Mínima	Máxima
Alimentação (v)	0	20
Profundidade (m)	0	200
Temperatura (°C)	-100	100
Condutividade (uS/cm)	0	6500
pH	0	20
ORP (mV)	-600	600
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0	300
Turbidez (NTU)	0	6500
Nível (m)	0	200
Temperatura do Ar (°C)	-100	100
Umidade do Ar (%)	0	300
Pluviosidade (mm)	0	655
Pluviosidade Diária (mm)	0	500000

Fonte: *Clean Environment* Brasil (2023).

Após a classificação de invalidez dos dados inconsistentes, a Arcadis acessa o banco de dados da CLEAN utilizando um protocolo de conexão do tipo SOAP (*simple object access protocol*), que requer o fornecimento de credenciais de autenticação, além de informações quanto ao período de interesse e da identificação do cliente. Assim, tais dados são importados via *script* em linguagem Python, ou via fluxo no Microsoft Power Automate, para os aplicativos de criação de painéis e produtos de análises de dados, como Power Query e Power BI Services, sem que haja um passo intermediário de edição ou alteração dos dados disponibilizados pela CLEAN. Ressalta-se que são importados apenas os dados validados.

Ademais, como complementação, a equipe da Arcadis analisa visualmente a coerência dos dados importados, verificando se alguma possível falha (queda brusca ou expressivo aumento no comportamento) pontual e momentânea está conforme os registros históricos da telemétrica, bem como com os resultados dos pontos convencionais mais próximos, além das estações a montante e a jusante, para efeitos de comparação do histórico recente. Assim, apura-se se esses dados podem estar relacionados aos registros de precipitações, vazões, interferências externas nas sondas (galhos e resíduos presos na sonda) e ou manutenção dos equipamentos naquele período. Após essas avaliações, é solicitado à Clean informações a respeito das manutenções e calibrações dos equipamentos, limpeza das estações e/ou outros fatores interferentes.

Em um primeiro momento, as relações entre os dados de Turbidez reportados nas telemétricas e os dados de concentração dos metais traçadores (Manganês, Ferro e Alumínio) dos pontos de monitoramento foram analisados por meio de modelos de regressão linear.

Importante destacar que a análise de regressão é uma técnica estatística empregada para modelar e investigar a relação entre variáveis, sendo utilizada, principalmente, com o objetivo de previsão. Dessa forma, o modelo estatístico de regressão é desenvolvido para prever os valores de uma variável dependente ou variável resposta (Y), com base nos valores de uma variável independente ou explicativa (X) (MONTGOMERY, 2009).

Como premissa para o desenvolvimento dos modelos de regressão, foram correlacionados os dados dos pontos de monitoramento mais próximos das estações telemétricas, conforme indicado na **Tabela 8.2-2**.

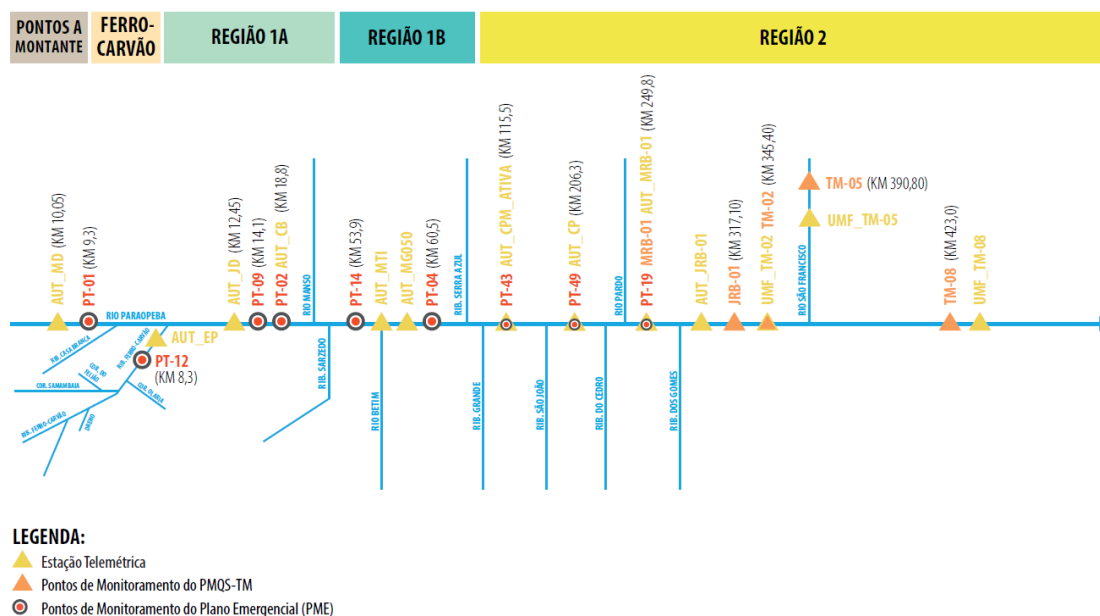
Tabela 8.2-2 Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão

Área	Estação telemétrica	Ponto de monitoramento
TLM- 1	AUT-MD	PT-01
	AUT-EP	PT-12
	AUT-JD	PT-09
	AUT-CB	PT-02
TLM- 2	AUT-MTI	PT-14
	AUT-Betim	TT-01
	AUT-MG 050	PT-48
	AUT-CPM_Ativa	PT-43
	AUT-CP	PT-49
TLM- 3	AUT-MRB-01	MRB-01/PT-19
	AUT-JRB-01	JRB-01
TLM- 4	UMF-TM-02	TM-02
	UMF-TM 05	TM-05
	UMF-TM 08	TM-08

Tendo em vista que as telemétricas reportam dados em frequência horária, com exceção da estação AUT-EP que reporta dados a cada dez minutos, e que a frequência de monitoramento nos pontos de coleta é inferior, foram selecionados os resultados das telemétricas referentes à data e ao horário mais próximo do horário de coleta dos pontos.

Na **Figura 8.2-1**, é apresentado um diagrama unifilar no qual podem ser observadas as localizações das estações telemétricas analisadas, bem como dos pontos de monitoramento convencional de qualidade da água.

Figura 8.2-1 Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água



Para a construção dos modelos de regressão linear e a definição do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de correlação (R), foram considerados os dados obtidos desde o início da operação de cada telemétrica (**Tabela 8.2-3**) e o respectivo ponto de monitoramento até a data do dia 30/09/2023 (final do período de estiagem/2023). Ressalta-se que os valores nulos foram excluídos do banco de dados.

Tabela 8.2-3 Data de início das operações de cada estação telemétrica.

Área	Estação	Data de início das operações
TLM- 1	AUT-MD	13/08/2019
	AUT-EP	08/08/2019
	AUT-JD	12/08/2019
	AUT-CB (PT-02)	11/07/2019
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14)	25/06/2019
	AUT-MG 050	25/06/2019
	AUT-CPM_Ativa	30/11/2020
	AUT-CP (PT-49)	13/07/2019
TLM- 3	AUT-Betim	13/10/2019
	AUT-MRB-01 (PT-19)	03/07/2019
TLM- 4	AUT-JRB-01	30/06/2019
	UMF-TM-02	17/07/2019
	UMF-TM 05	18/07/2019
	UMF-TM 08	19/07/2019

Nota: A estação AUT-CPM foi realocada após incidente que inundou a estação, sendo realocada em novembro/2020 e adotada a codificação CPM_Ativa para manutenção do histórico.

O coeficiente de determinação (R^2) representa o percentual da variação em Y (neste caso concentração do metal traçador no ponto de monitoramento) que é explicado por X (neste caso Turbidez na estação telemétrica) no modelo de regressão e é uma medida da qualidade do ajuste do modelo, variando de 0 (ausência de ajuste) a 1 (ajuste perfeito). As equações que apresentaram valores de R^2 próximos ou superiores a 0,7 foram consideradas com bom ajuste e, portanto, adequadas para representar a relação entre as variáveis analisadas.

O coeficiente de correlação linear (R), equivale à raiz quadrada do coeficiente de determinação e mede a intensidade da associação existente entre duas variáveis relacionadas. Importante destacar que não existe consenso quanto aos valores de intensidade das correlações, que são função do tipo de fenômeno analisado. Quanto mais próximo de 1 ou -1 mais forte é correlação entre as variáveis, sendo que um valor de R igual a 1 ou -1 indica uma correlação perfeita positiva ou negativa, respectivamente (AKOGLU, 2018). Neste estudo, considerou-se que valores do coeficiente de correlação, em módulo, maiores ou iguais a 0,6 indicam correlação forte (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Posteriormente, os resultados do monitoramento (valores observados) dos metais marcadores nos pontos da Vale na estiagem/2023, foram comparados com os resultados previstos pelos modelos de regressão linear para o mesmo período. Nesse contexto, o **Anexo IX** apresenta o cálculo de resíduos, que consiste na diferença entre as previsões e os resultados observados. Os resíduos podem ser visualizados por meio das tabelas brutas e de representação gráfica em formato de *boxplot*, proporcionando uma visualização da dispersão de seus resultados.

8.3. Resultados e discussão

Os resultados das análises entre os valores de Turbidez e as concentrações dos metais indicaram não haver ajuste linear para as frações dissolvidas dos metais analisados, com baixos valores de R^2 , na maior parte dos casos inferiores a 0,5, conforme indicado na **Tabela 8.3-1**. Tais resultados eram esperados, tendo em vista que a Turbidez da água está relacionada à presença de partículas em suspensão.

Observa-se que, para a fração dissolvida de manganês, o maior coeficiente de determinação foi encontrado na relação estabelecida entre os dados da estação AUT-CP (PT-49) e o ponto PT-49 e entre os dados da estação AUT-MRB-01 (PT-19) e o ponto MRB-01 (PT-19), mas, ainda assim, ambos com valor equivalente a 0,18. Ou seja, apenas 18% da variação das concentrações de Mn dissolvido pode ser explicada pela variabilidade dos teores de Turbidez, caso se adote o modelo de regressão linear. Para os parâmetros Fe dissolvido e Al dissolvido, os maiores valores de R^2 foram encontrados na relação estabelecida entre os dados da estação UMF-TM-05 e o ponto TM-05, correspondentes a 0,58 e 0,61, respectivamente.

Logo, na maior parte dos todos os casos, em se adotando um modelo de regressão linear, ele permitiria explicar menos de 50% da variabilidade das concentrações dos metais dissolvidos nos pontos de monitoramento, portanto, não indicando um ajuste adequado.

Tabela 8.3-1 Resultados de R² para as relações de Turbidez com a fração dissolvida dos metais

Área	Estação x ponto	R ² Mn dissolvido	R ² Fe dissolvido	R ² Al dissolvido
TLM- 1	AUT-MD x PT-01	0,081	0,15	0,12
	AUT-EP x PT-12	0,021	0,022	0,04
	AUT-JD x PT-09	0,059	0,088	0,08
	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,063	0,12	0,11
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,096	0,023	0,01
	AUT-MG 050 x PT-48	0,042	0,0018	0,045
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,099	0,071	0,12
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,18	0,16	0,13
TLM- 3	AUT-Betim x TT-01	0,10	0,091	0,25
	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,18	0,4	0,026
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,15	0,18	0,16
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,17	0,42	0,27
	UMF-TM 05 x TM-05	0,0019	0,58	0,61
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00000085	0,49	0,60

Nota: Cabe ressaltar que as estações da área TLM-4 são flutuantes, equipadas com duas sondas cada. Para efeitos deste estudo, considera-se a utilização das sondas rasas.

Já para as frações totais, conforme mostra a **Tabela 8.3-2**, os ajustes mostraram-se mais adequados (R² próximo ou superior a 0,7) para a maioria das comparações estabelecidas: AUT-MD x PT-01 (Mn, Fe e Al), AUT-JD x PT-09 (Mn, Fe e Al), AUT-CB (PT-02) x PT-02 (Mn, Fe e Al), AUT-MTI (PT-14) x PT-14 (Fe e Al), AUT-CPM_Ativa x PT43 (Mn, Fe e Al), (AUTCP (PT-49) x PT-49 (Mn, Fe e Al), AUT-MRB01 (PT-19) x PT-19 (Mn, Fe e Al), AUT-JRB-01 x JRB-01 (Fe e Al), UMF-TM-05 x TM-05 (Fe e Al). Nesses casos, em geral, mais de 70% da variabilidade das concentrações dos metais traçadores (fração total) pode ser explicada pelos modelos de regressão linear propostos.

Tabela 8.3-2 Resultados de R² das relações de Turbidez com as frações totais dos metais traçadores

Área	Estação x ponto	R ² Mn total	R ² Fe total	R ² Al total
TLM- 1	AUT-MD x PT-01	0,72	0,76	0,71
	AUT-EP x PT-12	0,032	0,092	0,029
	AUT-JD x PT-09	0,64	0,72	0,68
	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,76	0,80	0,77
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,50	0,69	0,67
	AUT-MG 050 x PT-48	0,47	0,49	0,41
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,72	0,75	0,73
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,72	0,77	0,70
TLM- 3	AUT-Betim x TT-01	0,0014	0,30	0,31
	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,78	0,87	0,79
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,46	0,67	0,72
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,19	0,54	0,51
	UMF-TM 05 x TM-05	0,016	0,73	0,79
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00089	0,00051	0,032

Nota: valores destacados em vermelho indicam bom ajuste linear entre as variáveis analisadas. Cabe ressaltar que as estações da área TLM-4 são flutuantes, equipadas com duas sondas cada. Para efeitos deste estudo, considera-se a utilização das sondas rasas.

Do **Gráfico 8.3-1** ao **Gráfico 8.3-4**, são apresentados os modelos de regressão linear que apresentaram bom ajuste para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos convencionais de monitoramento da Vale.

Gráfico 8.3-1 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MD e AUT-JD) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) – gráfico dispersão e correlação de Pearson

Gráfico 8.3-1 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Manganês total no PT-01

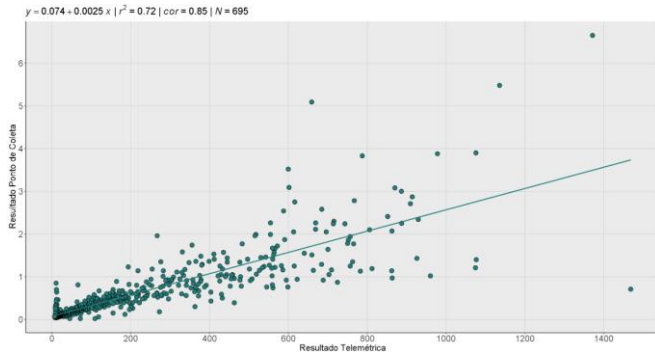


Gráfico 8.3-1 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Manganês total no PT-09

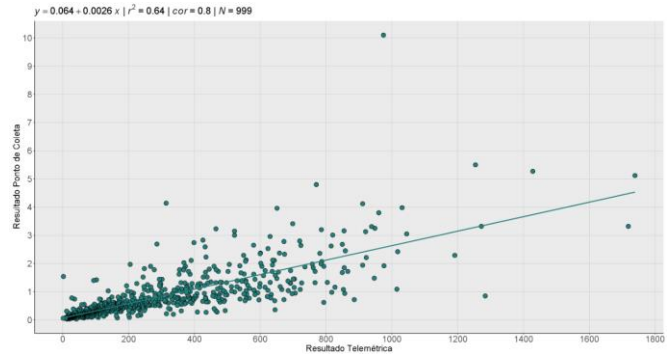


Gráfico 8.3-1 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Ferro total no PT-01

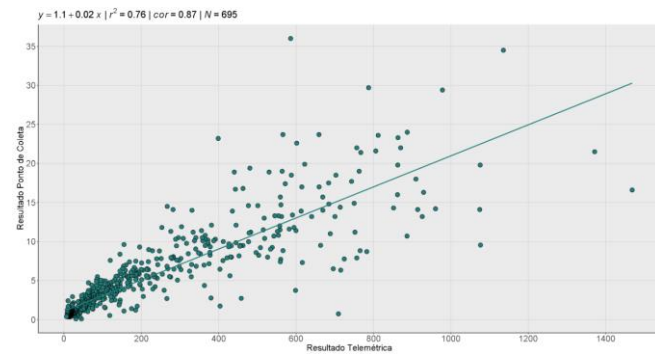


Gráfico 8.3-1 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Ferro total no ponto PT-09

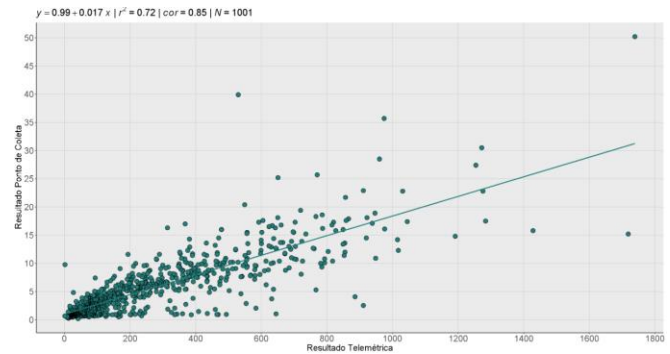


Gráfico 8.3-1 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Alumínio total no PT-01

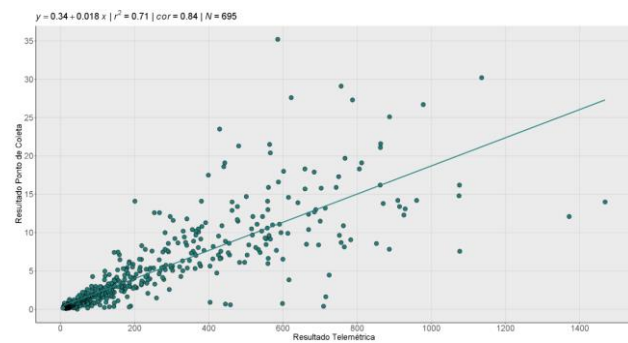


Gráfico 8.3-1 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Alumínio total no PT-09

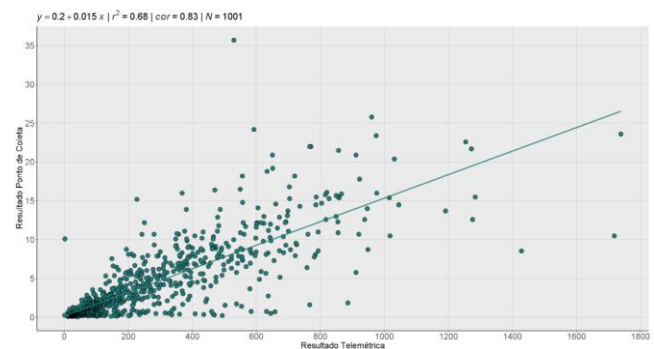


Gráfico 8.3-2 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CB, AUT-MTI e AUT-CPM_ATIVA) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) - gráfico dispersão e correlação de Pearson

Gráfico 8.3-2 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Manganês total no PT-02

Gráfico 8.3-2 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Ferro total no ponto PT-14

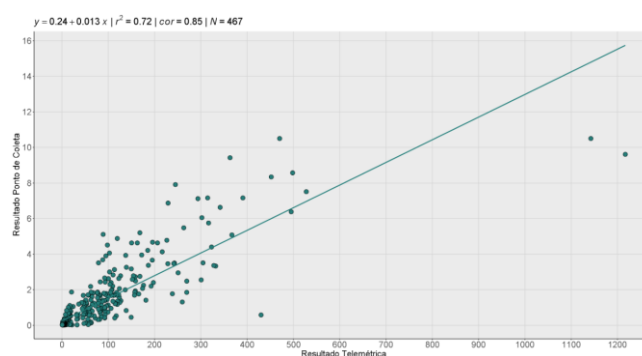
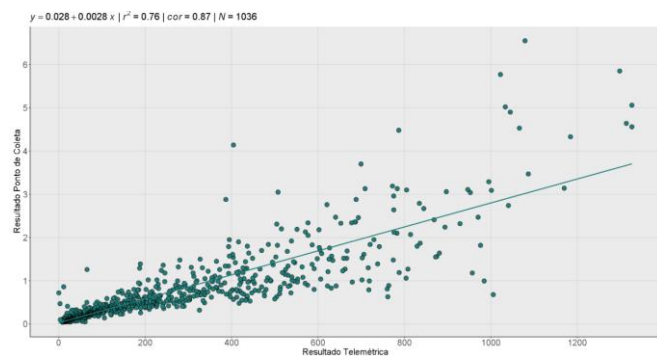


Gráfico 8.3-2 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Ferro total no PT-02

Gráfico 8.3-2 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Alumínio total no PT-14

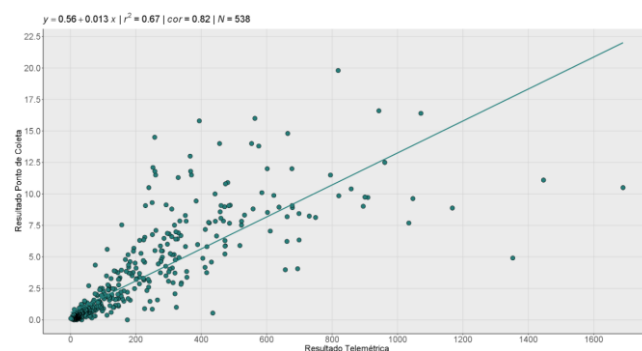
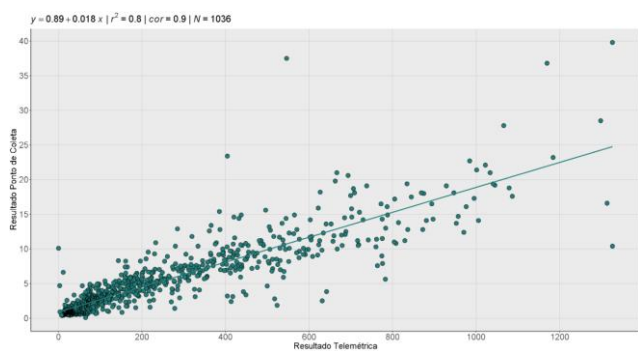


Gráfico 8.3-2 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Alumínio total no PT-02

Gráfico 8.3-2 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Manganês total no PT-43

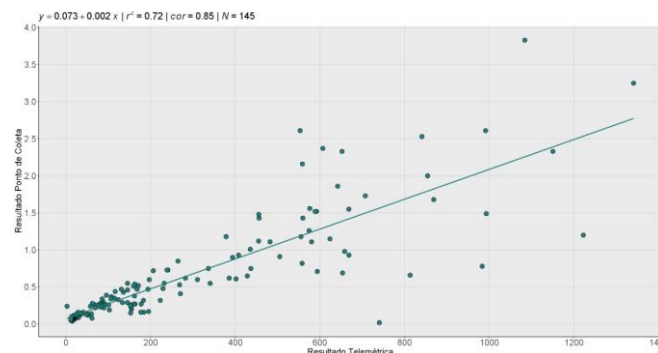
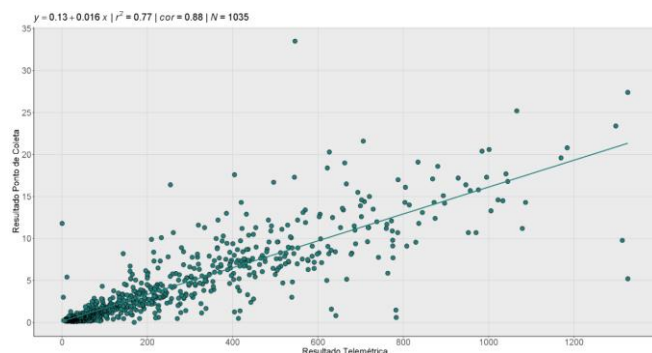


Gráfico 8.3-3 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CPM_Ativa, AUT-CP e AUT-MRB-01) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson

Gráfico 8.3-3 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Ferro total no PT-43

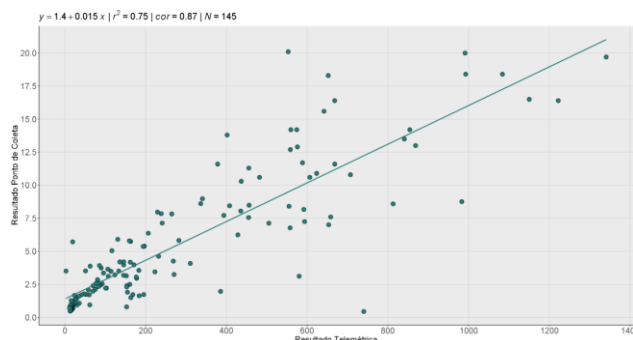


Gráfico 8.3-3 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Ferro total no PT-49

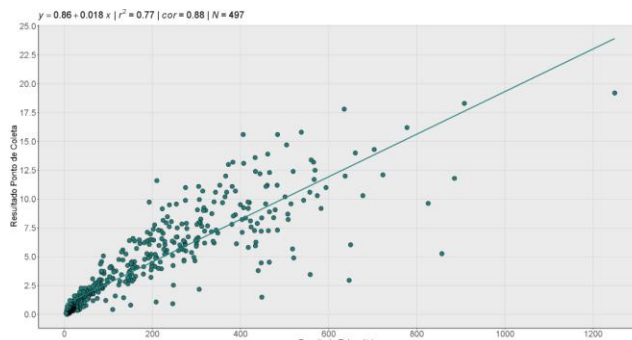


Gráfico 8.3-3 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Alumínio total no PT-43

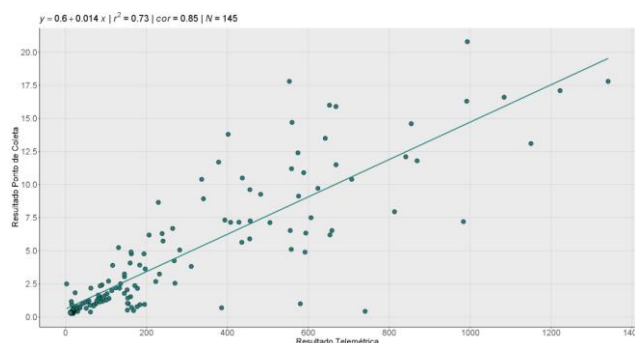


Gráfico 8.3-3 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Alumínio total no PT-49

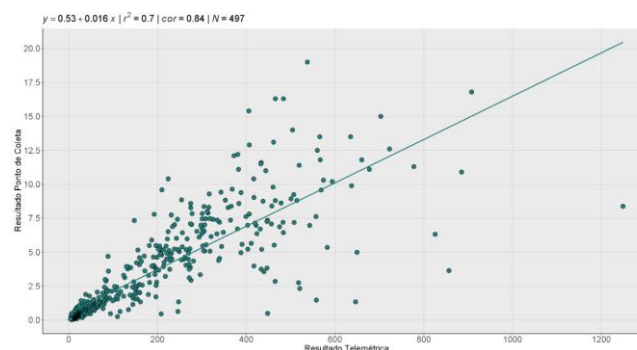


Gráfico 8.3-3 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Manganês total no PT-49

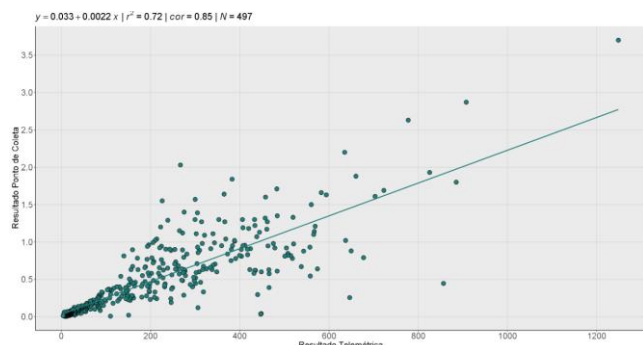


Gráfico 8.3-3 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Manganês total no PT-19

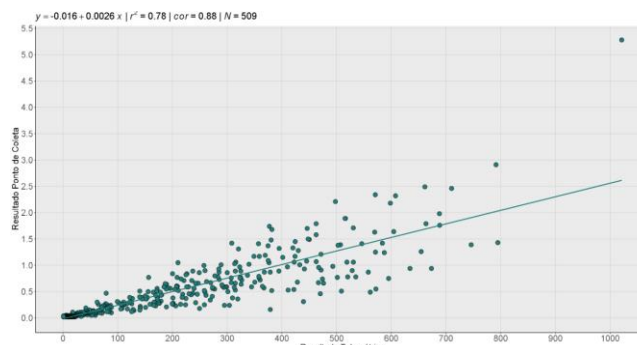


Gráfico 8.3-4 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MRB-01, AUT-JRB-01 e UMF-TM-05) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19, JRB-01 e TM-05) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson

Gráfico 8.3-4 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Ferro total no PT-19.

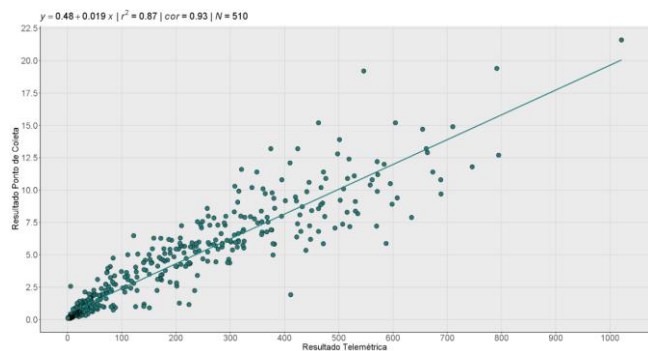


Gráfico 8.3-4 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 e os resultados de Alumínio total no JRB-01.

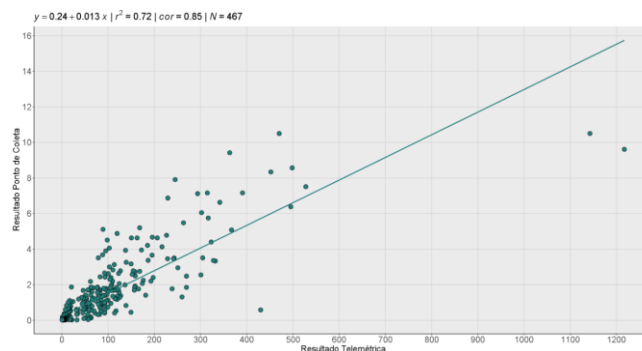


Gráfico 8.3-4 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Alumínio total no PT-19

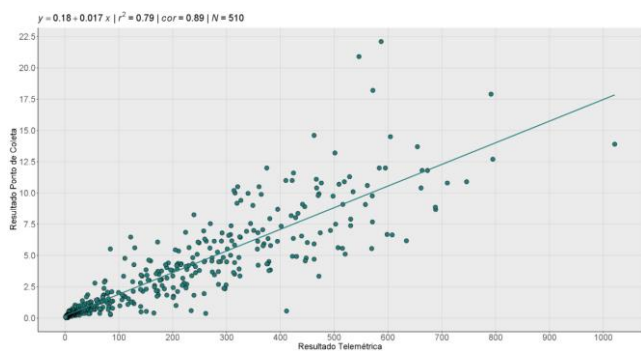


Gráfico 8.3-4 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Ferro total no TM-05

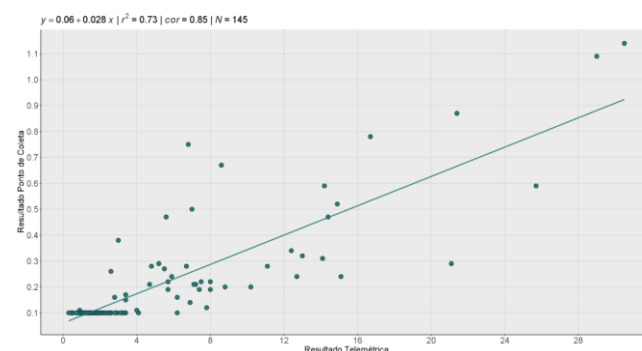


Gráfico 8.3-4 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 e os resultados de Ferro total no JRB-01

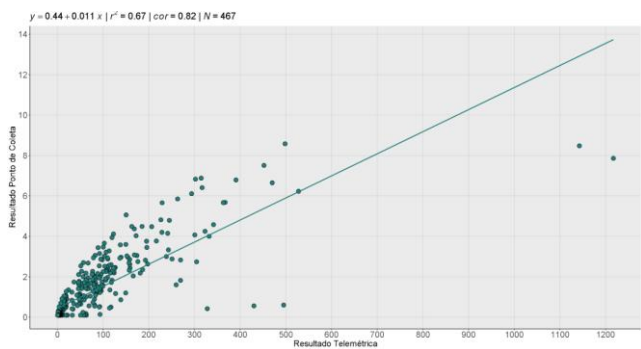
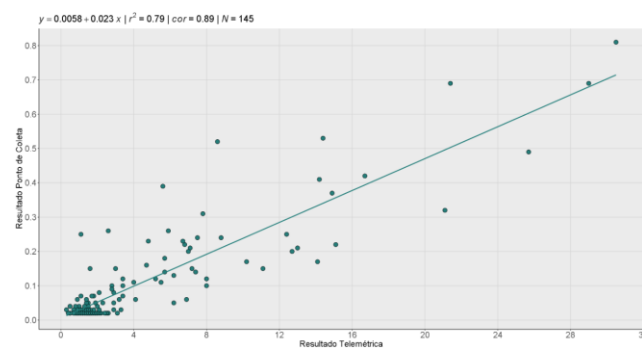


Gráfico 8.3-4 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Alumínio total no TM-05



Nos **Gráfico 8.3-1 (A, B e C)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-MD e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-01. A correlação dos dados de Turbidez da estação e dos metais foi forte e positiva (coeficiente de correlação superior a 0,7), indicando acréscimo nas concentrações dos metais à medida que o teor de Turbidez aumenta. Nota-se que a maior parte dos valores observados se encontram próximos à reta, indicando um bom ajuste do modelo de regressão linear, capaz de explicar mais de 70% da variabilidade dos dados dos metais traçadores com base nos teores de Turbidez.

Nos **Gráfico 8.3-1 (D, E e F)** são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-JD e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-09. Neste caso, para os três parâmetros correlacionados também houve correlação forte e positiva, e coeficiente de determinação próximo a 0,7. Os modelos foram capazes de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais, com destaque para o melhor ajuste para Ferro total ($R^2= 0,72$).

Nos **Gráfico 8.3-2 (A, B e C)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-CB (PT-02) e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-02. Para os três casos, as correlações estabelecidas foram fortes e positivas. Os valores de R^2 foram próximos de 0,8, o modelo ajustado permite explicar até 80% da variabilidade das concentrações deste metal em função da Turbidez.

Nos **Gráfico 8.3-2 (D e E)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-MTI e as concentrações de Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-14. Neste caso, para os dois parâmetros correlacionados, houve correlação forte e positiva, com coeficiente de correlação próximo a 0,7 para ambas as relações, sendo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Do **Gráfico 8.3-2 (F)** ao **Gráfico 8.3-3 (A e B)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-CPM_Ativa e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-43. Para os três casos as correlações estabelecidas foram fortes e positivas. Os valores de R^2 foram próximos a 0,7 nos três casos, indicando bom ajuste, com capacidade de explicar mais de 70% da variabilidade das concentrações dos metais no ponto de monitoramento.

Nos **Gráfico 8.3-3 (C, D e E)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-CP e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-49. Para os três casos as correlações estabelecidas foram fortes e positivas. Os valores de R^2 foram próximos de 0,7, com destaque para Ferro total em que o modelo ajustado permite explicar até 77% da variabilidade das concentrações deste metal em função da Turbidez.

Nos **Gráfico 8.3-3 (F)** e **Gráfico 8.3-4 (A e B)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-MRB-01 e as concentrações de Manganês total, Ferro total e Alumínio total registradas no ponto PT-19. Os valores de R^2 foram próximos ou maiores que 0,8 nos três casos, indicando bom ajuste, sendo o modelo linear capaz de explicar cerca de 80% da variabilidade das concentrações dos metais no ponto de monitoramento por meio dos resultados de Turbidez medidos na estação telemétrica.

Nos **Gráfico 8.3-4 (C e D)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na AUT-JRB-01 e as concentrações de Ferro total e Alumínio total registradas no ponto JRB-01. Neste caso, para os dois parâmetros correlacionados houve correlação forte e positiva, com coeficiente de correlação próximo a 0,7, sendo o modelo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Por fim, nos **Gráfico 8.3-4 (E e F)**, são apresentados os modelos de regressão linear ajustados aos dados de Turbidez registrados na estação telemétrica UMF-TM-05 e as concentrações de Ferro total e Alumínio total registradas no ponto TM-05. Neste caso, também para os dois parâmetros correlacionados, houve correlação forte e positiva, com coeficiente de correlação próximo a 0,7, sendo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Na sequência, os **Gráfico 8.3-5** a **Gráfico 8.3-8** apresentam os resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear apresentados anteriormente.

Gráfico 8.3-5 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

Gráfico 8.3-5 (A) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MD

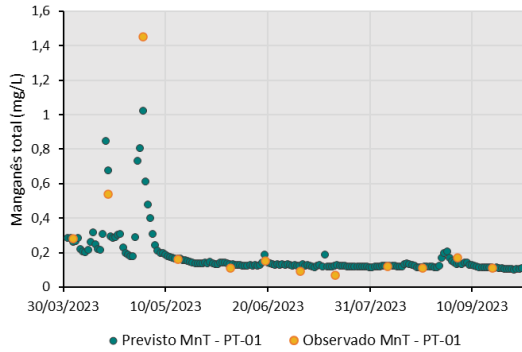


Gráfico 8.3-5 (D) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-JD

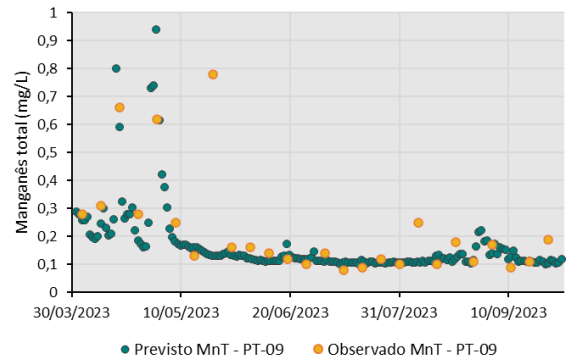


Gráfico 8.3-5 (B) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MD

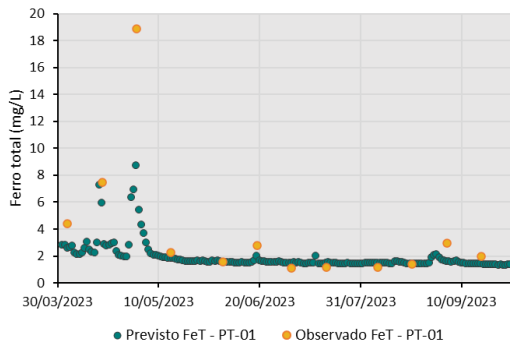


Gráfico 8.3-5 (E) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JD

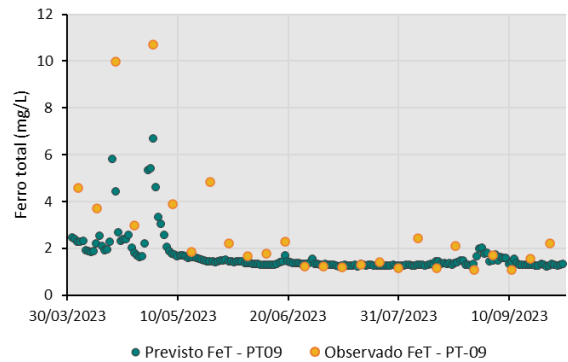


Gráfico 8.3-5 (C) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MD

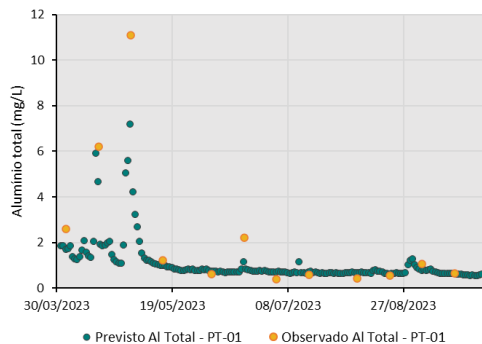


Gráfico 8.3-5 (F) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JD

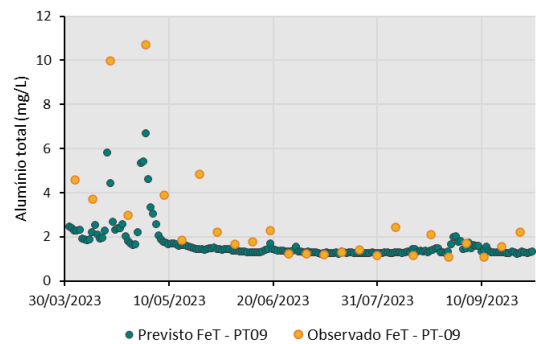


Gráfico 8.3-6 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

Gráfico 8.3.6 (A) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CB (PT-02)

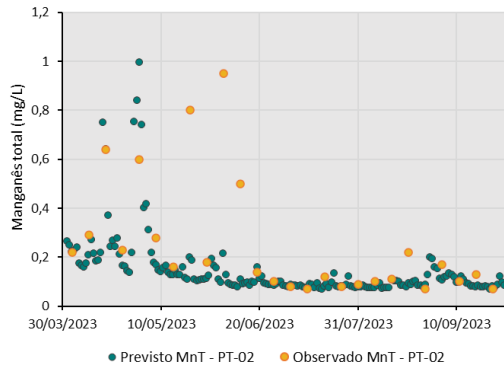


Gráfico 8.3.6 (D) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MTI (PT-14)

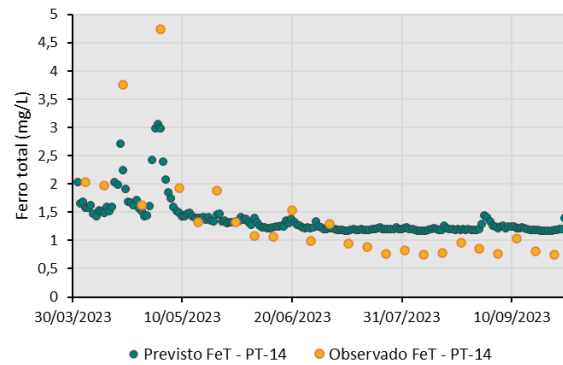


Gráfico 8.3.6 (B) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CB (PT-02)

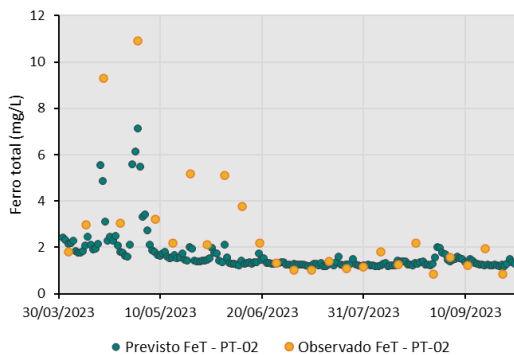


Gráfico 8.3.6 (E) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MTI (PT-14)

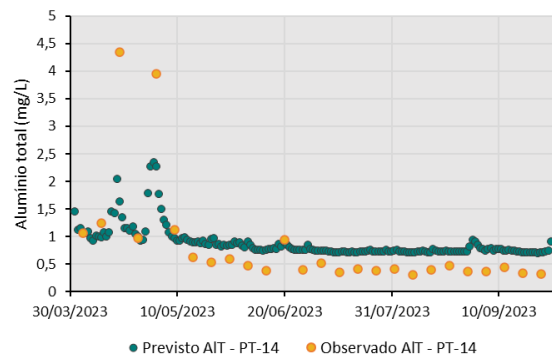


Gráfico 8.3.6 (C) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CB (PT-02)

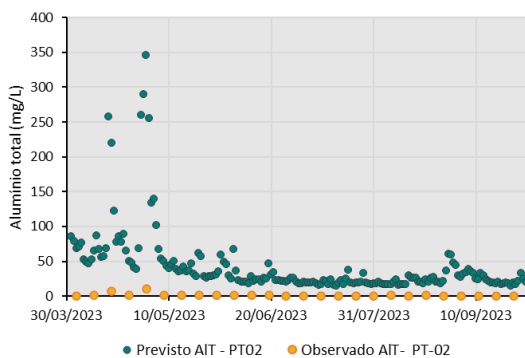


Gráfico 8.3.6 (F) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CPM_Ativa

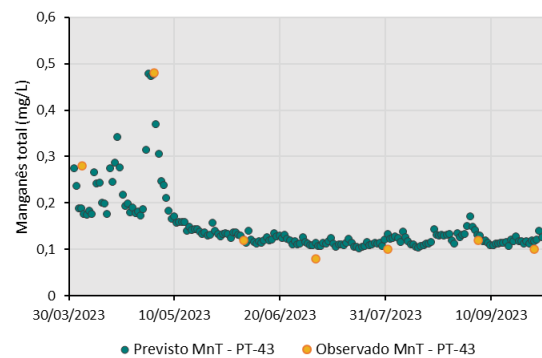


Gráfico 8.3-7 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

Gráfico 8.3.7 (A) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CPM_Ativa.

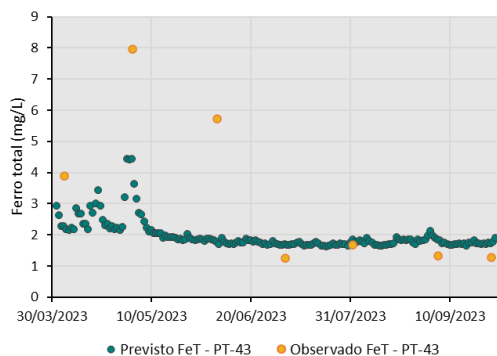


Gráfico 8.3.7 (D) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CP (PT-49).

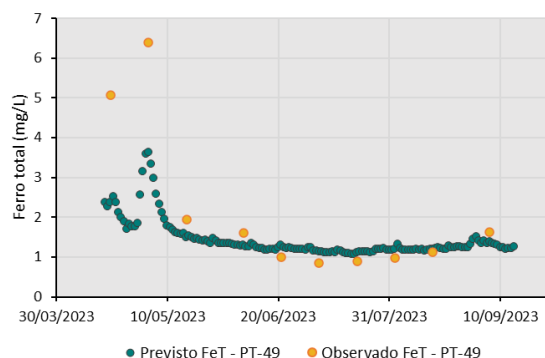


Gráfico 8.3.7 (B) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CPM_Ativa.

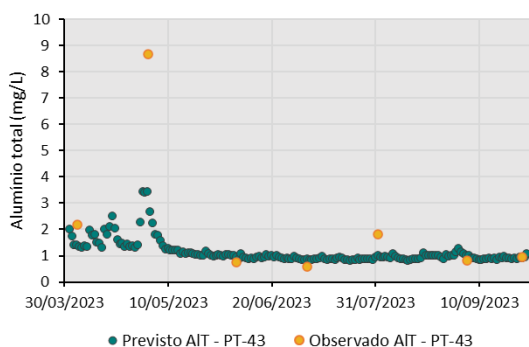


Gráfico 8.3.7 (E) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CP (PT-49).

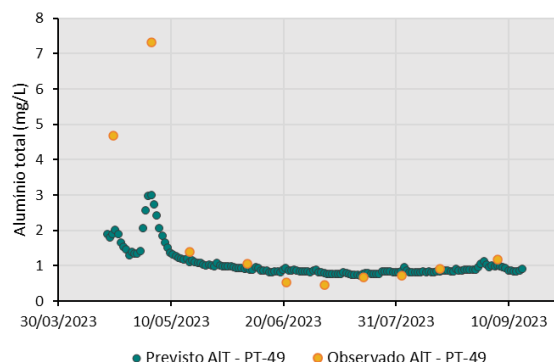


Gráfico 8.3.7 (C) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CP (PT-49).

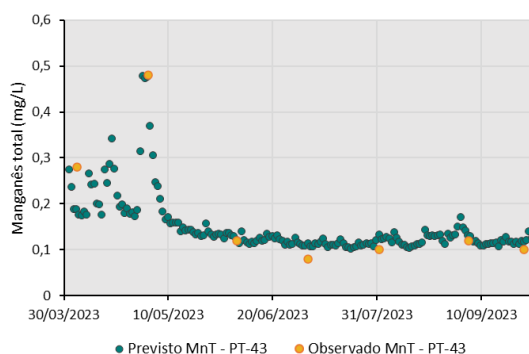


Gráfico 8.3.7 (F) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).

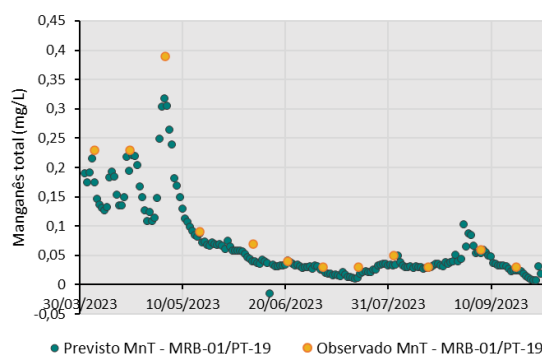


Gráfico 8.3-8 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

Gráfico 8.3.8 (A) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MRB-01 (PT-19)

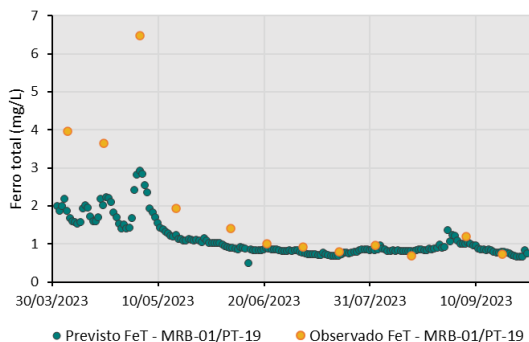


Gráfico 8.3.8 (D) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JRB-01

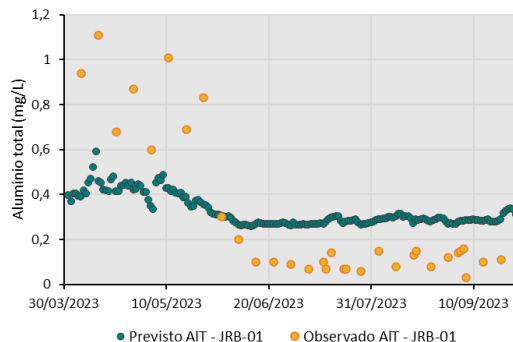


Gráfico 8.3.8 (B) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MRB-01 (PT-19)

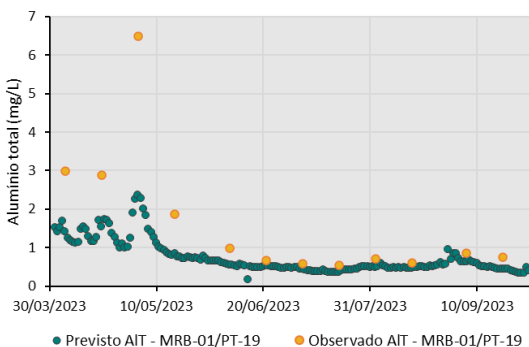


Gráfico 8.3.8 (E) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação UMF-TM-05

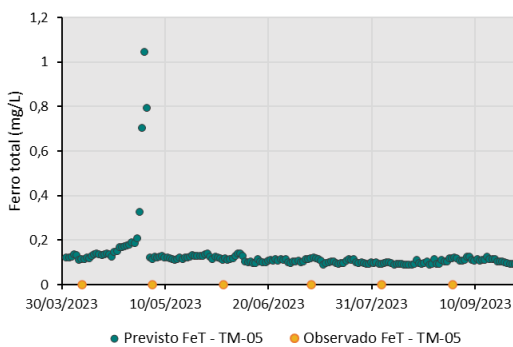


Gráfico 8.3.8 (C) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JRB-01

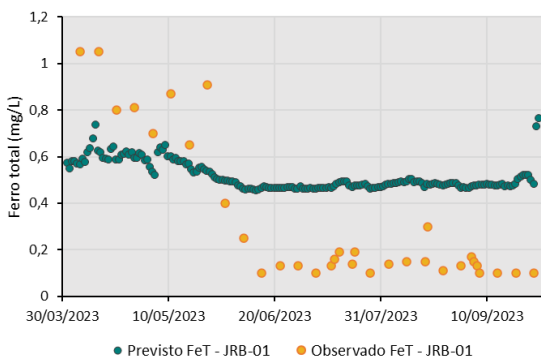
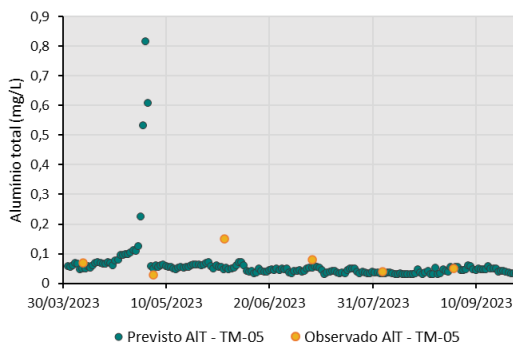


Gráfico 8.3.8 (F) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação UMF-TM-05



Para a estação AUT-MD, analisando os **Gráfico 8.3-5 (A, B e C)**, pode-se observar uma concordância notável entre os valores preditos e observados no ponto PT-01 para os parâmetros Mn, Fe e Al total durante o período de estiagem/2023, indicando uma adequada adaptação dos dados em relação aos níveis de Turbidez.

Nota-se, de maneira semelhante, na estação AUT-JD, cujos resultados modelados estão representados nos **Gráfico 8.3-5 (D, E e F)**, uma aproximação similar entre os valores previstos e observados no ponto PT-09 para os parâmetros Mn, Fe e Al total no mesmo período, sugerindo uma correlação robusta em função dos valores de Turbidez. Destacando-se resultados observados superiores para Al total.

Ao analisar os resultados da estação AUT-CB, verificados nos **Gráfico 8.3-6 (A, B e C)**, destaca-se a maior proximidade entre os valores preditos e observados para os parâmetros Mn e Fe total. Em relação ao Al total, os resultados observados foram substancialmente menores que as previsões, maior deles foi equivalente a cerca de 10 mg/L, e, a maioria inferior 1mg/L, motivo pelo qual aparecem tão próximos de zero na representação do gráfico.

Nos **Gráfico 8.3-6 (D e E)**, é possível observar que o comportamento previsto com base nos dados da estação AUT-MTI para os parâmetros Al e Fe totais apresenta no início do ciclo de estiagem, resultados com um comportamento superior ou próximo entre os resultados observados e os previstos, já na segunda metade do ciclo de estiagem, majoritariamente os resultados são de menor magnitude que os previstos.

Os resultados dos **Gráfico 8.3-6 (F) e Gráfico 8.3-7 (A e B)** indicam uma aproximação significativa entre o comportamento previsto para a estação AUT-CPM_Ativa nos parâmetros Mn, Fe e Al totais e os resultados do monitoramento no ponto PT-43. Notavelmente, o parâmetro Mn total apresentou a melhor correlação.

Examinando os **Gráfico 8.3-7 (C, D e E)**, observa-se que o modelo previsto para os parâmetros Al, Fe e Mn totais com base nos dados telemétricos da estação AUT-CP, assim como para a estação AUT-MTI, apresenta no início do ciclo de estiagem, resultados com um comportamento superior ou próximo entre os resultados observados e os previstos, já na segunda metade do ciclo de estiagem, majoritariamente os resultados são de menor magnitude que os previstos. Importante ressaltar que, entre 23/03 e 17/04, a estação AUT-CP (PT-49) foi desativada devido a atos de vandalismo. Em 14/09, a estação foi novamente alvo de vandalismo, levando à sua desativação permanente. Em novembro/2023, a estação AUT-MPT (P7) foi instalada montante da ponte Taquara, na seção fluvial mais próxima à antiga estação AUT-CP (PT-49), os resultados da nova estação serão discutidos nos próximos relatórios.

Os resultados apresentados pelos **Gráfico 8.3-7 (F) e Gráfico 8.3-8 (A e B)** indicam que o comportamento previsto para os parâmetros Al, Fe e Mn totais foi próximo ao encontrado nos resultados do monitoramento no ponto MRB-01/PT-19.

Analisando os **Gráfico 8.3-8 (C e D)**, nota-se que o comportamento previsto para os parâmetros Al e Fe totais é geralmente de menor magnitude em relação às concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento JRB-01.

Por fim, os resultados dos **Gráfico 8.3-8 (E e F)** sobre a estação UMF-TM-05, indicam que o comportamento previsto para os parâmetros Fe total foi superior ao encontrado nos resultados do monitoramento no ponto TM-05, equivalente ao limite de quantificação (LQ). Enquanto para Al total foi próximo aos resultados do monitoramento no ponto TM-05.

De maneira geral, ao comparar os resultados previstos e observados, nota-se um acréscimo nas medições observadas, em relação aos previstos, em alguns momentos entre abril e junho. Esse padrão pode-se relacionar com as informações delineadas no capítulo no capítulos 4, no qual reporta-se que foram registradas precipitações atípicas e localizadas no final de abril, ocorrendo durante o período de estiagem. Esses eventos possivelmente tiveram impacto no aumento dos dados observados. Todavia destaca-se que de maneira geral, os resultados previstos e observados foram similares.

No que diz respeito à análise dos resíduos entre os resultados observados e previstos, nota-se que o parâmetro Manganês total se destaca pelos resíduos mais próximos de zero. Quanto aos parâmetros Ferro total e Alumínio total, foi indicada uma maior variação residual. Especificamente para a Estação AUT-TM-05 e o ponto TM-05 são indicadas variações menos expressivas e mais próximas de zero no tocante aos parâmetros Ferro total e Alumínio total.

8.4. Considerações

A análise realizada permite a avaliação da eficácia das estações telemétricas na previsão de resultados nos pontos de monitoramento, possibilitando a estimativa de comportamentos e mudanças específicas na qualidade da água em intervalos de tempo curtos. Esse benefício é particularmente relevante, uma vez que os resultados analíticos dos metais indicadores, obtidos por meio de campanhas tradicionais de monitoramento, requerem alguns dias para serem disponibilizados pelo laboratório.

Considerando as análises de correlação entre os dados de Turbidez das estações telemétricas e os resultados associados aos metais traçadores nos pontos de monitoramento próximos, observa-se que os coeficientes de determinação mais robustos são obtidos para os parâmetros em suas frações totais, enquanto as frações dissolvidas apresentam correlações menos expressivas. Essa questão está associada possivelmente à relação da Turbidez com partículas em suspensão na água.

De maneira geral, os valores previstos indicam um ajuste consistente nas correlações estabelecidas para Manganês, Ferro e Alumínio totais. Destaca-se que o parâmetro Manganês total se destaca pela proximidade de seus resíduos em relação ao valor zero, indicando uma previsibilidade do modelo em relação ao observado na amostragem convencional. Quanto aos

parâmetros Ferro total e Alumínio total, a Estação UMF-TM-05 e o ponto TM-05 revelam as variações menos acentuadas e mais próximas de zero entre todas as estações.

De forma geral, nota-se que os resultados previstos são superiores aos observados, uma condição que pode ser considerada positiva e conservadora para possíveis tomadas de decisões. Uma exceção é observada nas medições do início de maio/2023, com uma elevação mais expressiva, o que se alinha às informações apresentadas no Capítulo 4, onde é relatada a ocorrência de precipitações atípicas e localizadas no final de abril/2023. Esses eventos atípicos são prováveis causas do incremento nos dados observados.

9. Comportamento na alteração da qualidade hídrica dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais

9.1. Objetivo

Objetiva-se, neste item, analisar o comportamento dos rios tributários e suas possíveis influências na alteração da qualidade hídrica do rio Paraopeba ao longo dos diferentes períodos sazonais, mais especificamente nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

9.2. Metodologia

De modo a identificar o comportamento e a eventual influência dos tributários na qualidade da água do rio Paraopeba ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem, foram realizadas as seguintes avaliações:

- Análise das violações aos padrões legais de classe de enquadramento, conforme a DN COPAM-CERH nº 08/2022;
- Análise espacial e temporal dos parâmetros de qualidade das águas superficiais por meio de gráficos *boxplot* (**Anexo X**);
- Análise estatística inferencial (teste não paramétrico de Mann-Whitney).

No que diz respeito às análises das violações aos padrões legais de classe de enquadramento, estas foram realizadas mediante a utilização de gráficos que indicam os percentuais de violação e número de amostras para os períodos sazonais de estiagem subsequentes. É importante mencionar que a frequência de coleta de amostras para tributários é mais reduzida (em geral mensal) e, assim, tem-se um menor número de resultados para o período.

Os gráficos *boxplot* foram utilizados para a análise espacial e temporal do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais ao longo dos períodos sazonais, apresentado os valores de tendência central, dispersão e simetria dos resultados das análises realizadas em cada ponto do tributário, comparando-os aos *baselines* sazonais históricos.

Para a elaboração dos gráficos *boxplot*, foram utilizados os resultados de monitoramento dos pontos de monitoramento da Vale em cada tributário e seus respectivos pontos de montante e jusante, localizados no rio Paraopeba. Para a definição dos *baselines* sazonais históricos, foram utilizados os pontos da rede do IGAM localizados mais próximos a cada tributário.

As sub-bacias de contribuição dos tributários/afluentes compreendem um conjunto representativo de uso e ocupação de solo e envolvem, dentre diferentes atividades, a exploração minerária, as práticas agropecuárias e a intensa ocupação urbana. Assim, os tributários da bacia do rio Paraopeba foram incorporados ao plano de monitoramento com a

finalidade de avaliar seu comportamento e eventuais influências nas alterações de qualidade da água ao longo do curso hídrico principal. Nesse sentido, focou-se nas análises dos seguintes tributários:

- Ribeirão Sarzedo (TT-02)
- Rio Betim (TT-01)
- Ribeirão das Abóboras (TT-05)
- Ribeirão dos Gomes/das Almas (CE-01)

Esse conjunto de tributários foi estabelecido uma vez que não foi constatada influência significativa da maior parte dos afluentes nas avaliações realizadas e discutidas no documento intitulado Relatório de Fechamento de Ciclo (ARCADIS, 2019), que apresentou análise dos resultados de monitoramento do período considerado emergencial, com dados compreendidos entre 25/01/2019, data do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, até o dia 30/06/2019. Importante destacar que os afluentes selecionados e listados acima podem ser considerados representativos das influências de áreas com uso e ocupação do solo em condições urbanas e rurais que caracterizam a bacia hidrográfica do rio Paraopeba como um todo.

Na **Tabela 9.2-1**, são apresentados os pontos de monitoramento localizados nos tributários, o enquadramento legal de cada um, os pontos da rede oficial de monitoramento do IGAM para definição do *baseline* e os pontos de montante e jusante localizados no rio Paraopeba.

Tabela 9.2-1 Tributários e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba

Pontos tributários	Curso d'água	Classificação segundo DN COPAM-CERH 08/2022	Ponto de <i>baseline</i>	Ponto montante	Ponto jusante	Região
TT-02	Ribeirão Sarzedo	2	BP068	PT-05	PT-03	1A e 1B*
TT-01	Rio Betim	3	BP070	PT-14	PT-48	1B
TT-05	Ribeirão das Abóboras	2	BP072	PT-53	PT-54	2
CE-01	Ribeirão dos Gomes/das Almas	1	BP099	PT-57	CE-02	

Nota: *O ponto PT-05 está localizado na Região 1A e o ponto PT-03 na 1B

Foi aplicado o teste não paramétrico de Mann-Whitney ($\alpha = 0,05$) para comparação dos resultados dos parâmetros nos pontos do rio Paraopeba a montante e jusante das confluências dos tributários e verificação de seu potencial influência. Esse teste é aplicado com o objetivo de comparar duas amostras independentes entre si (HELSEL; HIRSCH, 2002), indicando se há (valor-p $\leq 0,05$) ou não (valor-p $>0,05$) diferença estatística significativa entre elas.

9.3. Resultados e discussão

Nos itens a seguir, são apresentadas as análises dos resultados de monitoramento da Vale para os tributários ribeirão Sarzedo (TT-02), rio Betim (TT-01), ribeirão das Abóboras/Grande

(TT-05) e ribeirão dos Gomes/das Almas (CE-01) e os respectivos pontos de monitoramento de montante e jusante no rio Paraopeba.

9.3.1. Ribeirão Sarzedo (TT-02)

O tributário ribeirão Sarzedo é monitorado por meio do ponto TT-02, localizado na Região 1A, e as análises dos pontos de montante e jusante no rio Paraopeba foram realizadas no PT-05 e PT-03, respectivamente. A bacia do ribeirão Sarzedo apresenta forte impacto das atividades industriais devido a lançamentos de efluentes nessa área. Ressalta-se nessa bacia a presença de atividade agrícola com produção expressiva de hortaliças comercializadas na região metropolitana, com possíveis impactos resultantes do uso de insumos químicos na sua produção (Agência RMBH & UFMG, 2017).

No **Gráfico 9.3.1-1**, podem ser observados os percentuais de violação dos parâmetros analisados para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba. Para o período atual, estiagem/2023, percebe-se que no ribeirão Sarzedo, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, DBO, Escherichia/Coliformes, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Oxigênio dissolvido e pH. Contudo, dentre os parâmetros supracitados, a porcentagem maior de violação no tributário em comparação com os pontos de montante e jusante foram verificadas para DBO (montante: 0%, tributário: 57%, jusante: 0%), Ferro dissolvido (montante: 38%, tributário: 86%, jusante: 50%) e Fósforo total (montante: 0%, tributário: 100%, jusante: 17%). Destaca-se ainda que o parâmetro Manganês total, apresentou porcentagens elevadas nos três pontos na estiagem/2023, atingindo 83% no PT-05, 100% no TT-02 e 92% no PT-03.

Em termos da evolução temporal, percebe-se comportamentos similares entre as estações sazonais para os parâmetros Ferro dissolvido, Manganês total e Fósforo total, principalmente em relação ao tributário (TT-02), o qual tende a permanecer com concentrações elevadas desses analitos desde a estiagem/2019 até a última estiagem em 2023. Já o Alumínio dissolvido não apresenta nenhuma tendência de estabilidade ao longo dos períodos sazonais em nenhum dos pontos.

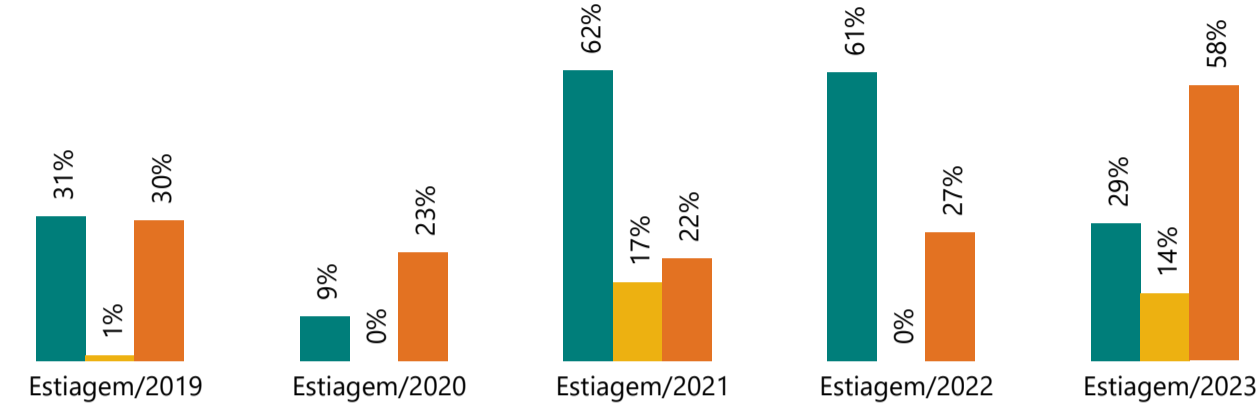
Gráfico 9.3.1-1 Percentuais de violações nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no ribeirão Sarzedo (TT-02) e para pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) no rio Paraopeba.

% Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante

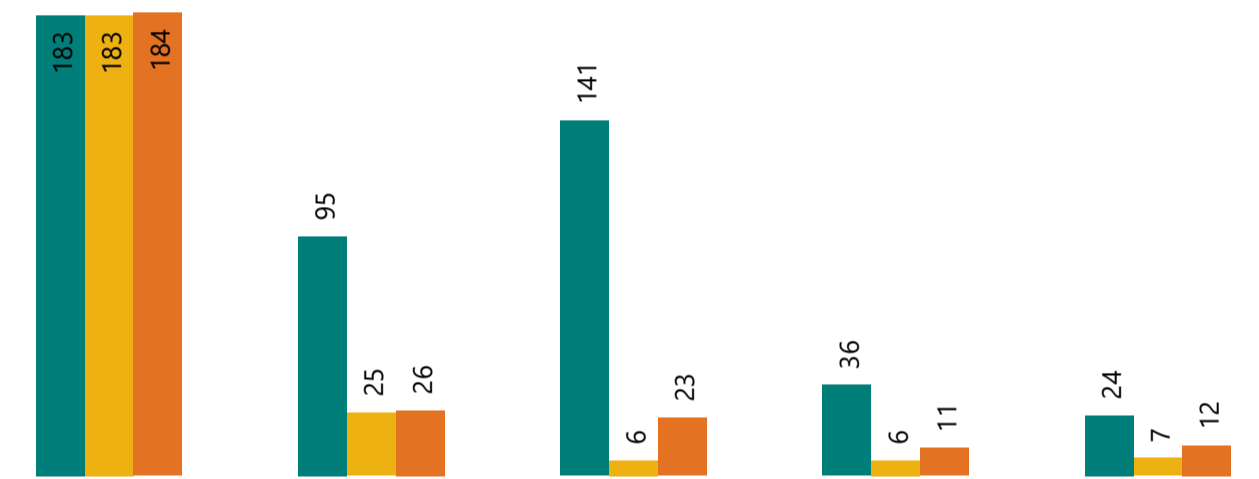
Parâmetro
Alumínio Dissolvido

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

% violações



N° amostras



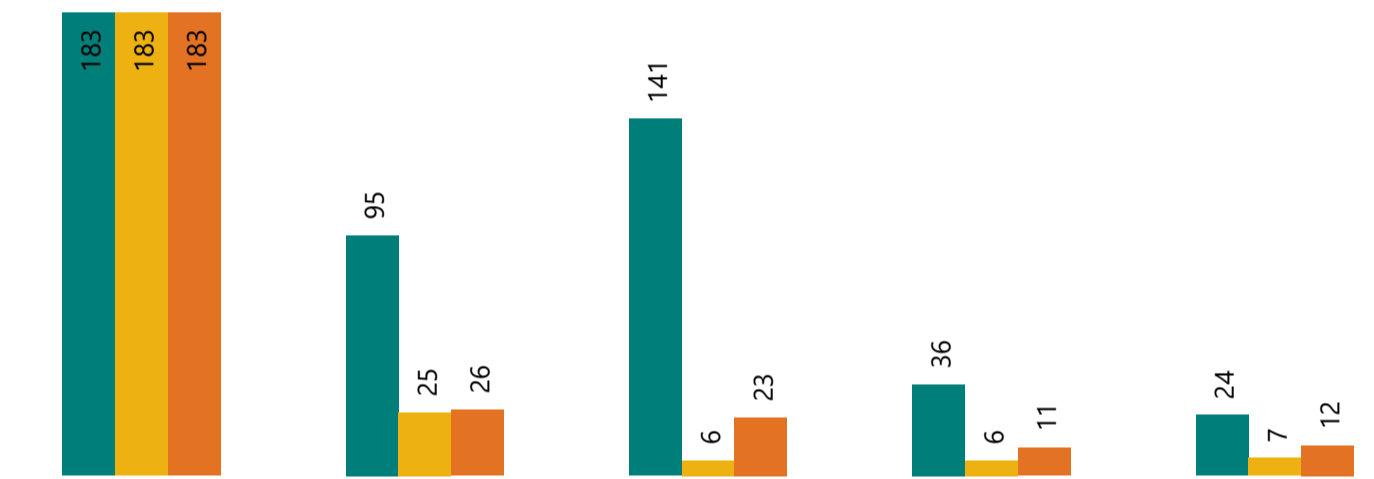
Parâmetro
Arsênio Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

% violações



N° amostras



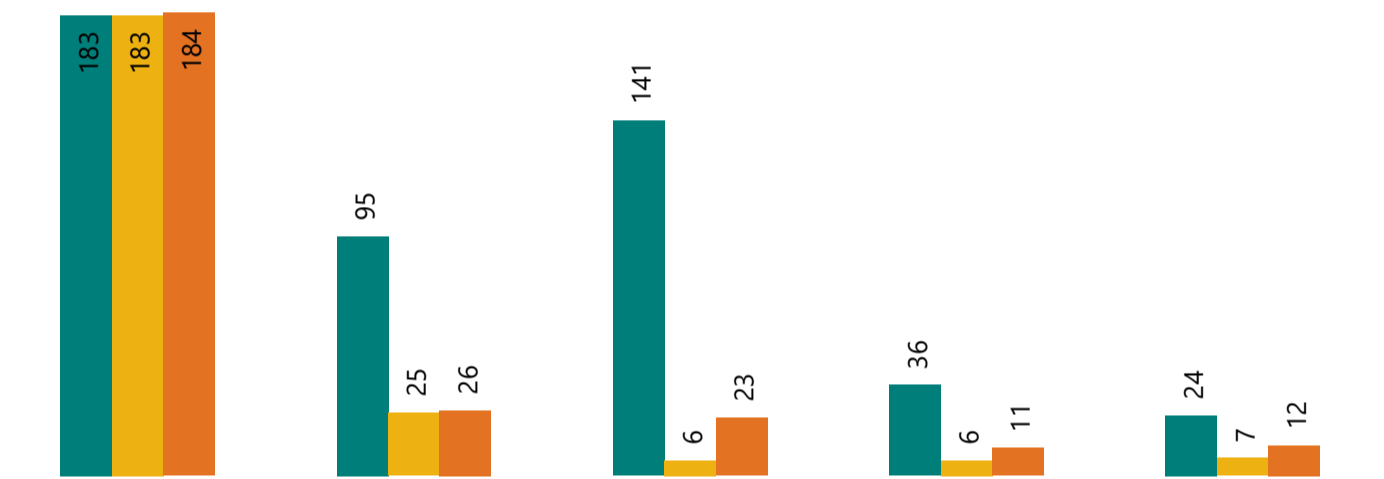
Parâmetro
Cádmio Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

% violações



N° amostras



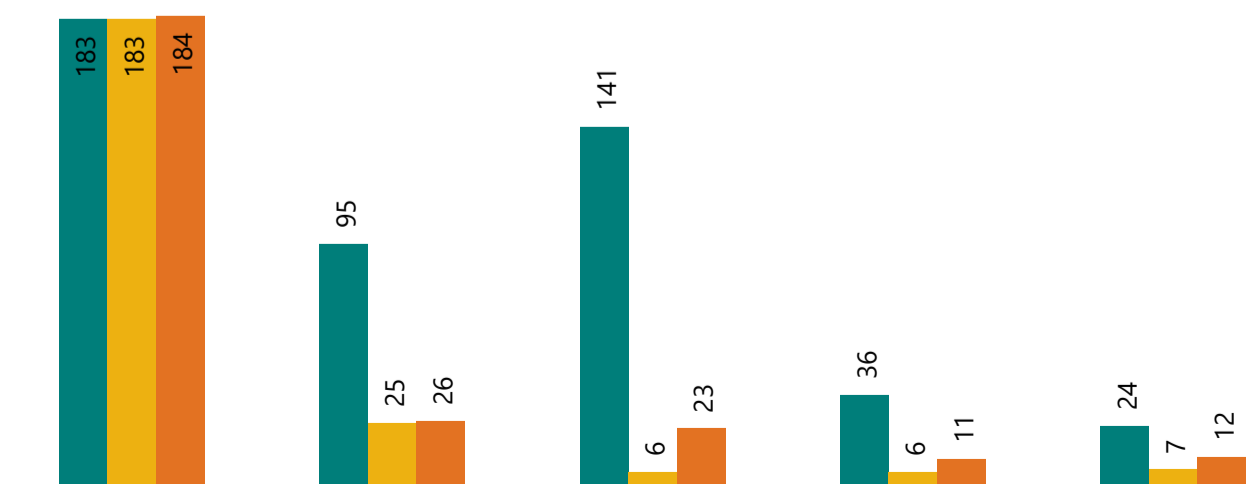
Parâmetro
Chumbo Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

% violações



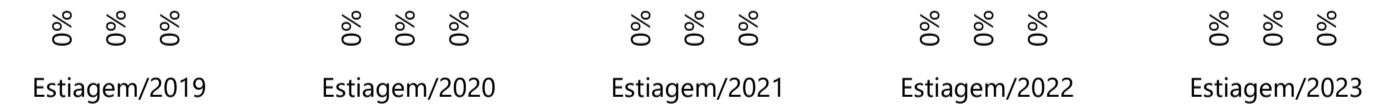
N° amostras



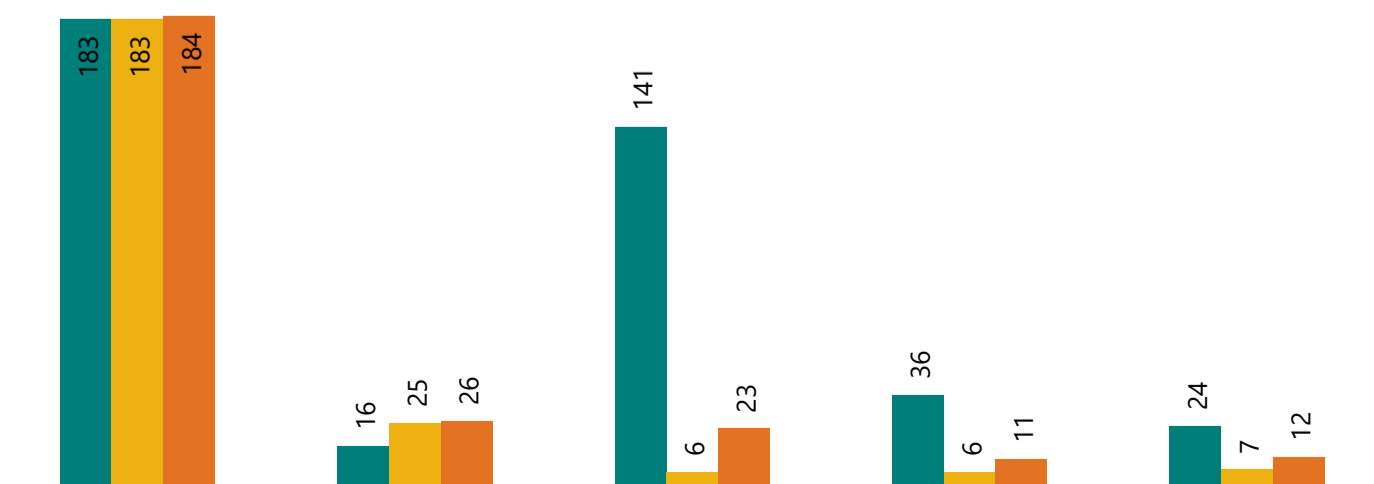
Parâmetro
Cobalto Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

% violações



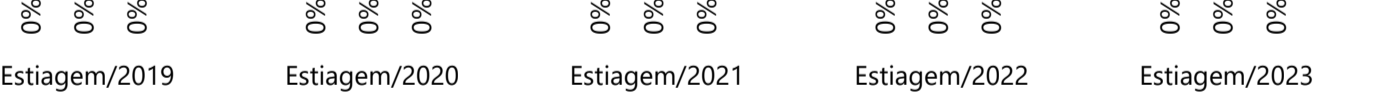
N° amostras



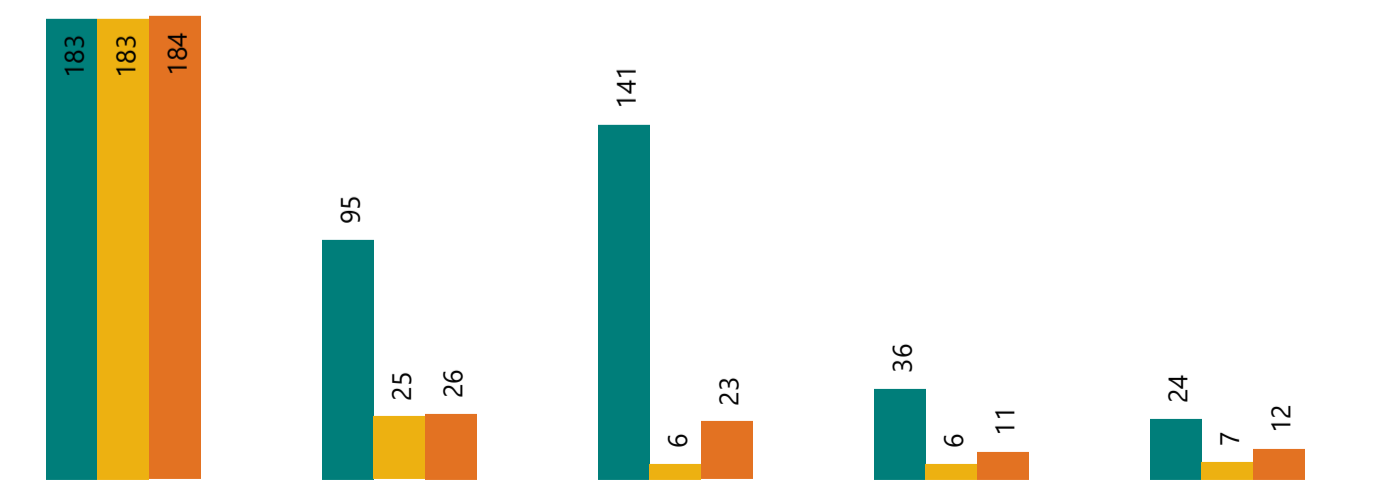
Parâmetro
Cobre Dissolvido

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

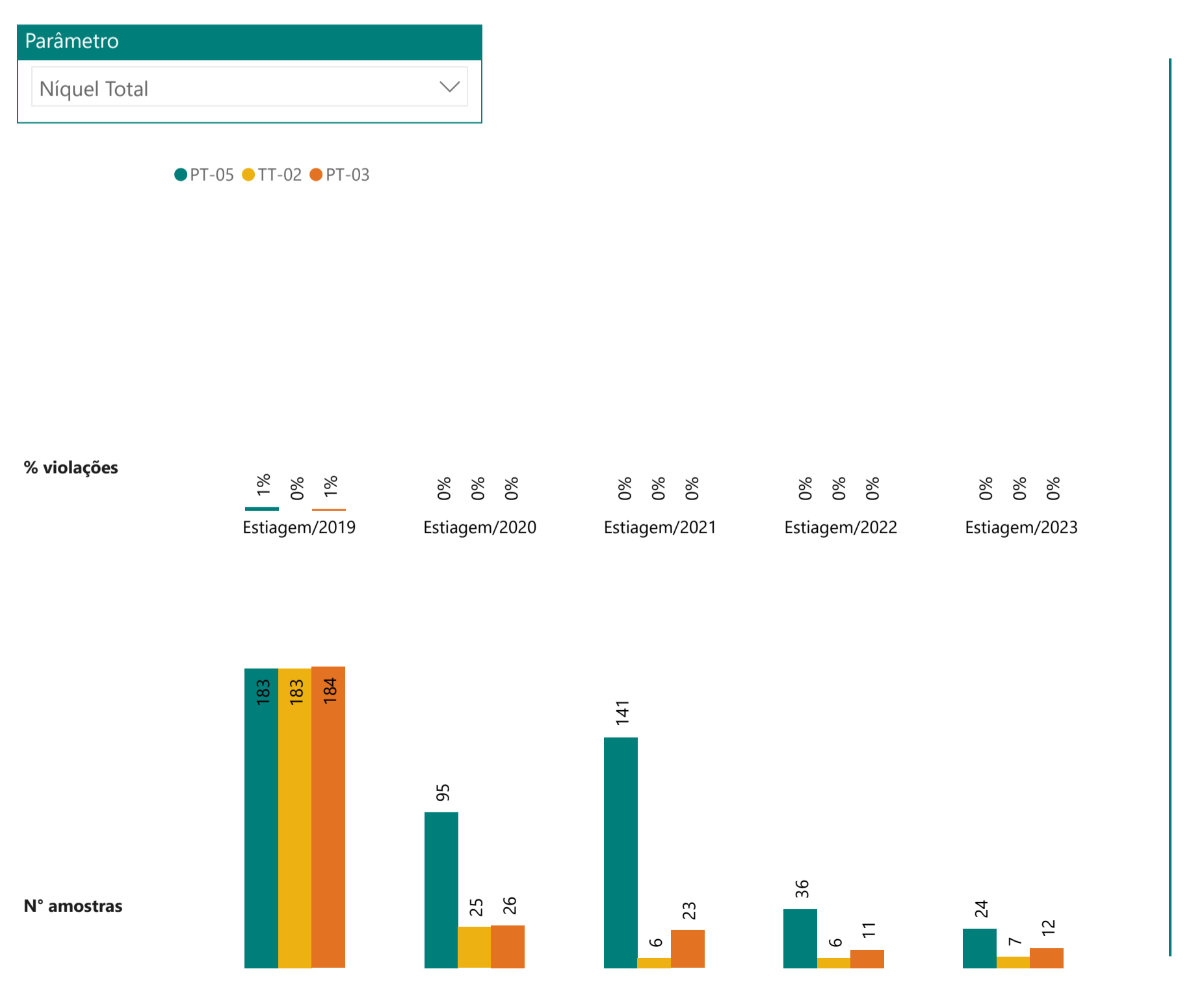
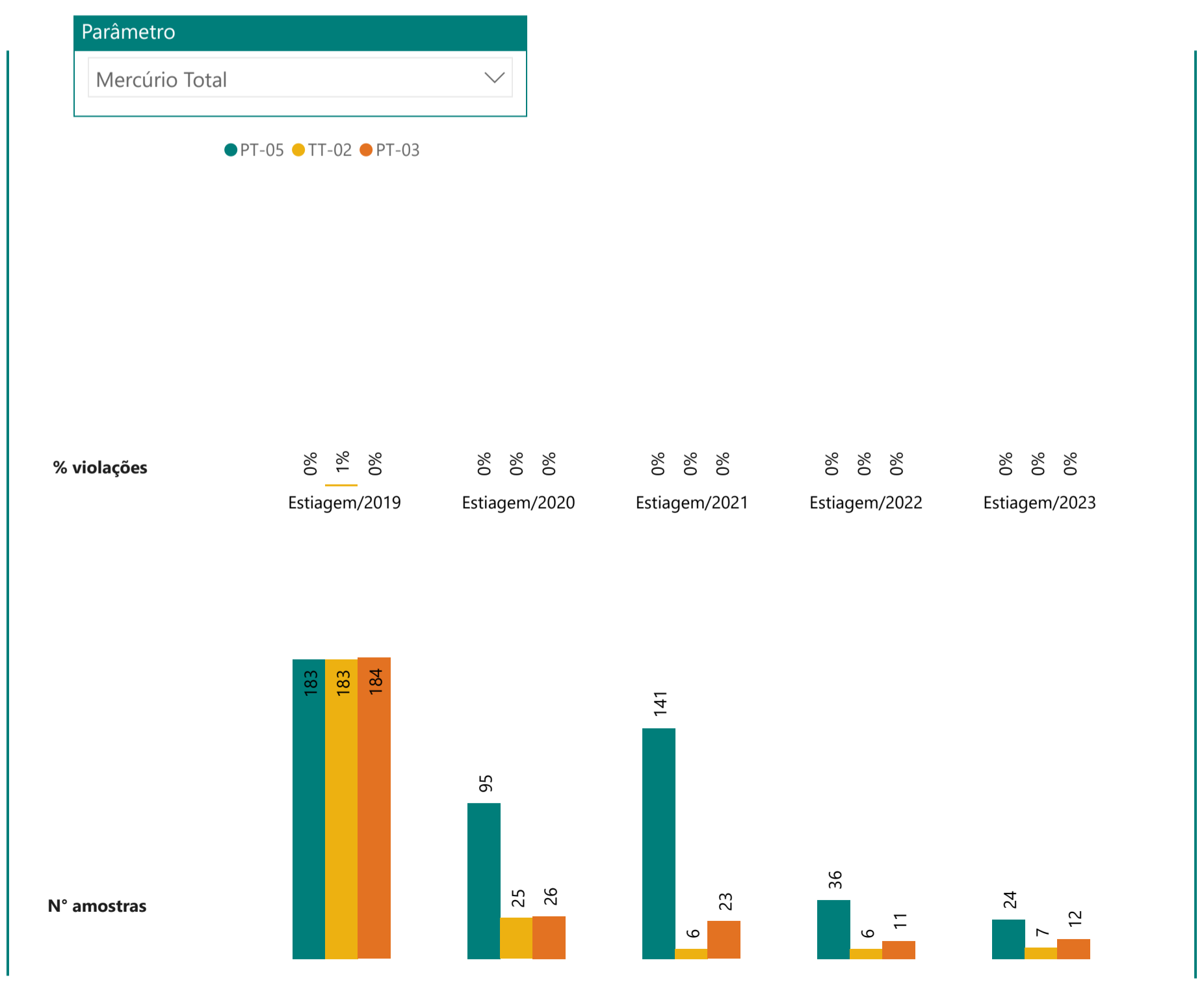
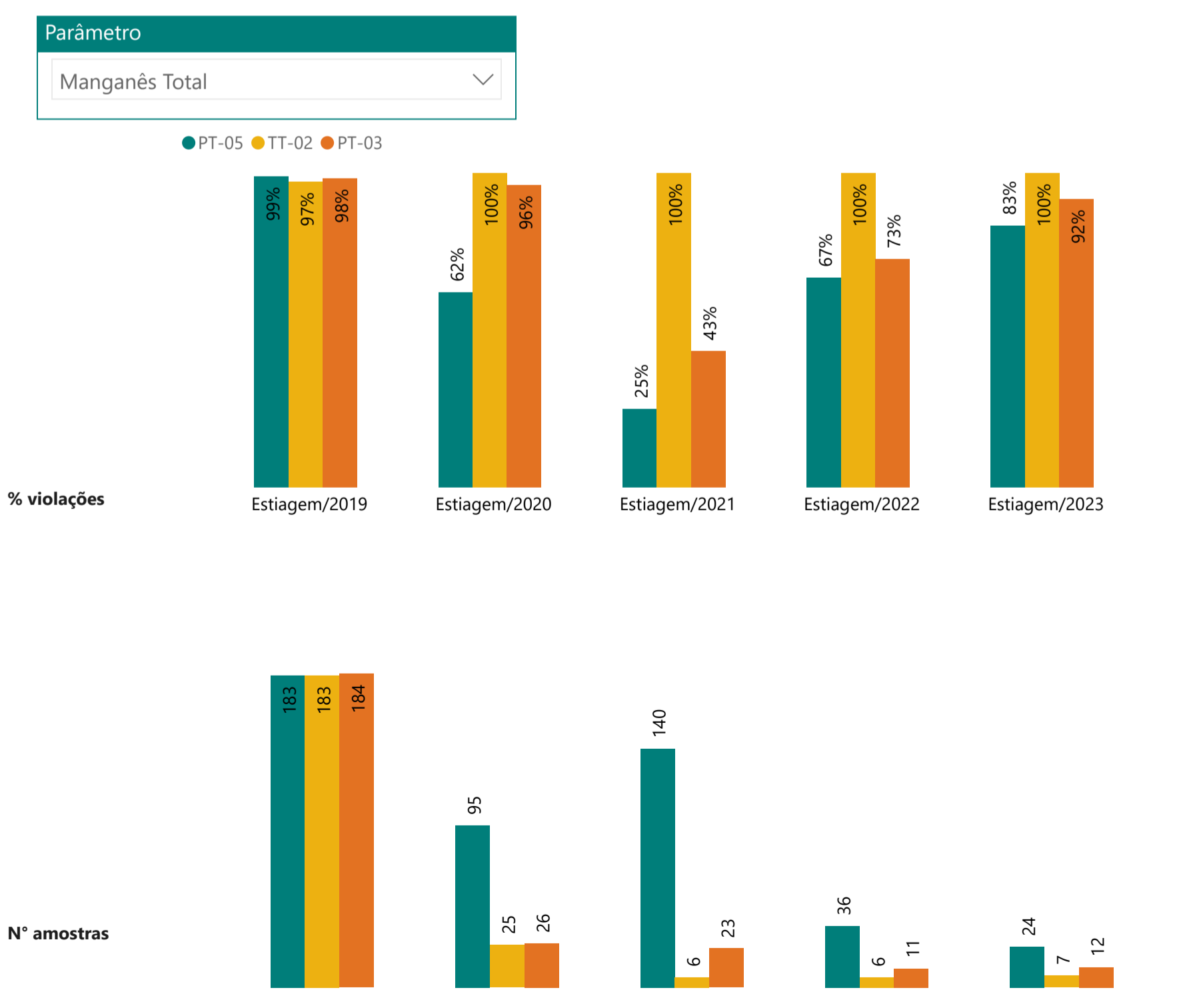
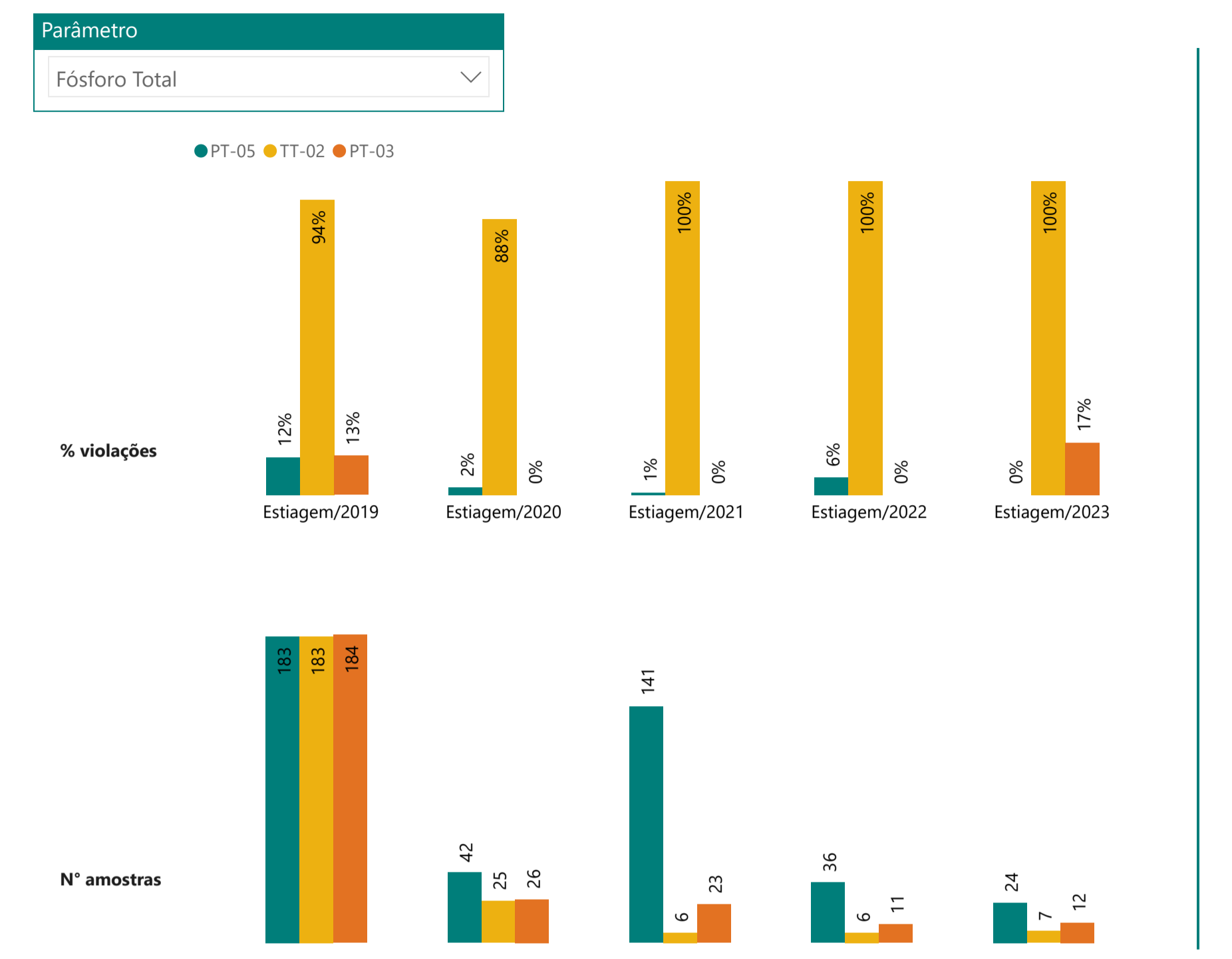
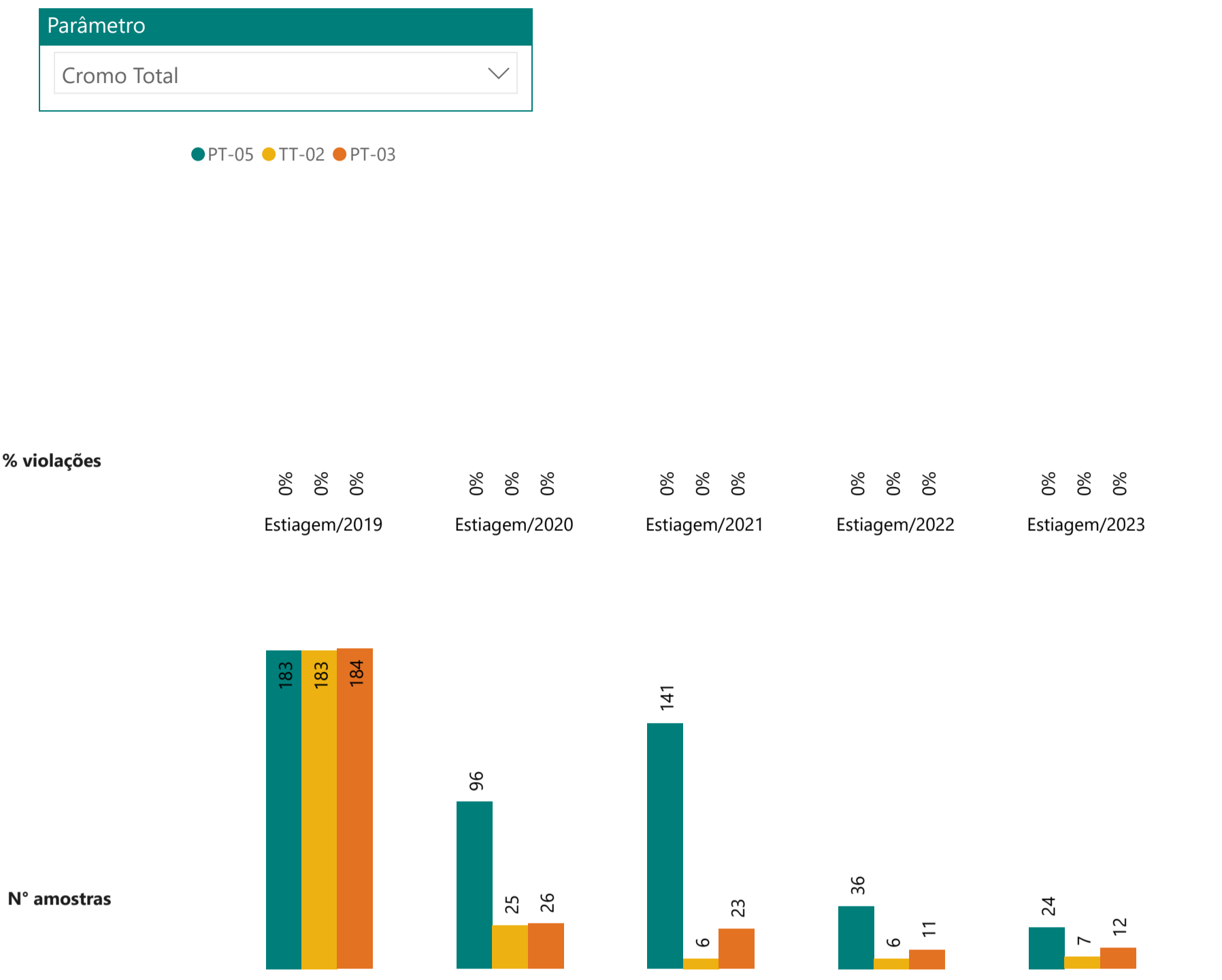
% violações



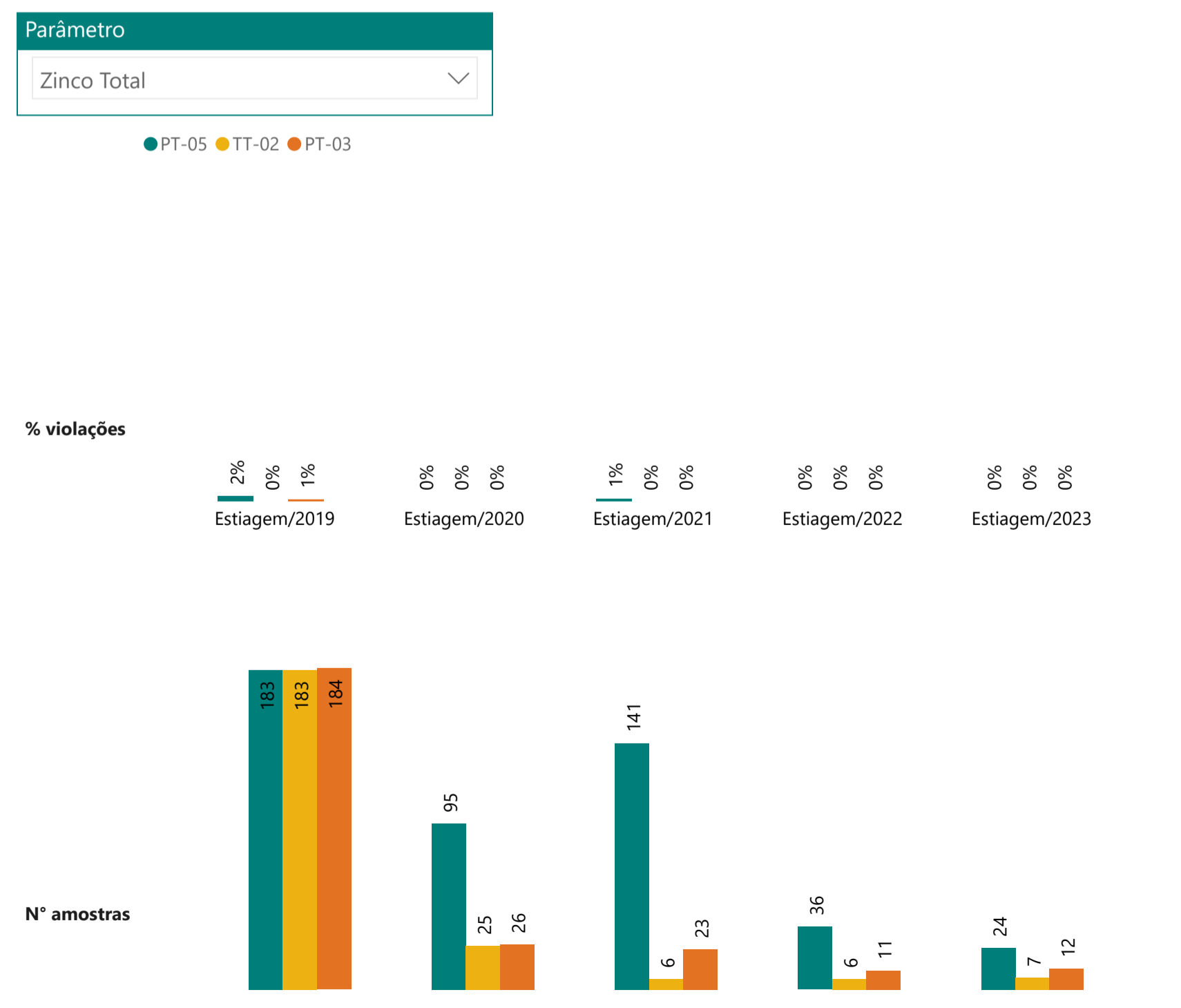
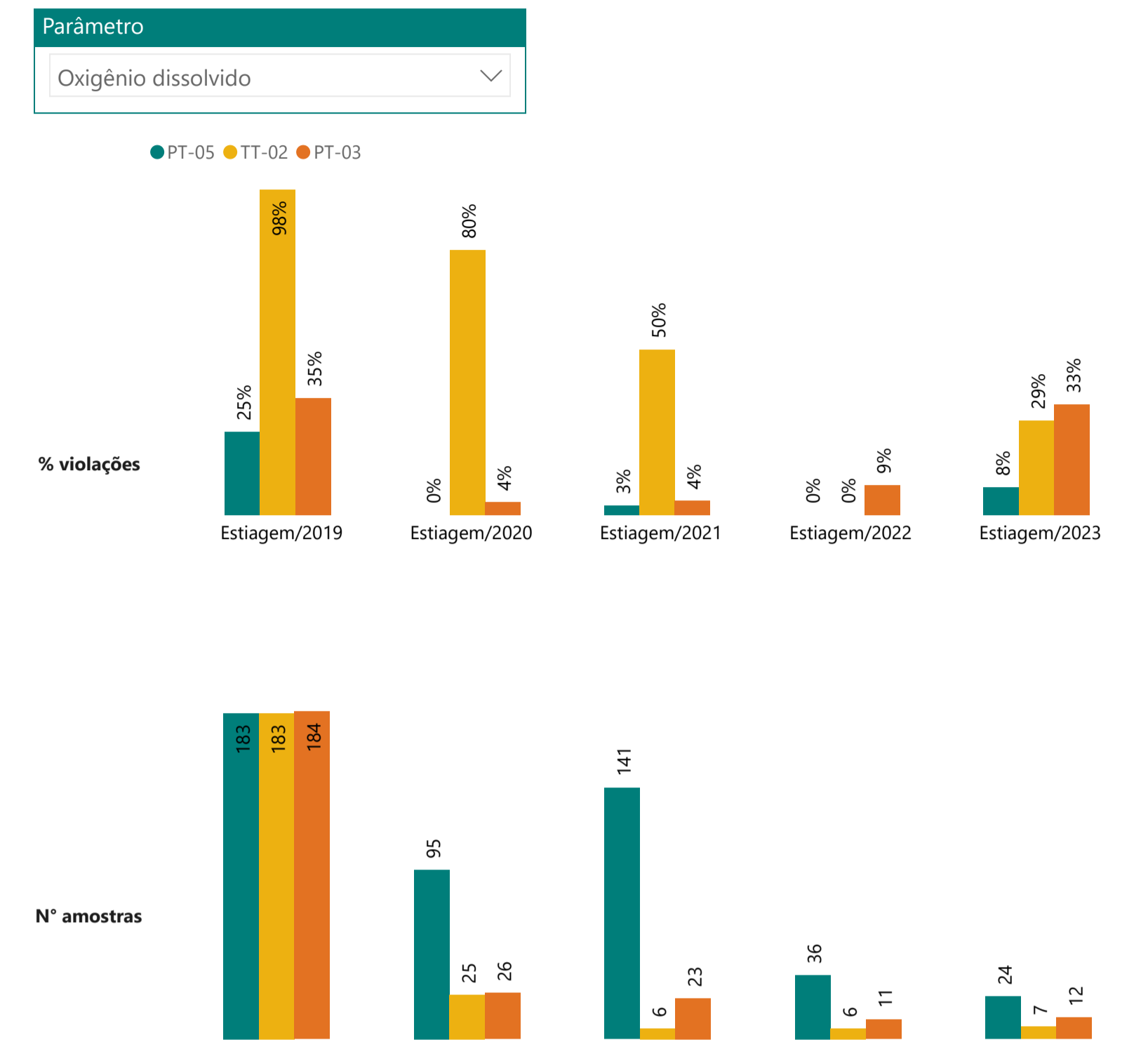
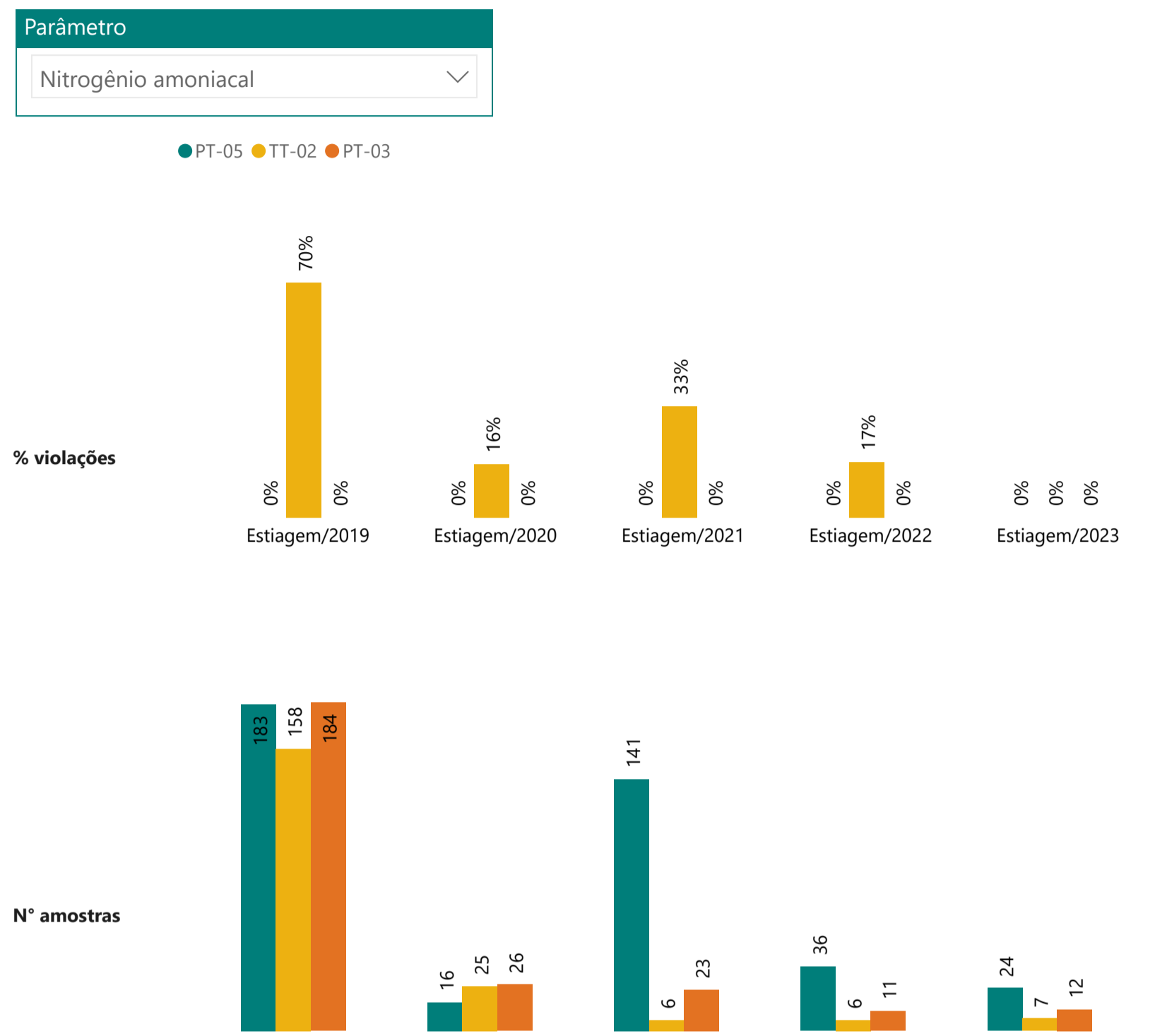
N° amostras





% Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante



% Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 189 / 399

No **Gráfico 9.3.1-2** são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba.

De modo geral, nos períodos de estiagem a variabilidade das concentrações de diversos parâmetros tende a ser menor que nos períodos de chuva. Isso porque a energia hidráulica resultante dos períodos de seca é menor do que no período de chuvas e a consequente redução das vazões e do escoamento superficial fazem com que não haja demasiada ressuspensão e arraste dos materiais acomodados no leito do rio, fazendo com que a concentração dos materiais não varie de forma significativa durante esse período sazonal.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do IGAM (BP068), observou-se que os teores medianos para os pontos de montante e jusante foram, em geral, próximos ou superiores ao *baseline*. Para grande parte dos parâmetros analisados os teores medianos do ponto de jusante (PT-03) permanecem próximos ao indicado para o ponto de montante da confluência (PT-05). Já o ponto TT-02, apresentou comportamento distinto, com concentrações mais elevadas de Fósforo total, DBO e *E. coli* se comparado aos pontos PT-05, PT-03 e *baseline*, representando, uma possível fonte de contribuição para a elevação da concentração destes parâmetros no rio Paraopeba, destacando-se os parâmetros de cunho sanitário. Para Oxigênio dissolvido, os resultados no TT-02 apresentaram-se, de modo geral, mais baixos, refletindo pior condição da qualidade das águas em termos de oxigenação.

Para Alumínio dissolvido, ao longo dos períodos de estiagem monitorados, as concentrações foram pouco variáveis no tributário ribeirão Sarzedo durante os primeiros ciclos chuvosos (2019, 2020 e 2021), com maior incremento no período de estiagem/2022 e manutenção no período de referência (estiagem/2023). Ademais, nota-se que no TT-02 os resultados deste analito foram, de modo geral, inferiores aos observados nos pontos PT-03 e PT-05, indicando maiores concentrações desse metal no rio Paraopeba. Entretanto, no tributário ainda são observados valores pontuais acima do VMP (0,1 mg/L) ao longo de todo o período monitorado.

Para Manganês total, notou-se que os teores medianos no tributário foram similares ao longo dos períodos de estiagem de 2020 a 2023. A estiagem/2019 apresenta a maior oscilação das concentrações tanto para o TT-02 quanto para os pontos PT-05 e PT-03. Ressalta-se que a maioria dos resultados dos três pontos, incluindo o *baseline* (BP068), ficaram acima do VMP (0,1 mg/L). Além disso, nota-se que as medianas no TT-02 tenham ficado superiores àquelas observadas no PT-03, PT-05 e BP068. Já nos pontos do rio Paraopeba, é possível observar comportamento semelhante entre eles com decréscimo das concentrações de Mn total de 2019 até 2021 e posterior elevação gradual dos teores até 2023. Nesses pontos, a maior parte dos resultados apresentam medianas similares ou acima do *baseline* além de ultrapassarem o VMP.

Já para Ferro dissolvido, os resultados medianos apresentaram-se mais próximos entre os pontos de montante, tributário e jusante, bem como entre os diferentes períodos de estiagem comparados. Nota-se que a maior variação nos pontos do rio Paraopeba e, em menor escala, no

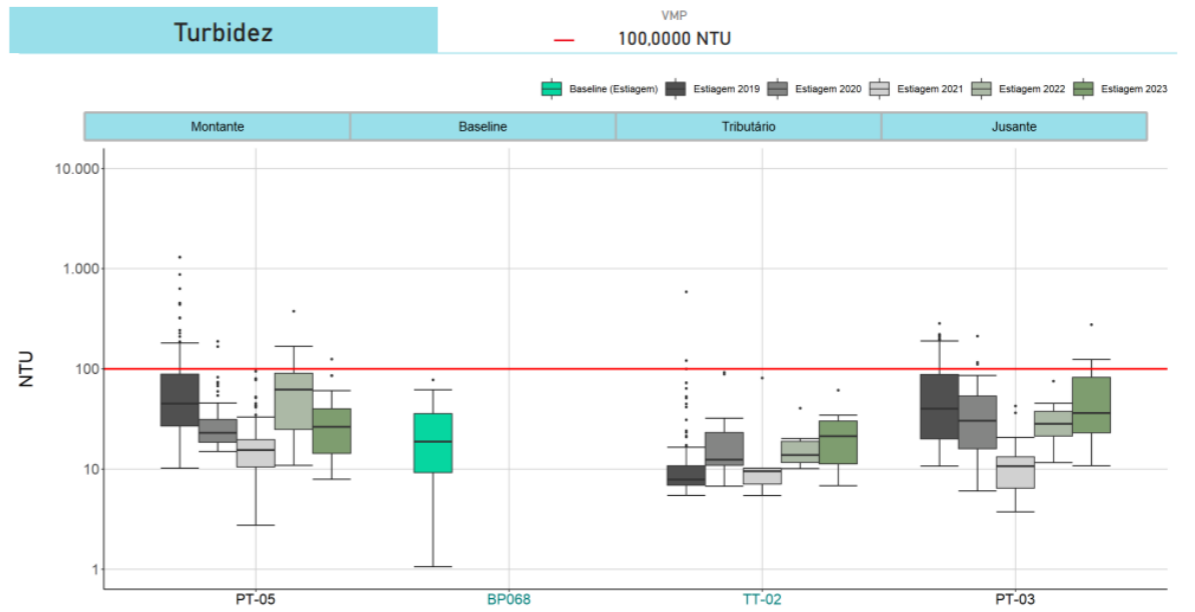
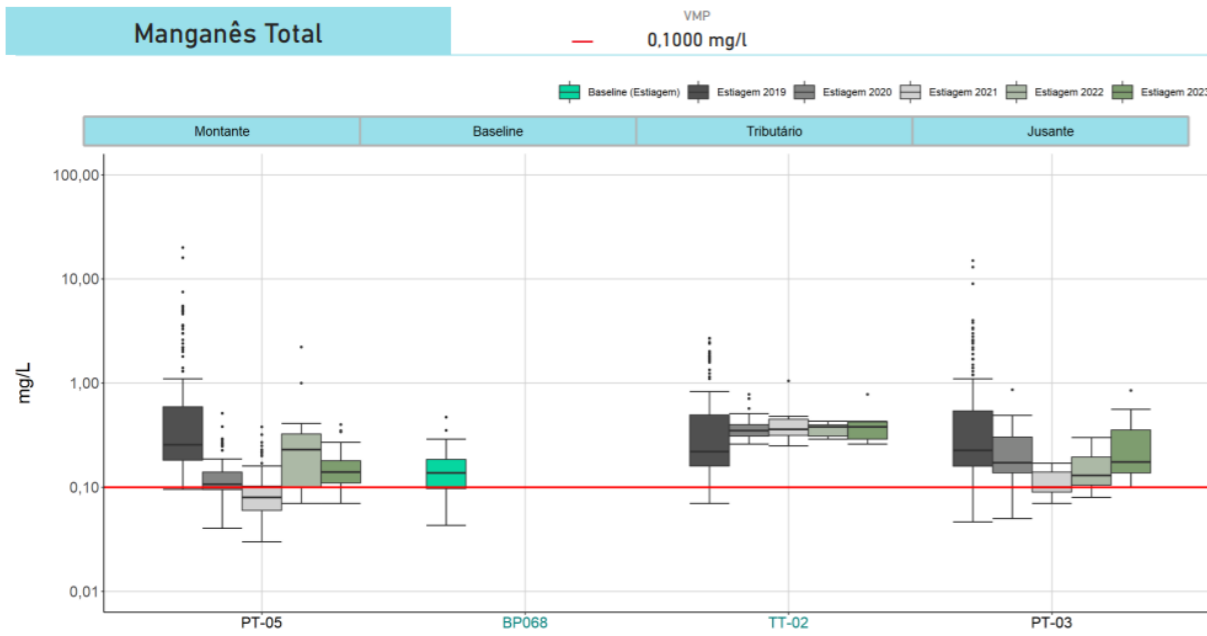
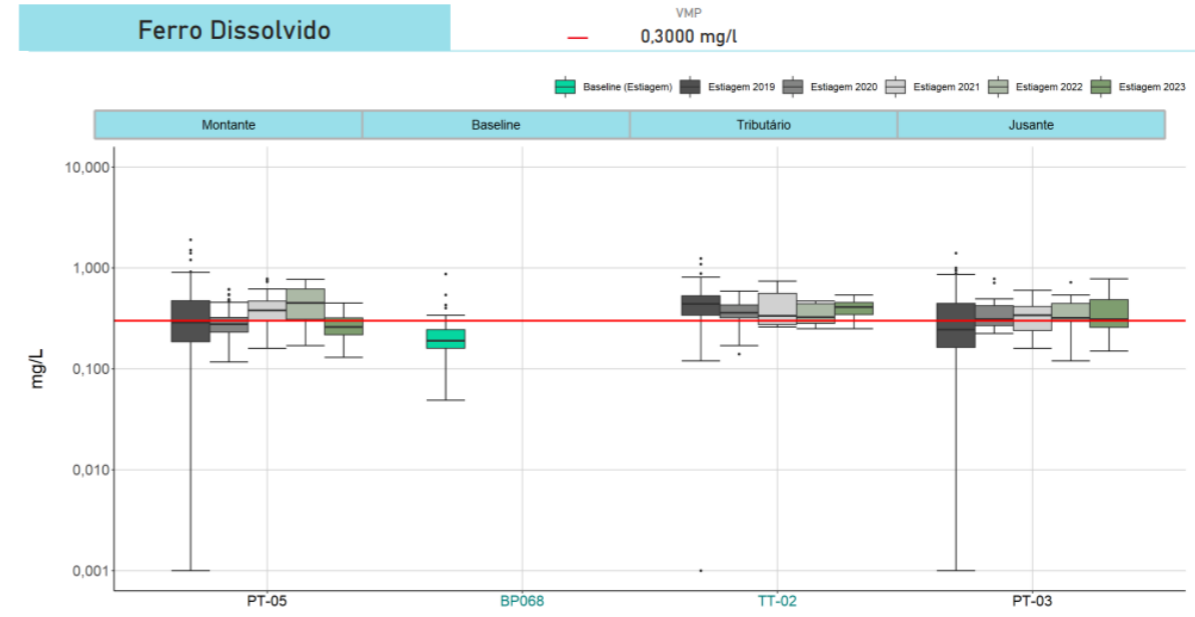
ribeirão Sarzedo, foi na estiagem/2019. Em todos os pontos, a maior parte dos resultados foram superiores ao VMP (0,3 mg/L) e ao *baseline* de estiagem, principalmente analisando a variação das medianas.

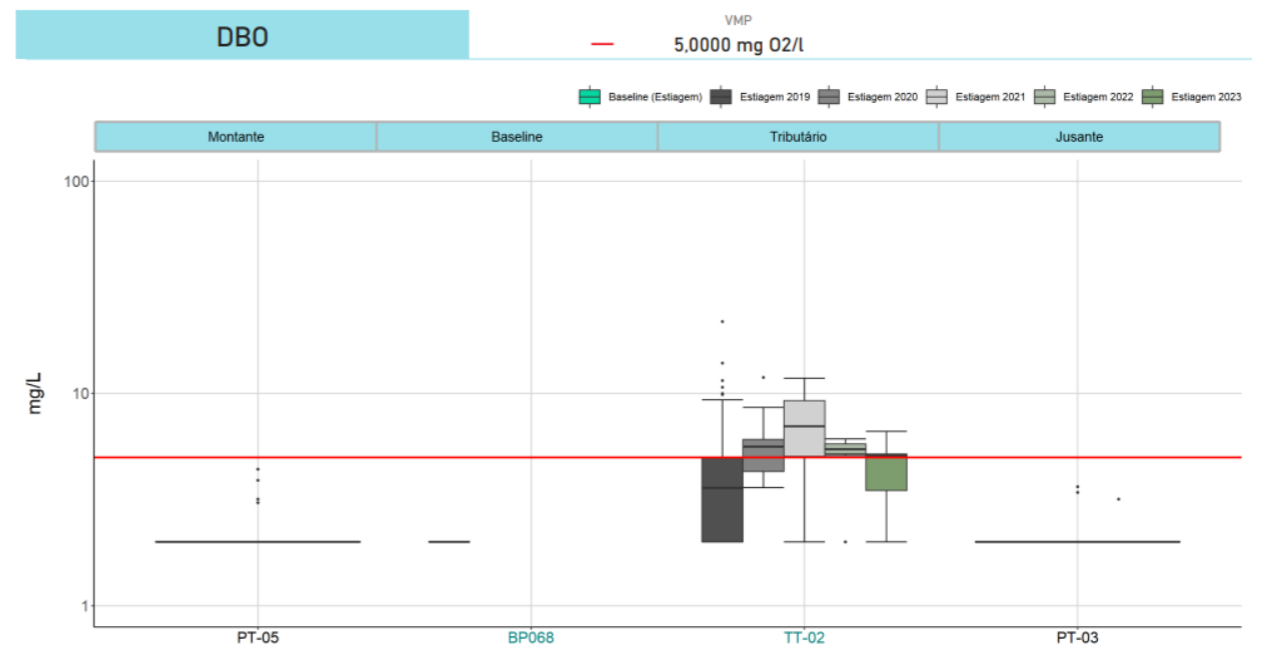
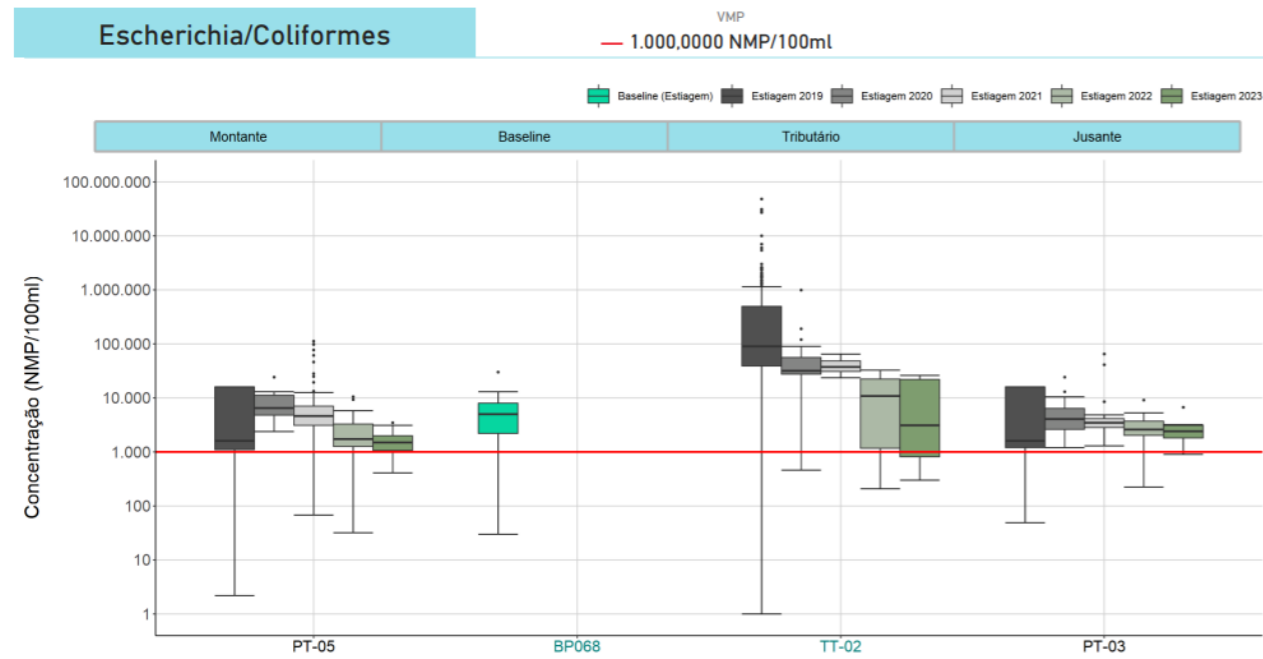
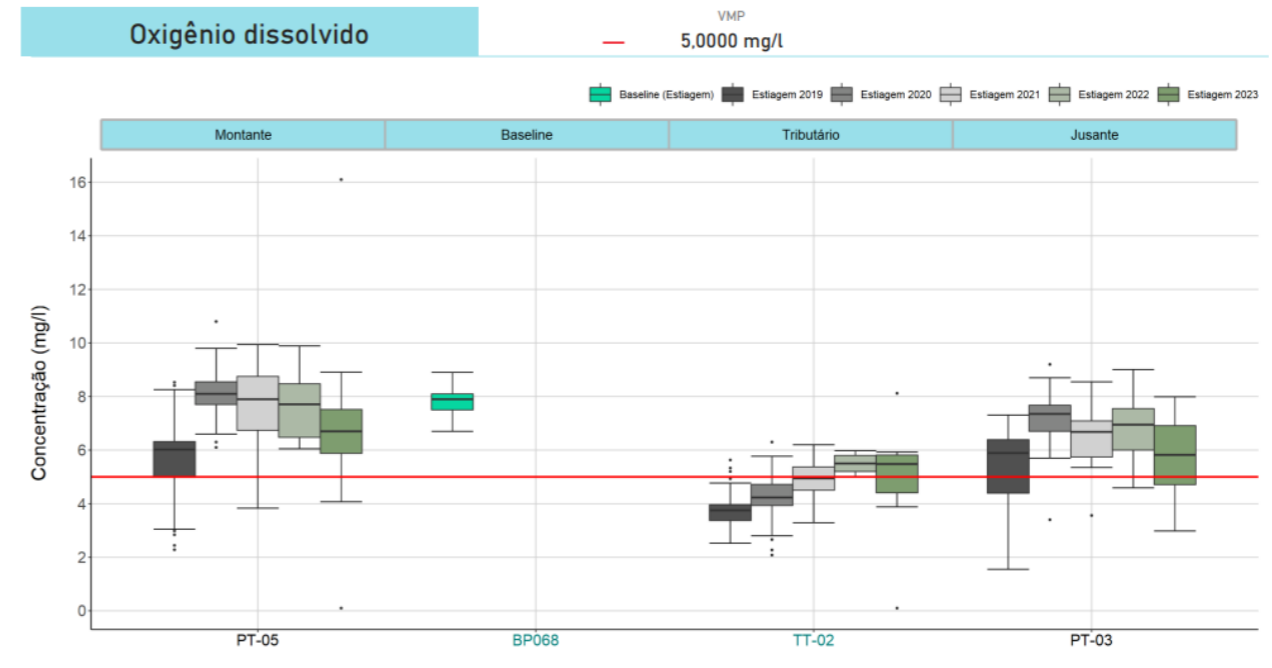
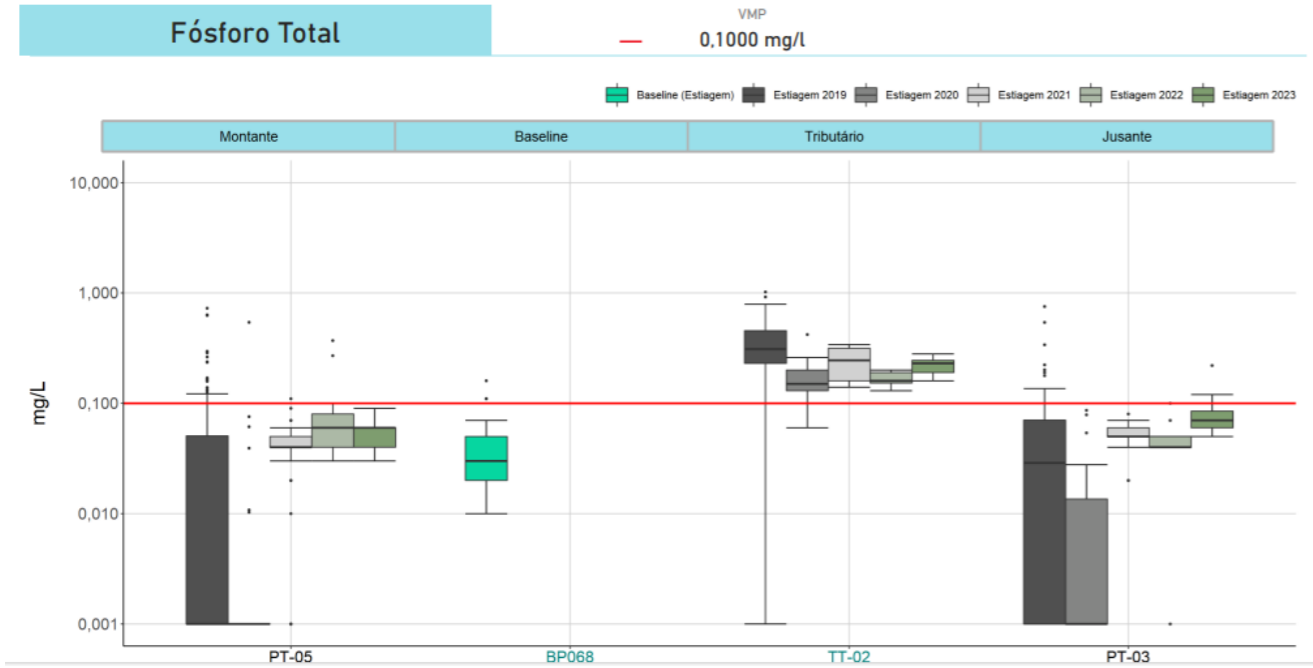
Para Turbidez, no TT-02, os valores oscilaram entre os diferentes períodos, mas permaneceram, em geral, inferiores aos registrados nos pontos de montante e jusante, bem como na condição do *baseline* de estiagem. Além disso, com exceção de alguns valores, a Turbidez registrada no tributário durante os cinco períodos de estiagem analisados, foram abaixo do VMP de 100 NTU. Nos pontos localizados no rio Paraopeba, os valores tiveram comportamento semelhante ao Manganês total, com decréscimo das medianas, principalmente nos primeiros ciclos sazonais (2019, 2020 e 2021) e aumentando gradualmente a partir de então até 2023.

Para Fósforo total, destaca-se medianas mais elevadas no tributário em todos os períodos se comparadas àquelas registradas nos pontos de montante e jusante da confluência. Além disso, as concentrações de Fósforo total no TT-02 estão acima do VMP de 0,1 mg/L e do valor de *baseline* para a estiagem. Tal condição denota a importância das contribuições difusas e pontuais, como o lançamento de efluentes domésticos, para o incremento deste parâmetro nos cursos d'água da região. Comportamento oposto é observado nos pontos localizados no rio Paraopeba, em que as concentrações de Fósforo total tendem a se concentrar abaixo do VMP e ligeiramente maiores que o *baseline*.

Os pontos do rio Paraopeba apresentam similaridades nos comportamentos dos parâmetros sanitários *E. coli*/Coliformes Termotolerantes e Oxigênio dissolvido. Nesses pontos, ao longo dos períodos analisados, as concentrações são maiores que o VMP e com a mesma ordem de grandeza do *baseline* sazonal, o qual também está acima do valor máximo permitido para ambos os parâmetros. Já no ribeirão Sarzedo, ao longo dos períodos de estiagem as concentrações de *E. coli*/Coliformes Termotolerantes tendem a diminuir e se aproximar do *baseline*, enquanto o Oxigênio dissolvido tende a aumentar, porém ainda estando abaixo do *baseline* e ultrapassando o VMP. Já o parâmetro DBO, não há muita variação para os pontos a montante e jusante, bem como para o *baseline*, entretanto, o TT-02 apresenta concentrações elevadas que ultrapassam o VMP na maioria dos períodos de estiagem apresentados.

Gráfico 9.3.1-2 Boxplots para os parâmetros referentes ao ribeirão Sarzedo (TT-02).





Na **Tabela 9.3.1-1** podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para comparação dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, DBO, *E. coli*/Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e sólidos suspensos totais entre os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) da confluência nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Tabela 9.3.1-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo



PT-05 (Mont.) X PT-03 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022	Est. 2023
Manganês Total	0,246	0,000	0,000	0,246	0,051
Ferro Dissolvido	0,263	0,017	0,117	0,202	0,118
Alumínio Dissolvido	0,669	0,036	0,001	0,020	0,051
Turbidez	0,095	0,227	0,002	0,037	0,144
Fósforo Total	0,005	0,118	0,000	0,179	0,004
DBO	1,000	1,000	0,175	0,083	1,000
EColi / ColiTermot.	0,626	0,060	0,072	0,176	0,027
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,000	0,001	0,013
Oxigênio Dissolvido	0,204	0,000	0,000	0,092	0,104
Sólidos Suspensos T.	0,023	0,015	0,939	0,015	0,920

Nota: valores destacados em laranja indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05).

De modo geral, nota-se que, dentre os ciclos de estiagem analisados, o período em que foram notadas diferenças significativas com maior frequência foi o de 2020 e 2021, principalmente levando em consideração os parâmetros majoritários e de cunho sanitário. Apenas Fósforo total, *E. coli* e Nitrogênio amoniacal tiveram diferenças significativas no ciclo mais recente (estiagem/2023) e indicam maior possibilidade de interferência do tributário ribeirão Sarzedo na qualidade do rio Paraopeba.

Em termos de parâmetros majoritários, Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido e Turbidez obtiveram diferenças significativas apenas em dois períodos de estiagem distintos, estiagem/2020 (para os metais) e estiagem/2021 (para Manganês total e Turbidez), respectivamente.

Em geral, os parâmetros relacionados à matéria orgânica têm maior implicação para a região do ribeirão Sarzedo, com destaque para Nitrogênio amoniacal que apresentou diferenças significativas nos pontos durante todos os períodos de estiagem. Por fim, os resultados do teste para Turbidez mostram que não há evidências suficientes para concluir que a diferença entre as medianas dos pontos de montante e jusante é estatisticamente significativa, logo, não se pode inferir que o tributário influencia na qualidade do rio Paraopeba, levando em consideração apenas a presença de matéria em suspensão na água.

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO			
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1003 188 1391 241"> CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 </td> <td data-bbox="1393 188 1520 241" rowspan="2" style="text-align: center;"> Folha 194 / 399 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="1003 241 1391 291"> CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1 </td> </tr> </table>	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 194 / 399	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 194 / 399			
CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1				

9.3.2. Rio Betim (TT-01)

O tributário rio Betim é monitorado por meio do ponto TT-01 (Classe 3) localizado na Região 1B e as análises dos pontos de montante e jusante no rio Paraopeba foram realizadas através dos pontos PT-14 e PT-48, respectivamente. A bacia do rio Betim corta o município homônimo e parte dos municípios de Contagem e Esmeraldas, apresentando marcante caráter urbano (lançamento de efluentes sanitários e industriais) que, em determinadas condições, tem potencial de refletir diretamente na qualidade da água do rio Paraopeba.

No **Gráfico 9.3.2-1**, podem ser observados os percentuais de violação dos parâmetros analisados para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-01 e para os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) localizados no rio Paraopeba.

Para o período mais recente, estiagem/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve desvio apenas para Alumínio dissolvido, DBO, Fósforo total, Nitrogênio amoniacal, Oxigênio dissolvido, pH, Sólidos suspensos totais e Turbidez. Dentre os parâmetros supracitados, verifica-se que as violações foram mais expressivas no rio Betim em relação aos pontos de montante e jusante apenas para DBO (montante: 0%, tributário: 30%, jusante: 0%), Fósforo total (montante: 4%, tributário: 100%, jusante: 54%), Nitrogênio amoniacal (montante: 0%, tributário: 50%, jusante: 0%), Oxigênio dissolvido (montante: 0%, tributário: 50%, jusante: 15%), Sólidos suspensos totais (montante: 0%, tributário: 17%, jusante: 0%) e Turbidez (montante: 4%, tributário: 30%, jusante: 0%). Nesse contexto, desde a estiagem/2019, tal comportamento é verificado para o Fósforo total Nitrogênio amoniacal, podendo estar associado aos eventuais lançamentos de efluentes e ao uso do solo na área de drenagem do rio Betim, bacia localizada em região intensamente ocupada por mancha urbana.

Ademais, apenas os parâmetros Alumínio dissolvido, Escherichia/Coliformes, Ferro dissolvido e Manganês total tiveram desvios percentuais maiores nos pontos de montante e jusante em comparação com o tributário, sendo que a jusante as violações tendem a ser ligeiramente superiores que a montante, podendo ter influência do tributário na qualidade da água do rio Paraopeba. No caso do Fósforo total, é notável a contribuição do rio Betim para o rio Paraopeba, visto que o ponto a jusante (PT-48) as concentrações desse parâmetro são bem mais elevadas que a montante (PT-14) ao longo dos períodos de estiagem analisados.

No que tange à evolução temporal, verifica-se que os percentuais de desvios no TT-01 durante o período de estiagem/2023 foram superiores ou iguais em relação à estiagem/2022 para DBO, Fósforo total, Oxigênio dissolvido, pH e Turbidez.

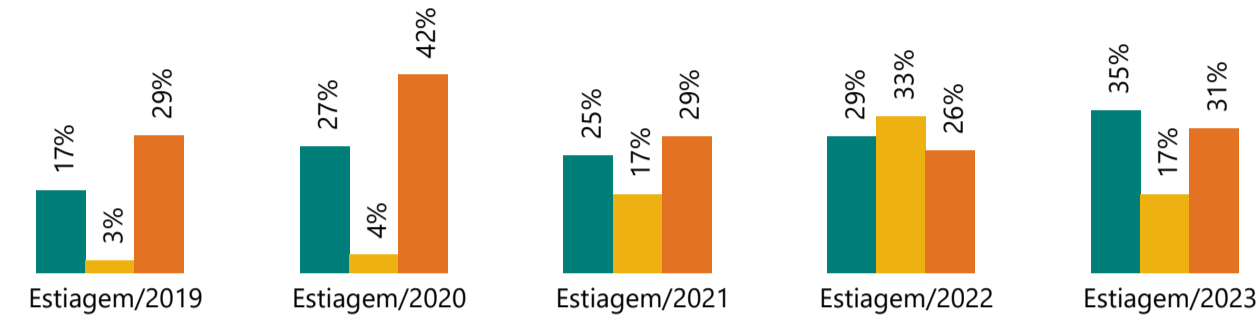
Gráfico 9.3.2-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no TT-01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

% Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante

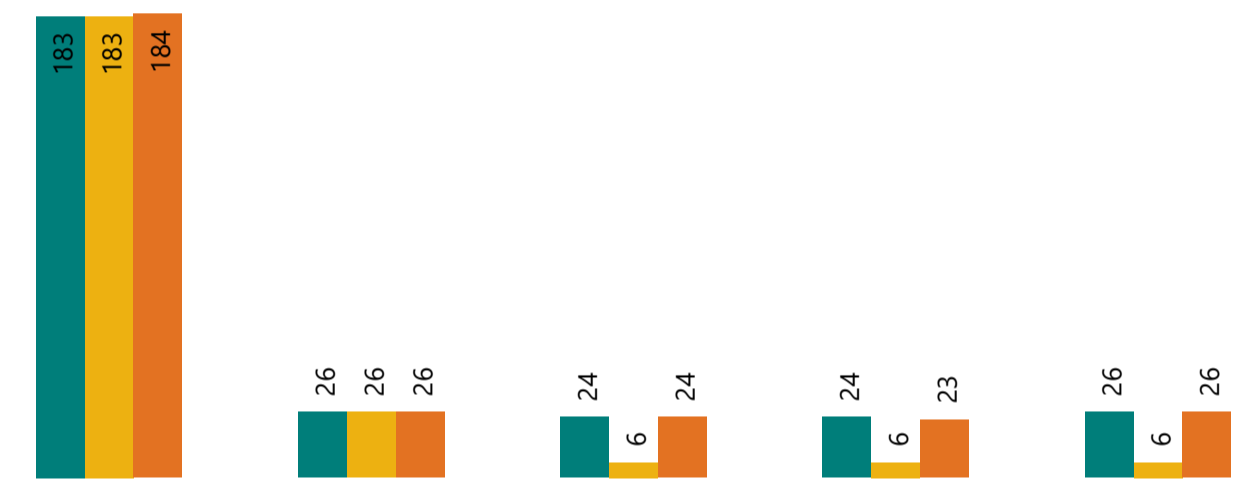
Parâmetro
Alumínio Dissolvido

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

% violações



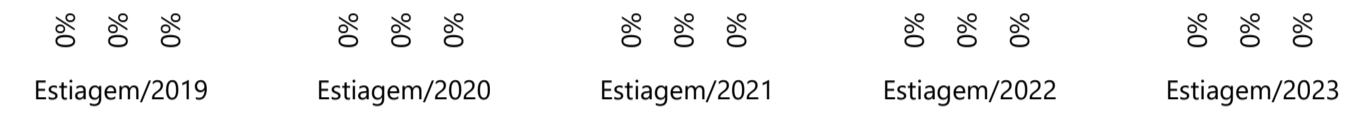
N° amostras



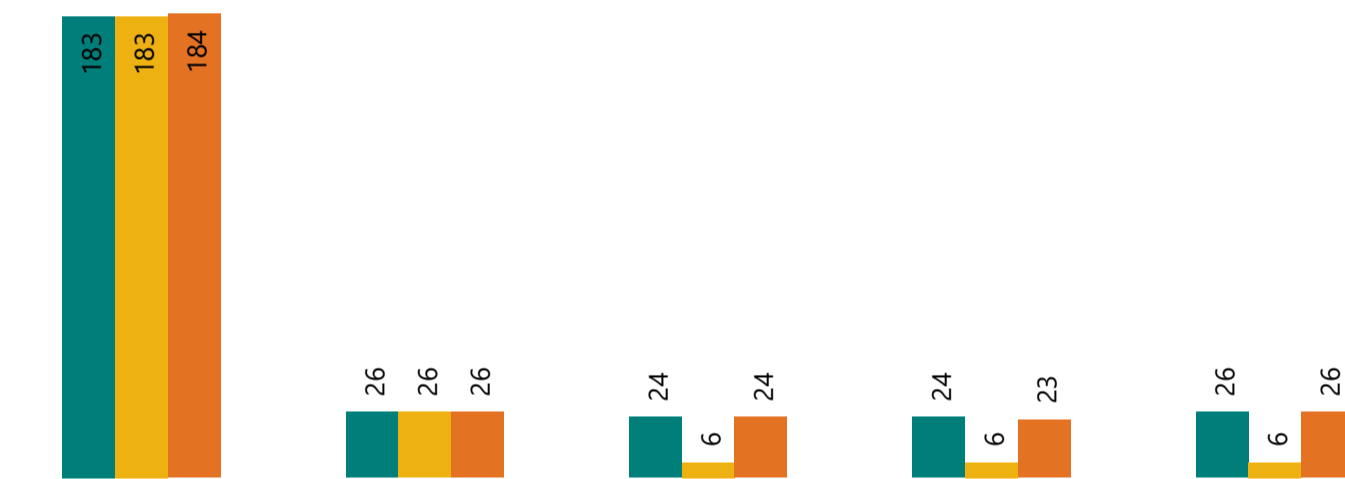
Parâmetro
Arsênio Total

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

% violações



N° amostras



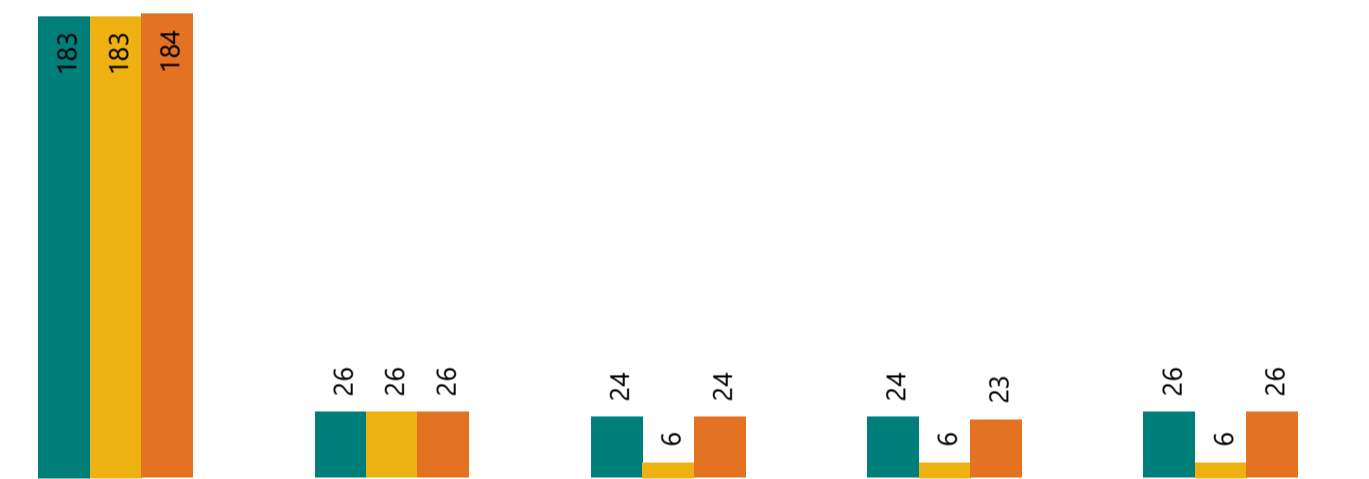
Parâmetro
Cádmio Total

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

% violações



N° amostras



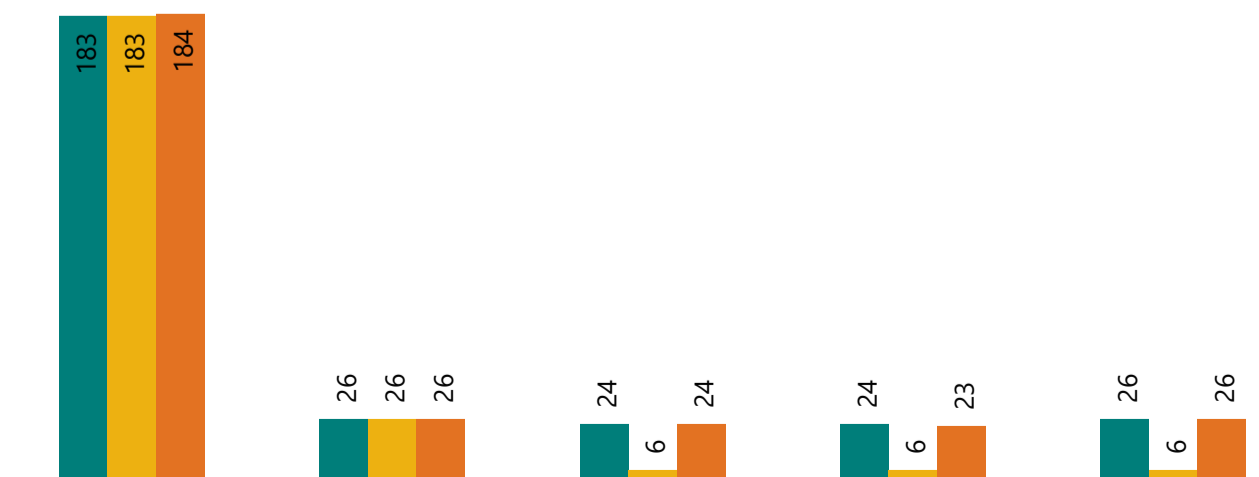
Parâmetro
Chumbo Total

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

% violações



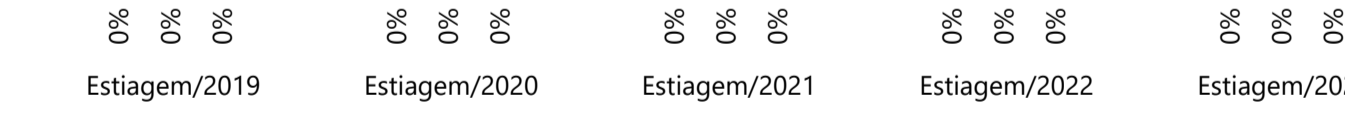
N° amostras



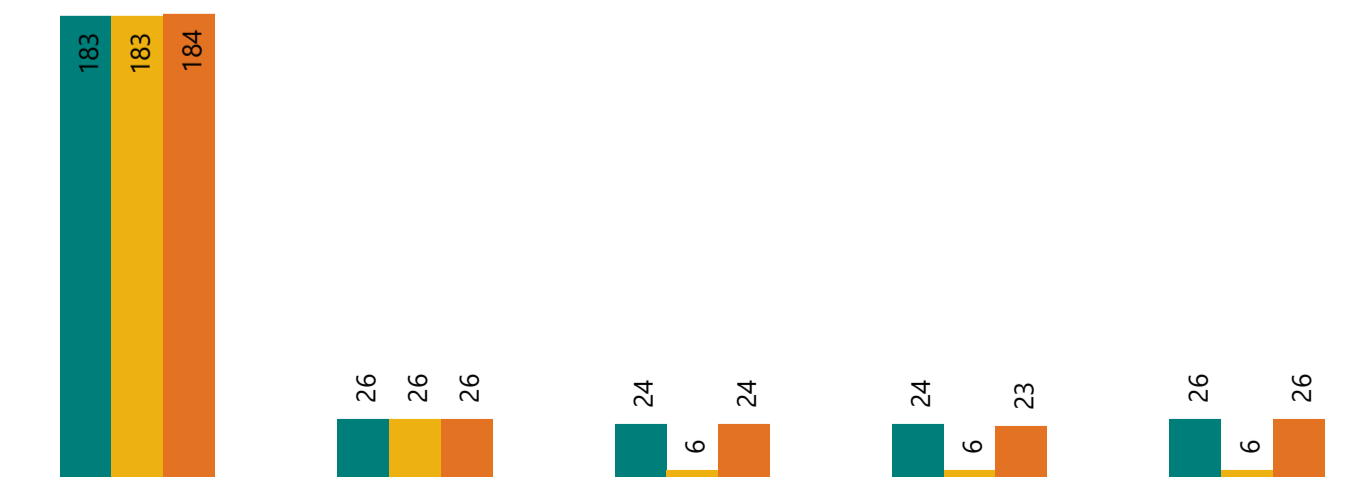
Parâmetro
Cobalto Total

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

% violações



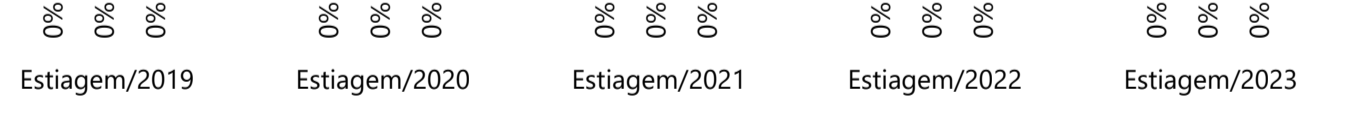
N° amostras



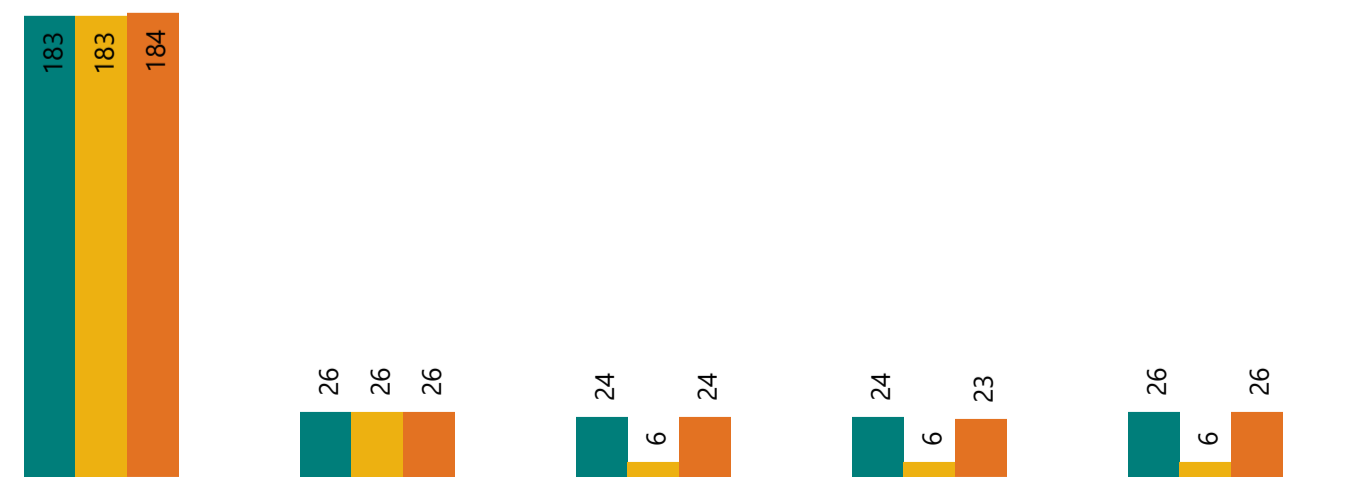
Parâmetro
Cobre Dissolvido

● PT-14 ● TT-01 ● PT-48

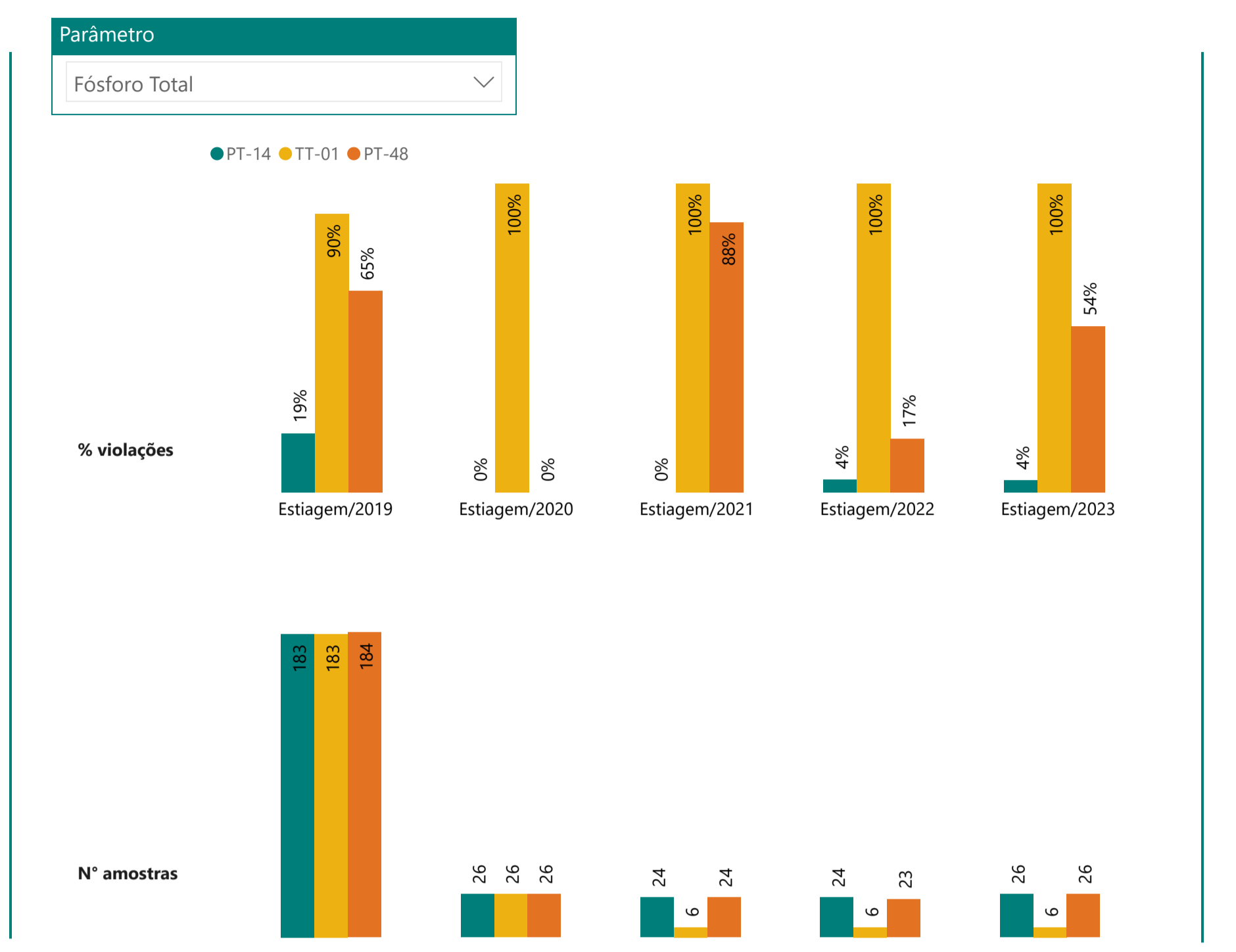
% violações



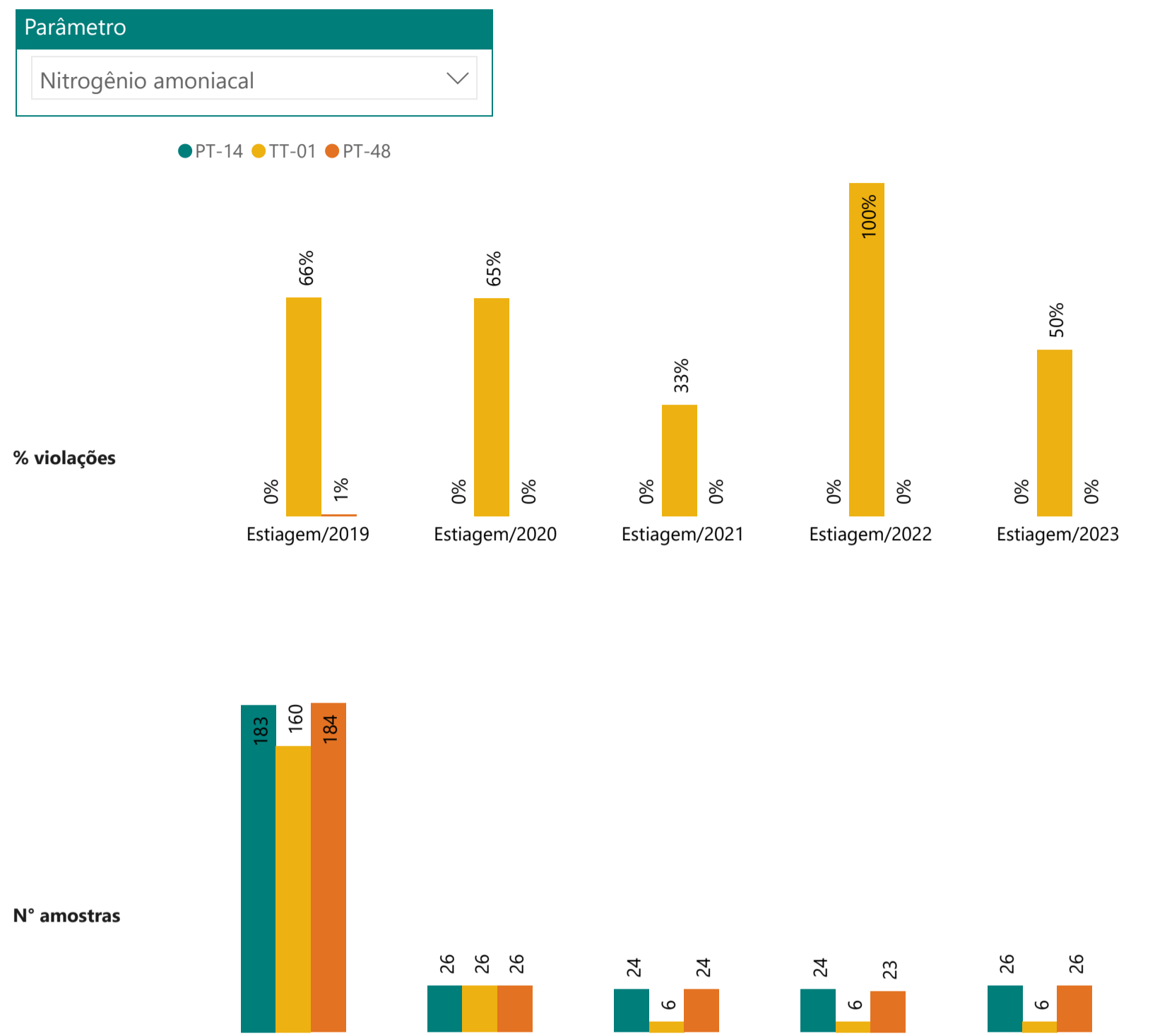
N° amostras





% Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante



% Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 198 / 399



No **Gráfico 9.3.2-2** são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*/Coliformes, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-01 e para os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) localizados no rio Paraopeba.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do IGAM (BP070), observou-se que os teores medianos no tributário foram, em geral, próximos ou superiores à condição do *baseline* sazonal. Alumínio dissolvido e Oxigênio dissolvido são os únicos parâmetros que se encontram abaixo do *baseline*. Os pontos localizados no rio Paraopeba também apresentaram relativa proximidade com os resultados do *baseline* de estiagem. Além disso, para grande parte dos parâmetros analisados, os teores medianos do ponto de jusante (PT-14) permanecem próximos ao indicado para o ponto de montante da confluência (PT-48). O ponto TT-01, semelhante ao TT-02, apresentou concentrações mais elevadas de Fósforo total, DBO e *E. coli* se comparado aos pontos PT-14 e PT-48, representando, uma possível fonte de contribuição para a elevação da concentração destes parâmetros no rio Paraopeba, destacando-se os parâmetros de cunho sanitário. Para Oxigênio dissolvido, os resultados no TT-01 apresentaram-se mais baixos, refletindo pior condição da qualidade das águas em termos de oxigenação relacionada à poluição orgânica.

As concentrações de Alumínio dissolvido no rio Betim apontam oscilações ao longo dos períodos de estiagem monitorados, com medianas abaixo do VMP (0,2 mg/L para Classe 3) e menores que o valor de *baseline* sazonal. O TT-01 apresentou as maiores variações da concentração do metal durante o ciclo de estiagem, sobretudo em 2020 e 2022. Já os pontos no rio Paraopeba indicam oscilações menores, exceto o PT-48 que em 2019 teve uma variação significativa. Assim como o tributário, os pontos a montante e jusante apresentam valores medianos abaixo do VMP (0,1 mg/L para Classe 2) e abaixo do *baseline*. Comparativamente, as medianas no tributário permaneceram inferiores àquelas observadas no Paraopeba.

Para Manganês total, os resultados no TT-01 foram muito similares ao longo do período analisado, mantendo-se majoritariamente abaixo do VMP estipulado na legislação para Classe 3 (0,5 mg/L) e do *baseline* sazonal (BP070). Já nos pontos do rio Paraopeba, notou-se, de modo geral, decréscimo das concentrações deste analito entre os ciclos de seca, mas ainda com grande parte dos resultados acima do VMP (0,1 mg/L), incluindo a condição do *baseline* sazonal. Nesses pontos, a mediana aumentou ligeiramente na última estiagem (2023) em comparação a 2022. Desse modo, comparativamente, as concentrações de Manganês total no tributário foram superiores àquelas observadas no rio Paraopeba.

Para Ferro dissolvido, os resultados no TT-01 apresentaram-se mais próximos entre os diferentes ciclos de estiagem, exceto em 2020 que registra a maior variação de todo o histórico, e similares ao valor do *baseline* sazonal. Todos os valores de Ferro dissolvido analisados no rio Betim estão abaixo do VMP (5 mg/L para Classe 3). As concentrações do metal nos pontos do rio Paraopeba também indicam pouca variação entre os períodos sazonais e entre eles. Entretanto, pelo menos 50% dos resultados ficaram acima do VMP (0,3 mg/L para Classe 2) nos pontos PT-14 e PT-48.

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 199 / 399

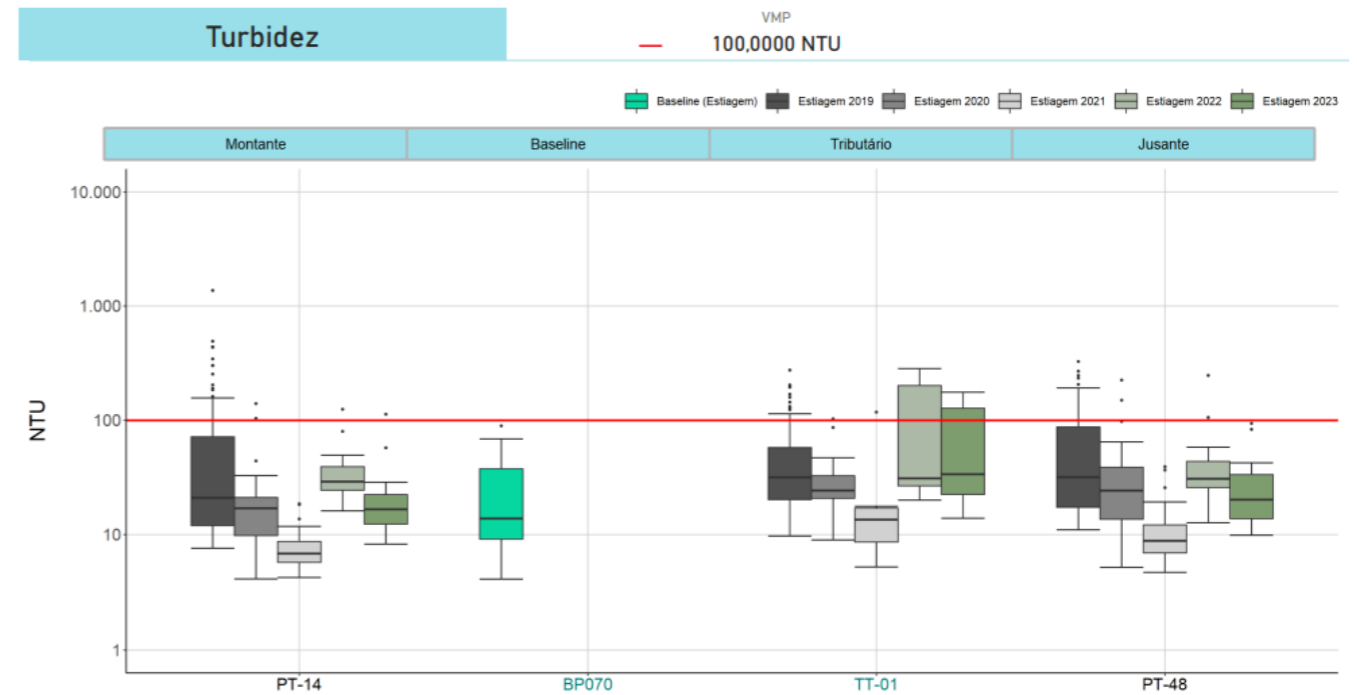
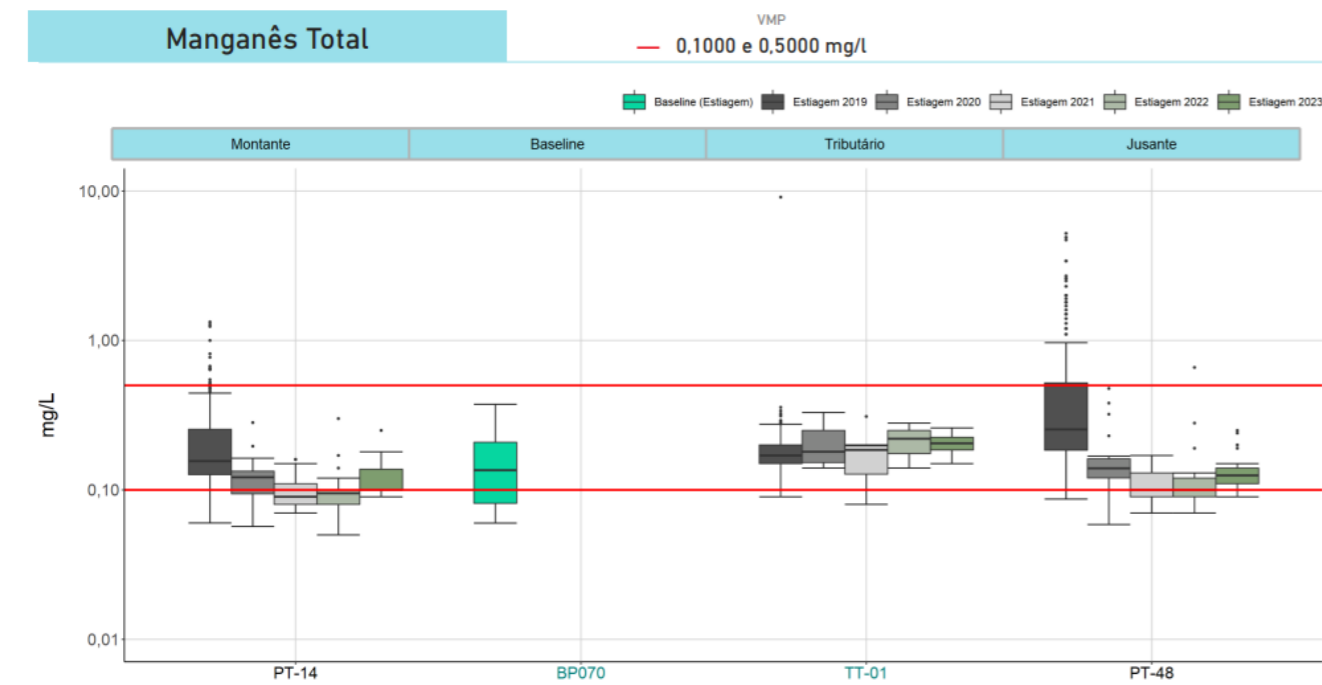
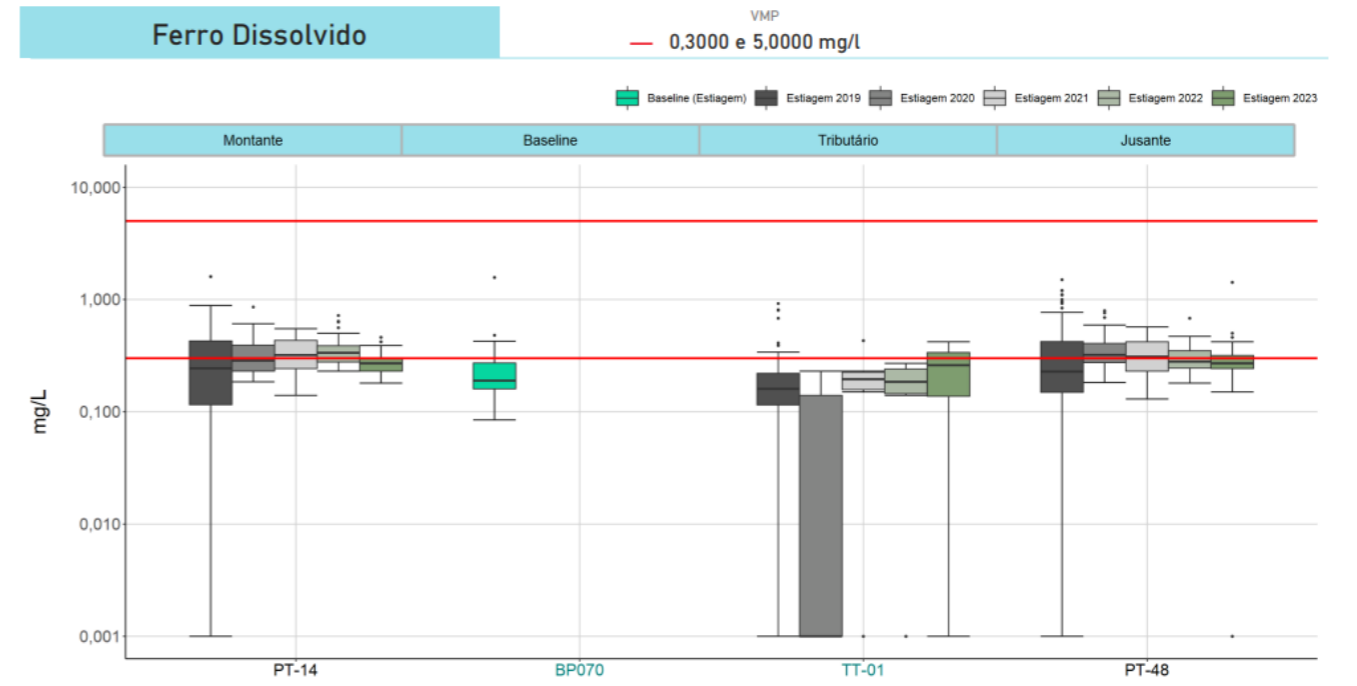
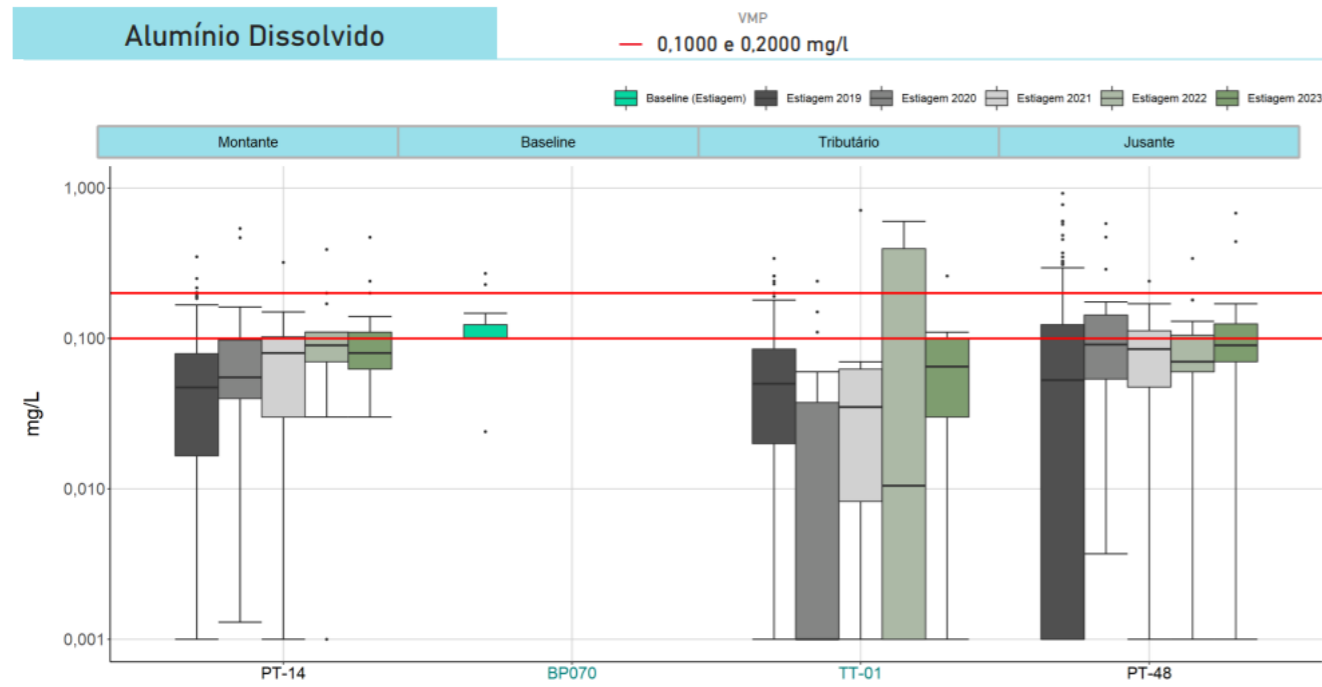
Nestes pontos os resultados do monitoramento Vale também ficaram acima do *baseline* e dos resultados obtidos no tributário.

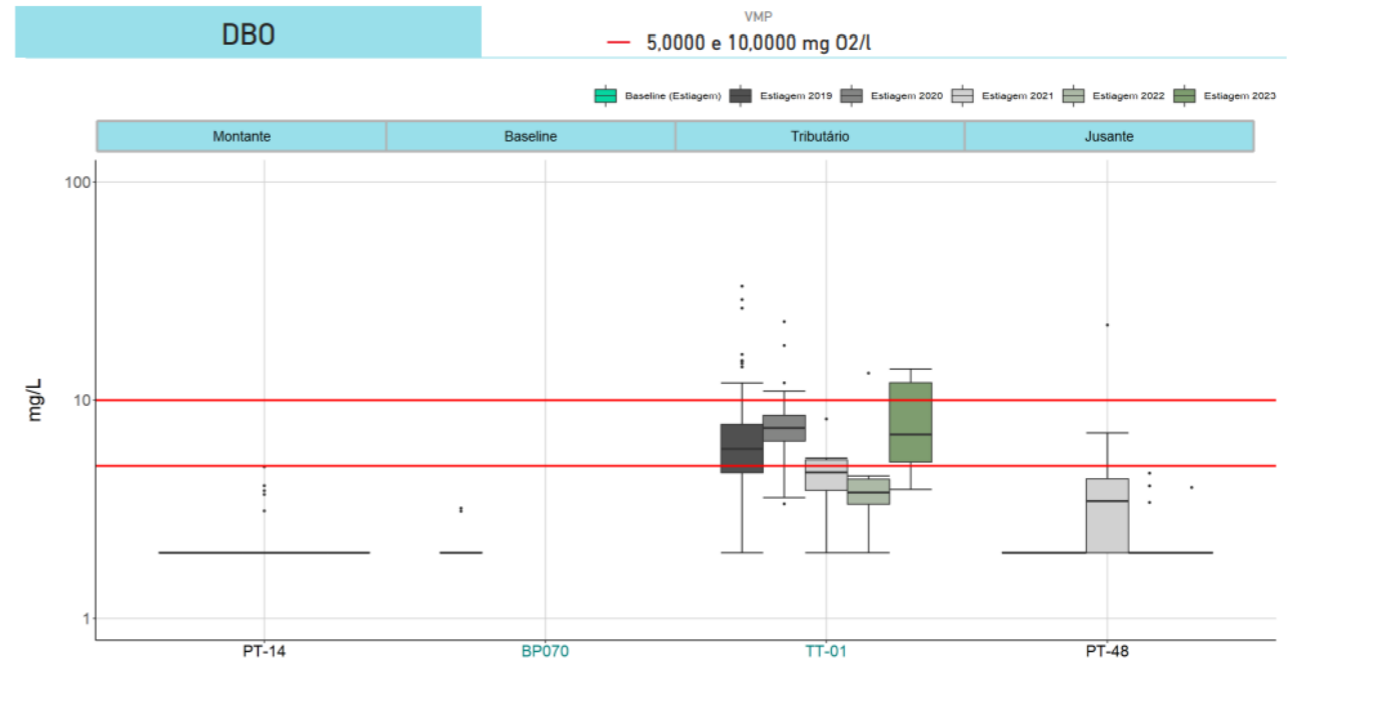
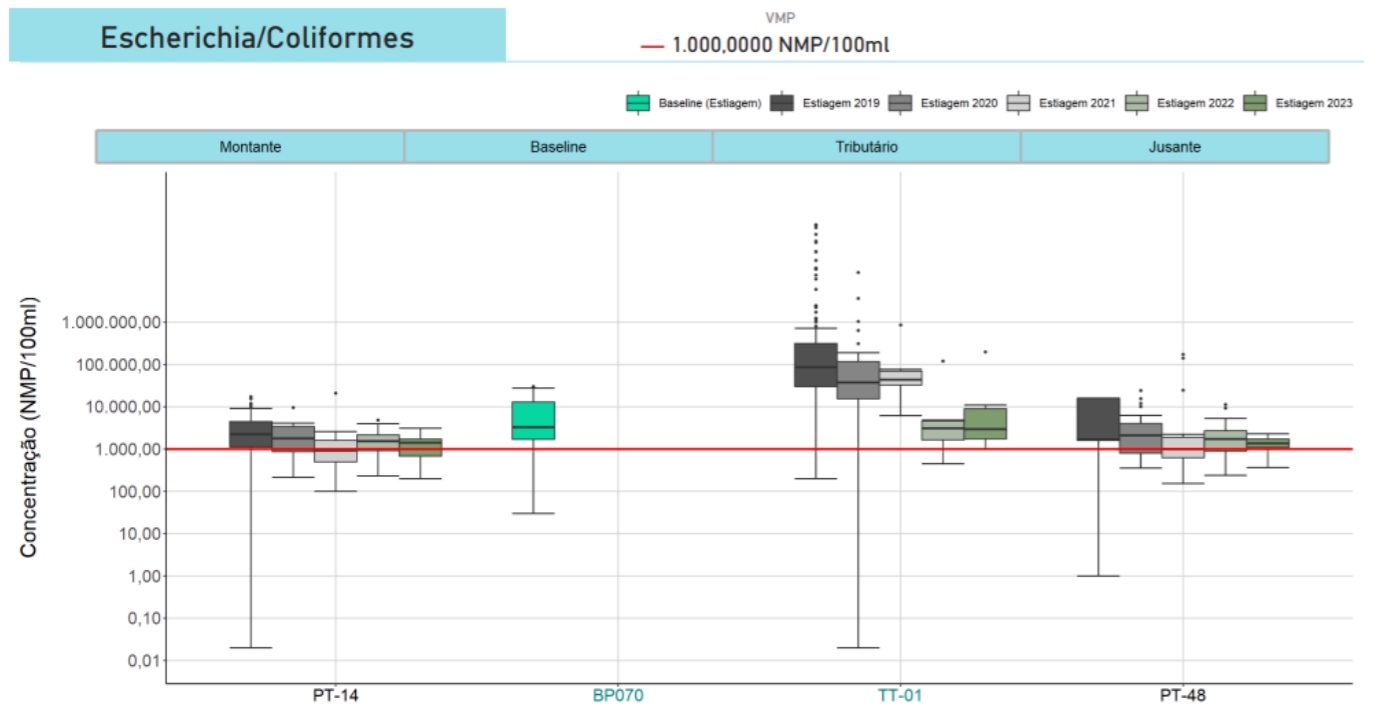
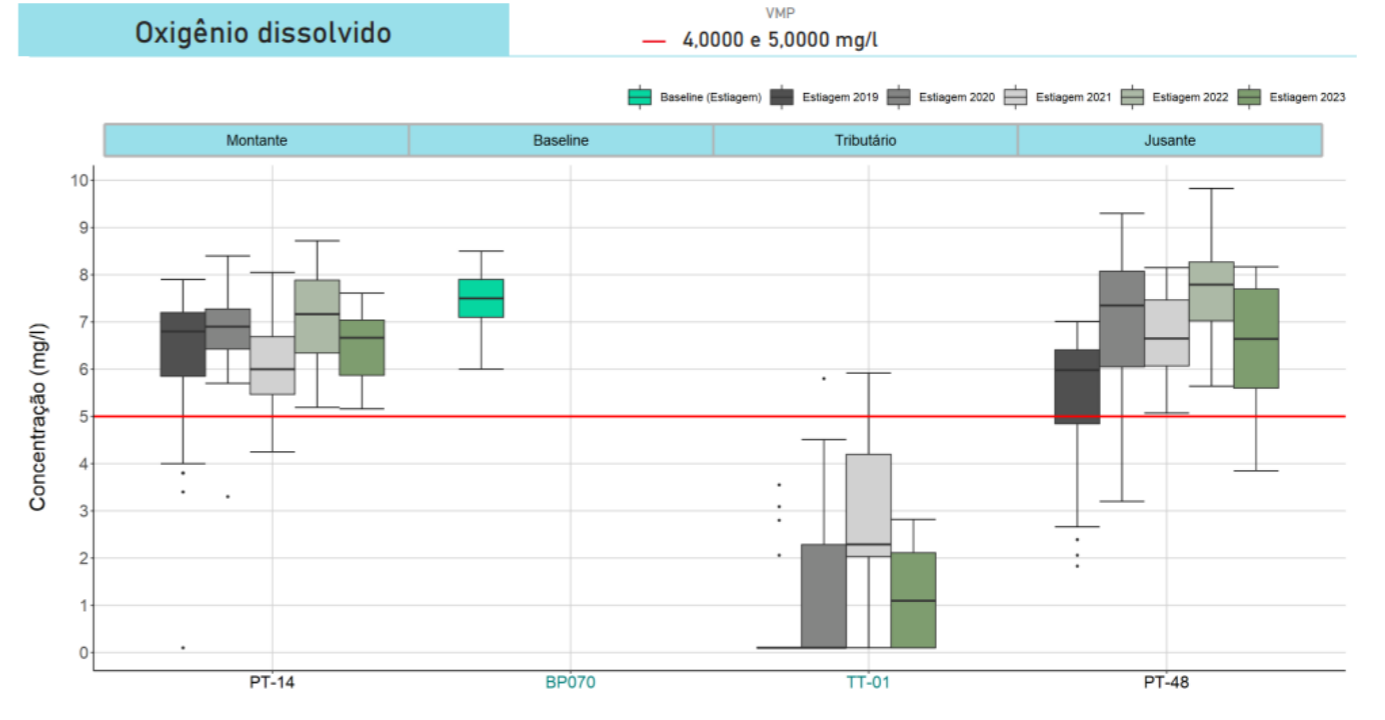
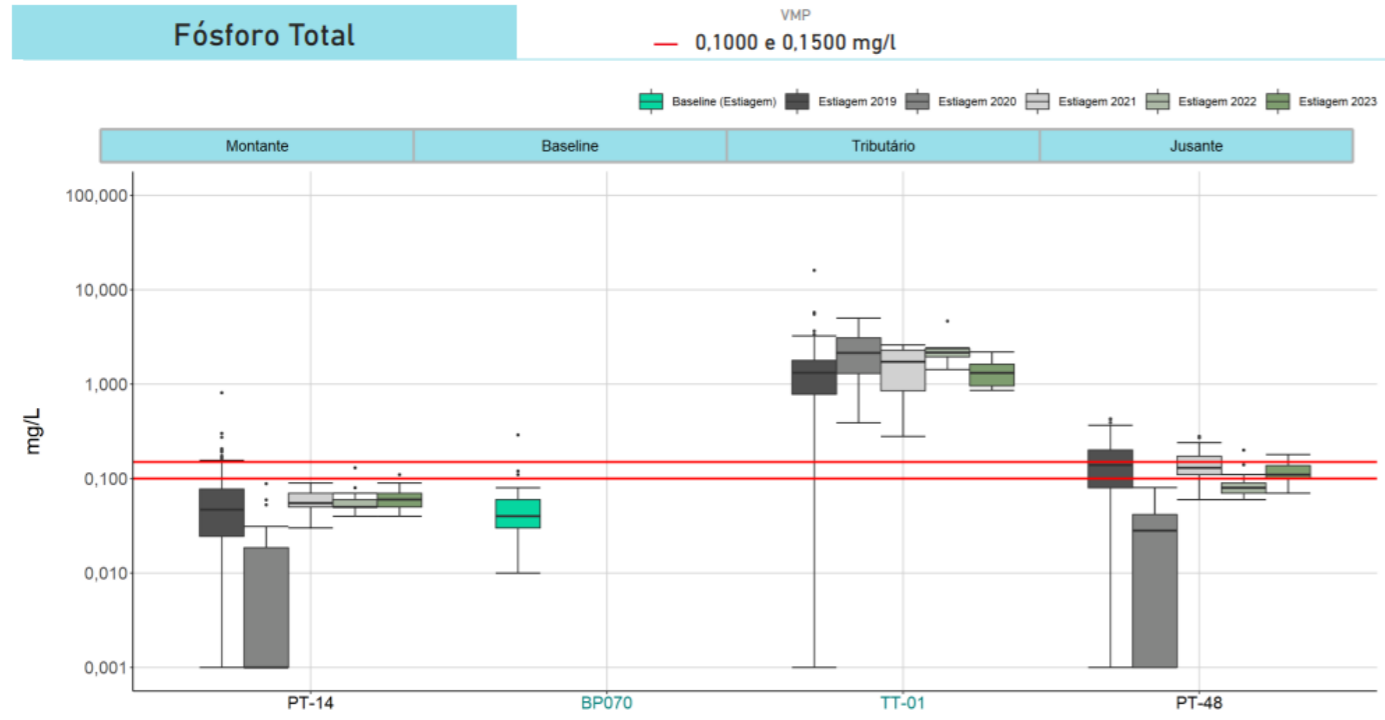
Para Turbidez, nota-se comportamento muito semelhante entre o tributário e os pontos do rio Paraopeba. Da estiagem/2019 até a estiagem/2021 observa-se gradual redução das medianas de Turbidez, seguido de aumento gradual em 2022 e posterior redução no último ciclo em 2023. Além disso, todos os valores se concentram abaixo do VMP de 100 NTU e similares ao *baseline* de estiagem.

Para Fósforo total, destacam-se as concentrações mais elevadas no tributário rio Betim em todos os períodos se comparadas àquelas registradas nos pontos de montante e jusante da confluência. Nota-se uma proximidade das medianas obtidas temporalmente. Além disso, no TT-01, em geral, grande parte dos resultados ultrapassaram o VMP (0,15 mg/L para Classe 2) e a referência do *baseline* sazonal. Tal condição denota a importância das contribuições difusas e pontuais, como o lançamento de efluentes domésticos, para o incremento desse parâmetro nos cursos d'água da região. Já nos pontos do rio Paraopeba as concentrações têm valores próximos ao do *baseline* e menor variação, exceto para as estiagens de 2019 e 2020. A condição do rio Betim mostra influência no ponto a jusante, PT-48. Nesse ponto, diferente do PT-14 a montante, as concentrações de Fósforo total apresentam ligeiro aumento em relação ao PT-14, ultrapassando o VMP (0,1 mg/L para a Classe 2) diversas vezes.

Os pontos do rio Paraopeba apresentam similaridades no comportamentos dos parâmetros sanitários *E. coli*/Coliformes Termotolerantes e Oxigênio dissolvido. Nesses pontos, ao longo dos períodos analisados, as concentrações são, em geral, maiores que o VMP e com a mesma ordem de grandeza do *baseline* sazonal, o qual também está acima do valor máximo permitido para ambos os parâmetros. Já no rio Betim, ao longo dos períodos de estiagem as concentrações de *E. coli*/Coliformes Termotolerantes tendem a diminuir e se aproximar do *baseline*, enquanto o Oxigênio dissolvido não aponta uma tendência, porém está abaixo do *baseline* e a maioria dos registros não ultrapassam o VMP. Já o parâmetro DBO, não há muita variação para os pontos a montante e jusante, bem como para o *baseline*, entretanto, o TT-01 apresenta concentrações elevadas que ultrapassam o VMP (10 mg/L para Classe 3) na maioria dos períodos de estiagem apresentados.

Gráfico 9.3.2-2 Boxplots para os parâmetros referentes ao rio Betim (TT-01).





Na **Tabela 9.3.2-1** podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para comparação dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, DBO, *E. coli*/Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e sólidos suspensos totais entre os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) da confluência com o rio Paraopeba nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Tabela 9.3.2-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim

PT-14 (Mont.) X PT-48 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022	Est. 2023
Manganês Total	0,000	0,008	0,251	0,118	0,094
Ferro Dissolvido	0,447	0,173	0,942	0,136	0,687
Alumínio Dissolvido	0,259	0,044	0,555	0,500	0,646
Turbidez	0,000	0,069	0,018	0,544	0,164
Fósforo Total	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000
DBO	1,000	1,000	0,026	0,075	0,336
EColi / ColiTermot.	0,015	0,516	0,544	0,609	0,647
Nitrogênio Amoniacal	0,625	0,000	0,000	0,000	0,000
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,187	0,042	0,044	0,701
Sólidos Suspensos T.	0,000	0,090	0,036	0,616	0,790



Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05).

De modo geral, em todos os períodos de estiagem analisados, percebe-se que os parâmetros mais recorrentes com diferença estatística significativa entre os resultados do ponto de montante e de jusante foram: Fósforo total, Nitrogênio amoniacal e Oxigênio dissolvido, sendo que o Fósforo total foi significativamente diferente em todos os períodos de estiagem. Em todos os casos, percebe-se que, de modo geral, as condições desses parâmetros de cunho sanitário são superiores no tributário, conforme discutido no **Gráfico 9.3.2-2**. Tal cenário reflete a potencial contribuição do lançamento de efluentes domésticos no curso d'água, bem como da poluição difusa e conseqüente piora da qualidade da água no ponto de jusante.

Temporalmente, percebe-se que as estiagens de 2019 e 2021 tiveram as maiores ocorrências de diferenças significativas, sendo que para estas duas foi verificada diferença para seis dos dez parâmetros avaliados no teste estatístico. No período de estiagem mais recente (2023), apenas houve diferença estatística entre os resultados de Fósforo total e Nitrogênio amoniacal do ponto de montante e jusante, corroborando com a presença dos parâmetros originários de lançamento de esgotos nos cursos d'água.

9.3.3. Ribeirão das Abóboras/Grande (TT-05)

O ribeirão das Abóboras, afluente do ribeirão Grande, é monitorado pelo ponto TT-05, localizado na Região 2A, e apresenta como pontos de montante e jusante no rio Paraopeba, para fins

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 203 / 399
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	

comparativos, os pontos PT-53 e PT-54, respectivamente. Sua microbacia é parte integrante da bacia do ribeirão Grande que cobre parte do município de Ribeirão das Neves e Nova Contagem e toda a parte urbana do município de Esmeraldas pela margem direita. Caracteriza-se, também, por ser o corpo receptor dos efluentes tratados da ETE Nova Contagem, sob gestão da COPASA. O restante da bacia é caracterizado por ocupação tipicamente rural.

No **Gráfico 9.3.3-1**, podem ser observados os percentuais de violação para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-05 e para os pontos de montante (PT-53) e jusante (PT-54) localizados no rio Paraopeba.

Para o período atual, estiagem/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação para Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total e Turbidez. Dentre esses parâmetros, as violações foram mais expressivas nos pontos a montante e ou jusante da confluência em relação ao ponto no tributário (TT-05) (exceto para a Turbidez), mas principalmente no ponto de jusante PT-54, cujos percentuais de Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido e Fósforo total foram superiores aos obtidos nos demais pontos de monitoramento.

Apesar disso, analisando de maneira espacial e ao longo de toda a série histórica, há tendência de maior percentual de violação no TT-05 para a maior parte dos parâmetros. As exceções foram observadas para o Manganês total, para o qual os percentuais de desvios foram consideravelmente mais elevados no PT-53 e no PT-54, e para o Fósforo total, que apresentou percentuais espacialmente oscilatórios.

Por fim, ressalta-se que no período atual não houve violação de metais traço no TT-05.

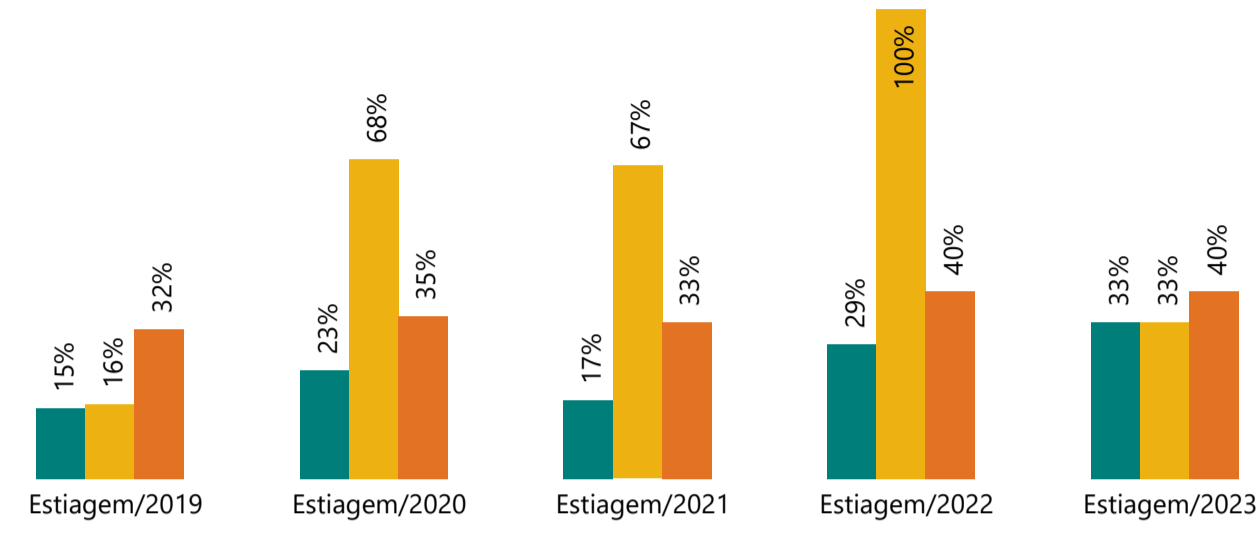
Gráfico 9.3.3-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no TT-05 (ribeirão das Abóboras/Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante

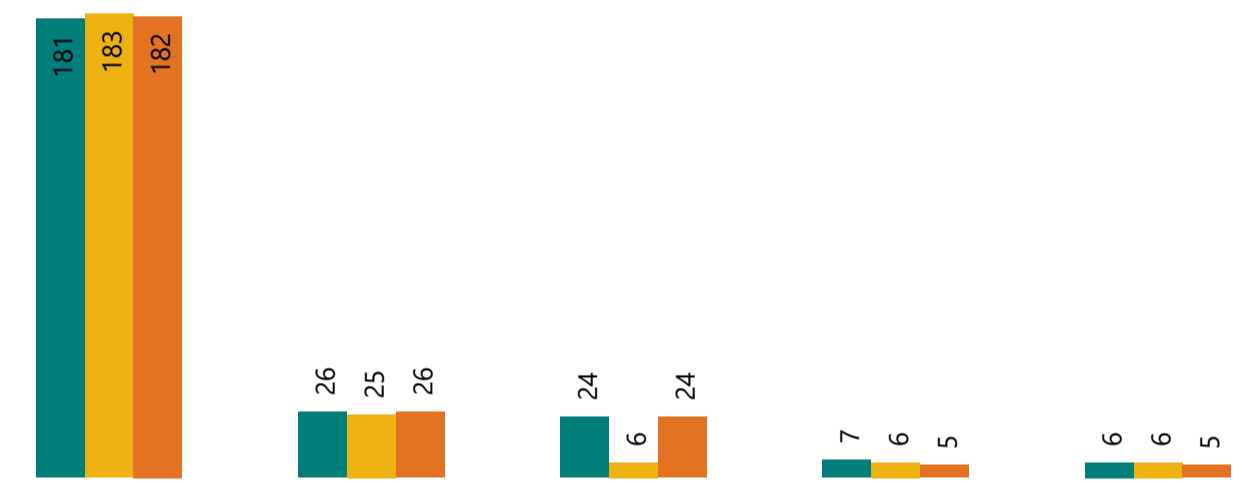
Parâmetro
Alumínio Dissolvido

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações



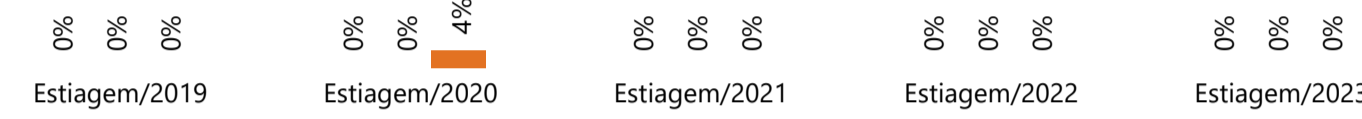
N° amostras



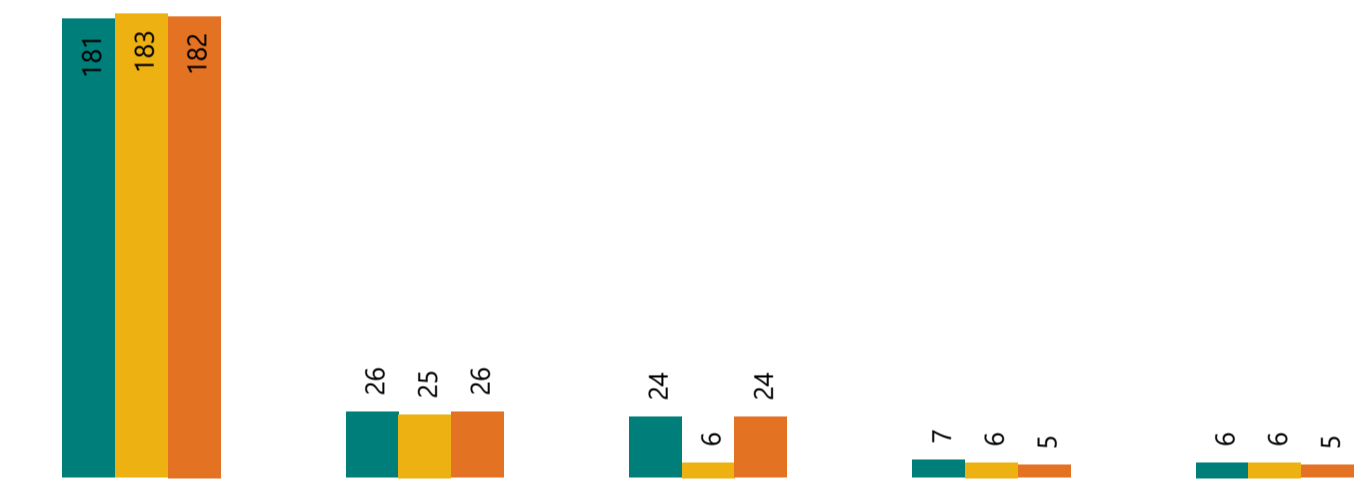
Parâmetro
Arsênio Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações



N° amostras



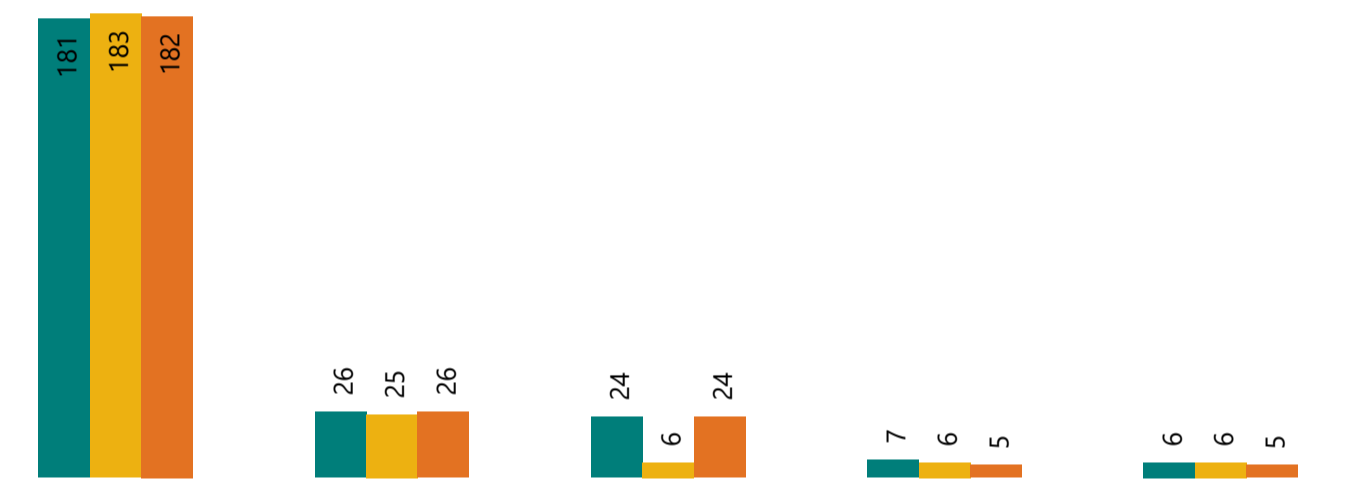
Parâmetro
Cádmio Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações



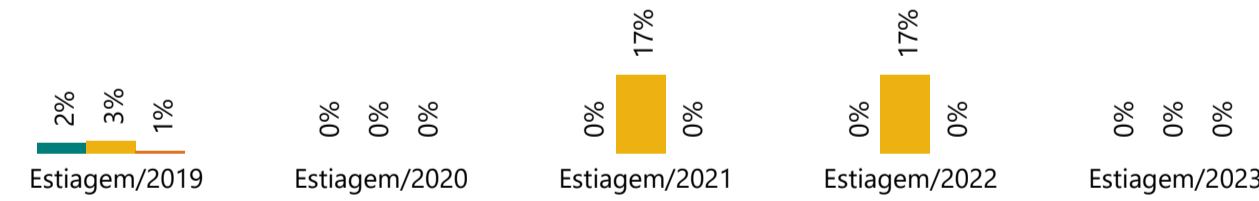
N° amostras



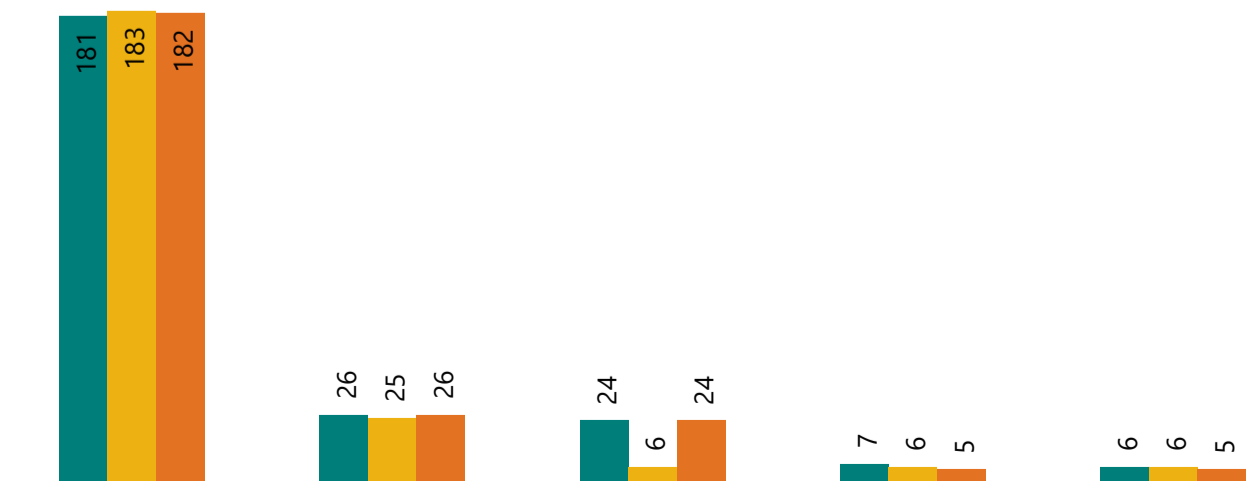
Parâmetro
Chumbo Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações



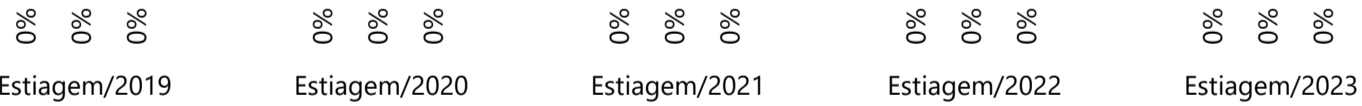
N° amostras



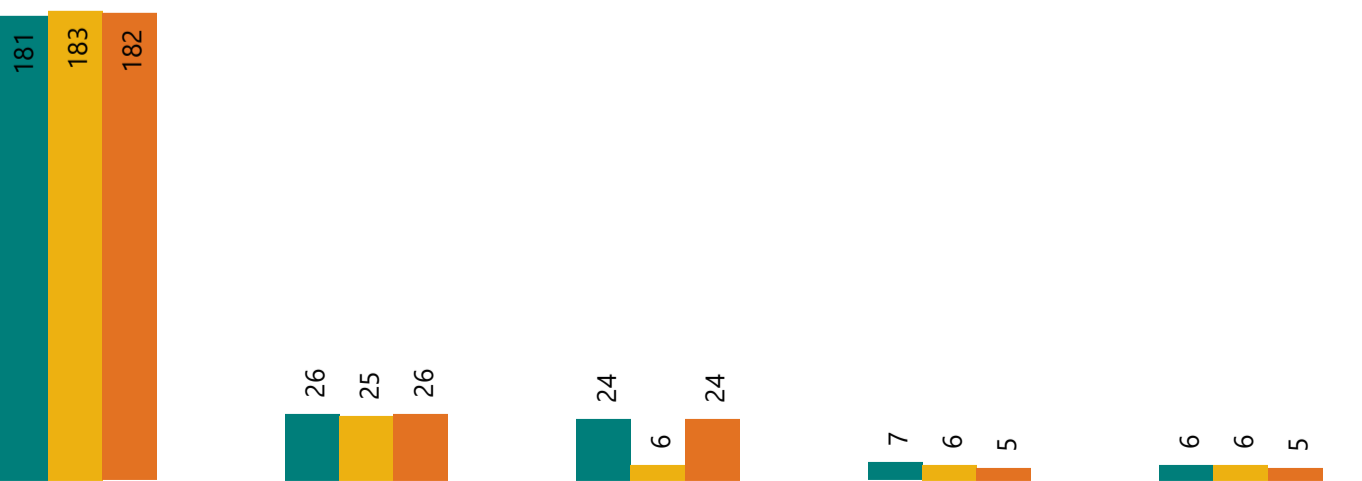
Parâmetro
Cobalto Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações



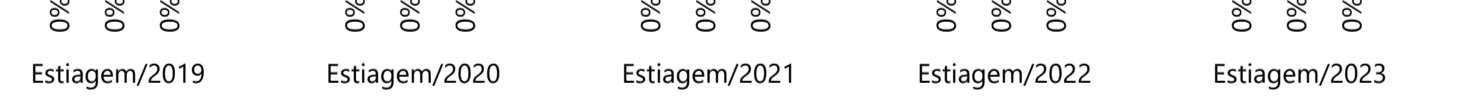
N° amostras



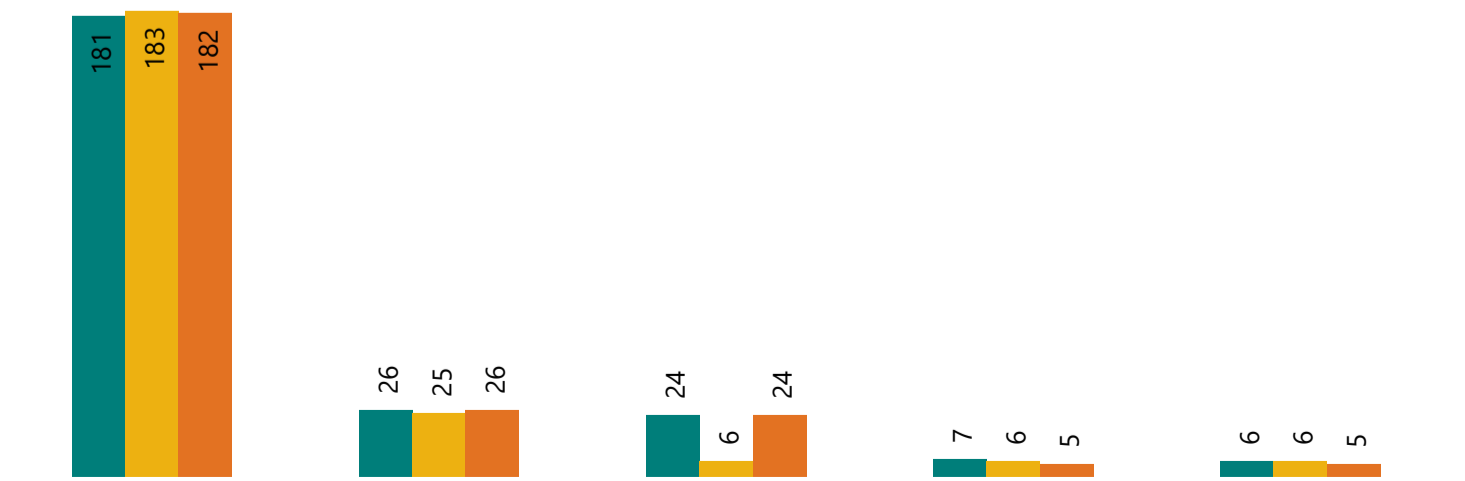
Parâmetro
Cobre Dissolvido

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

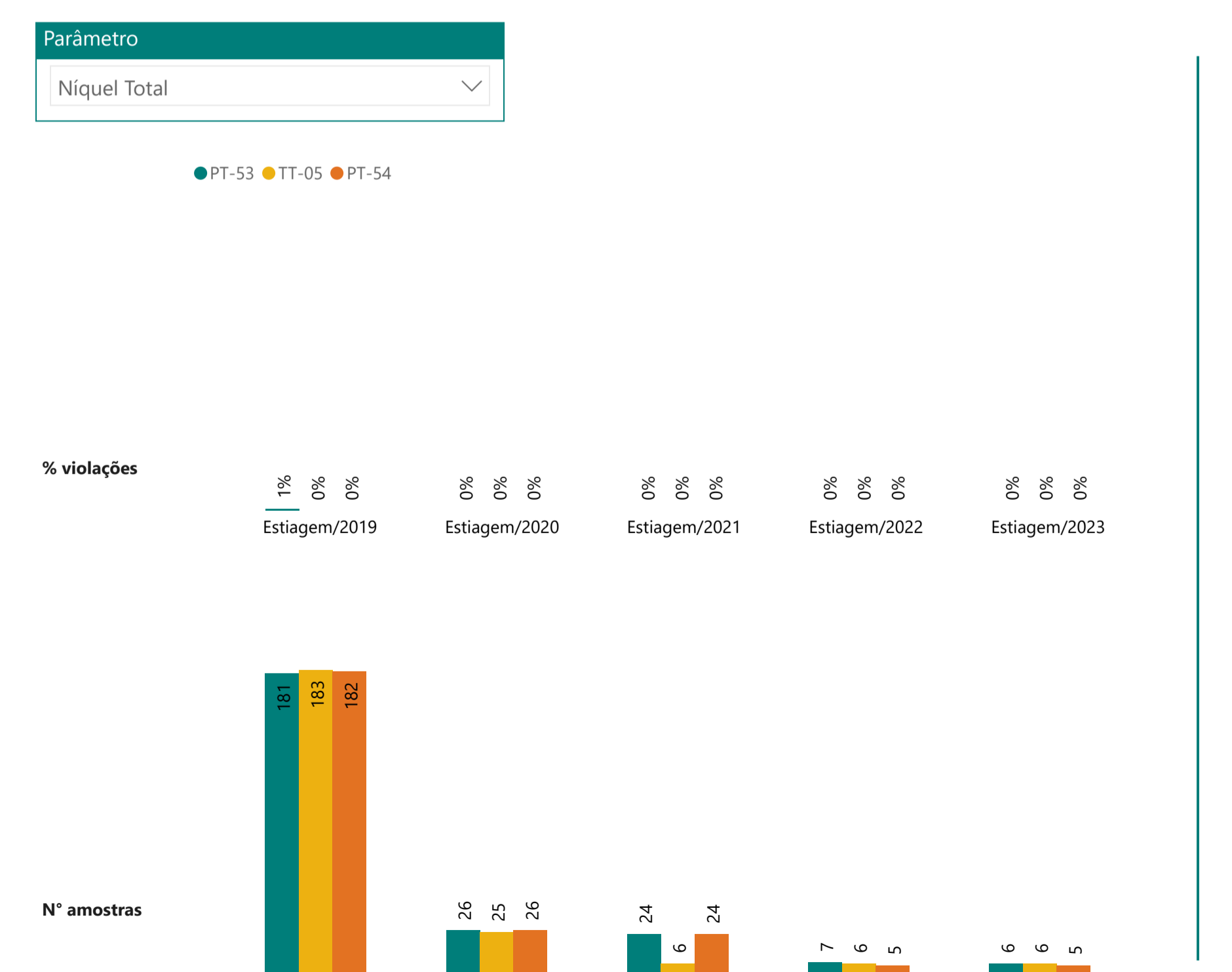
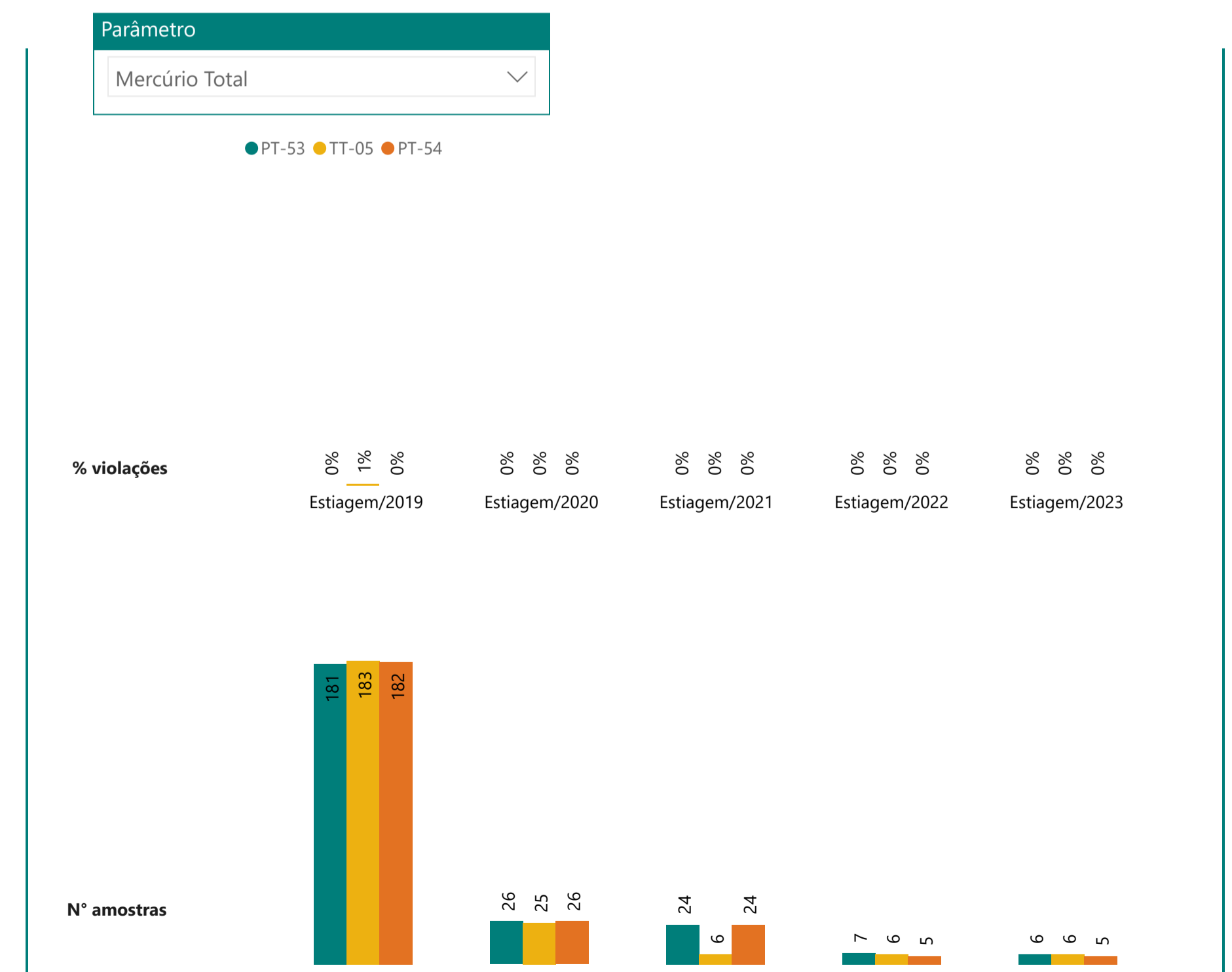
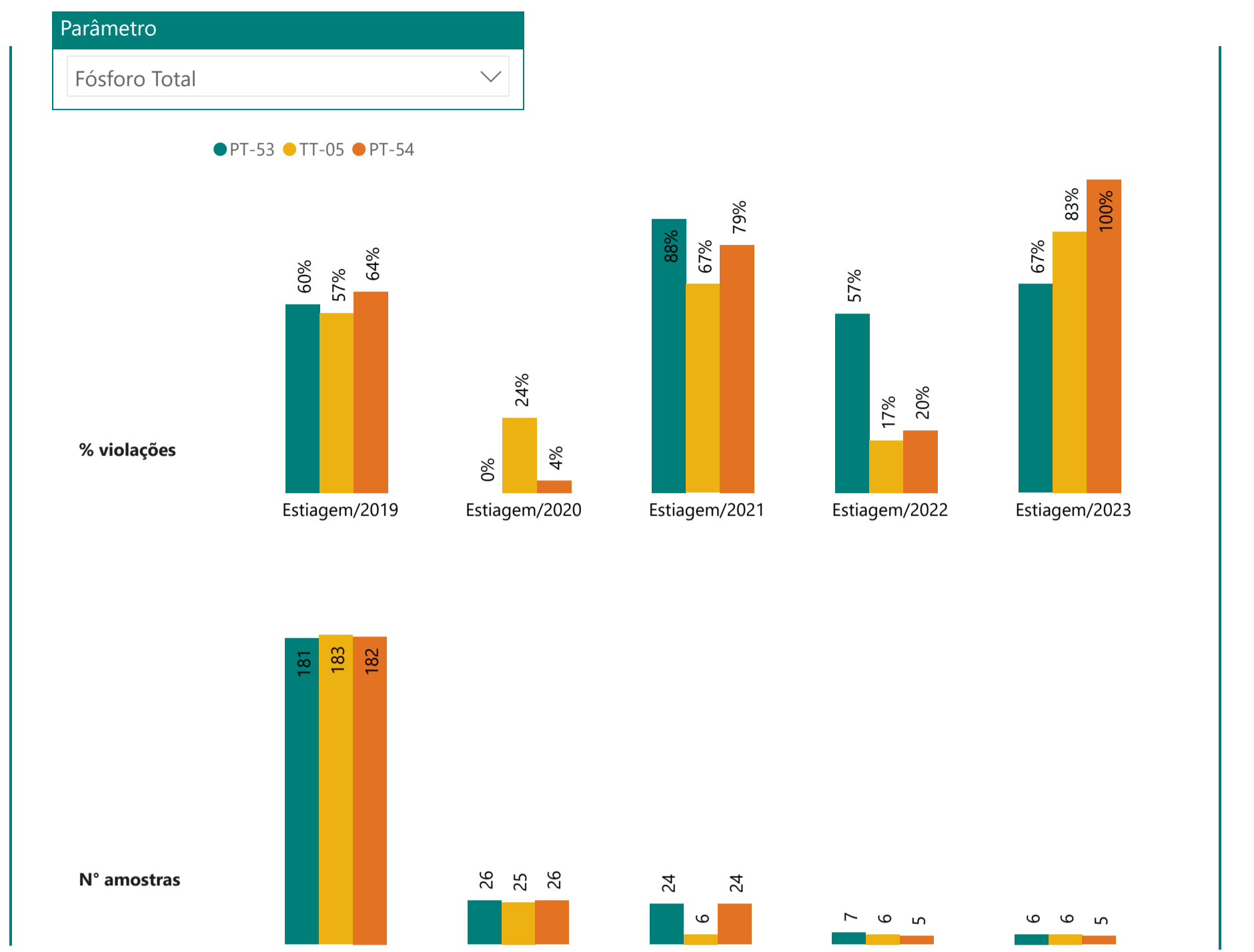
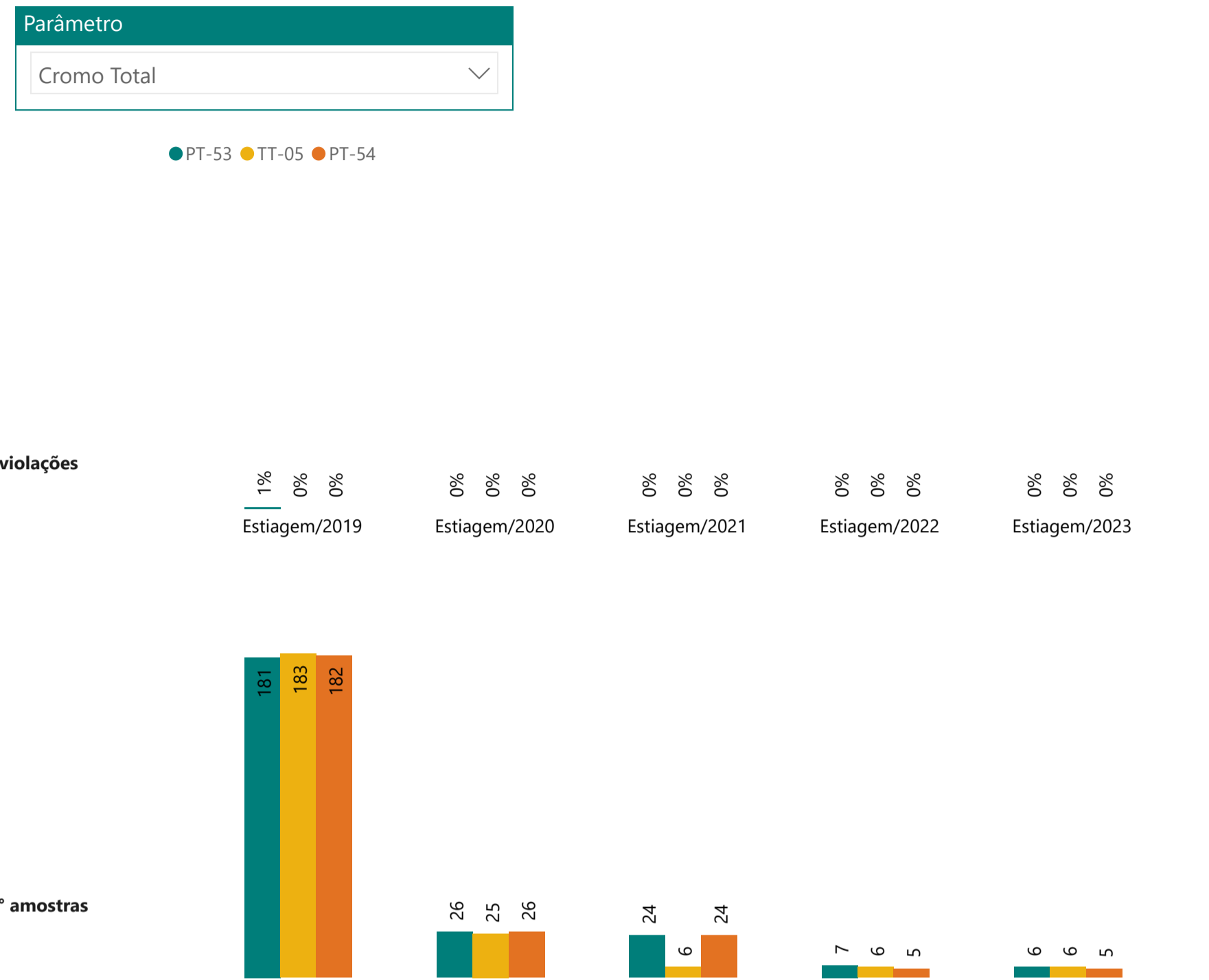
% violações



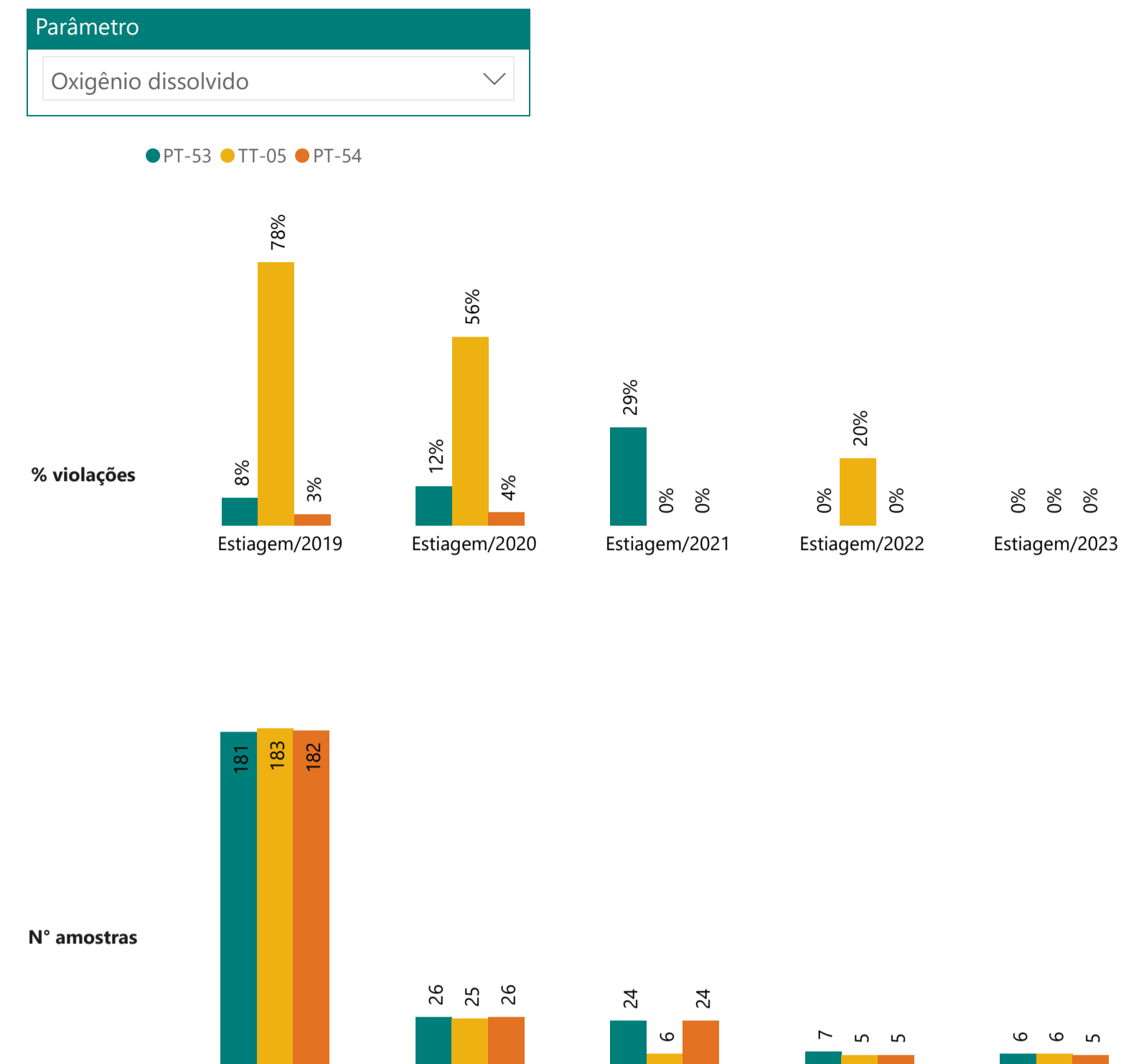
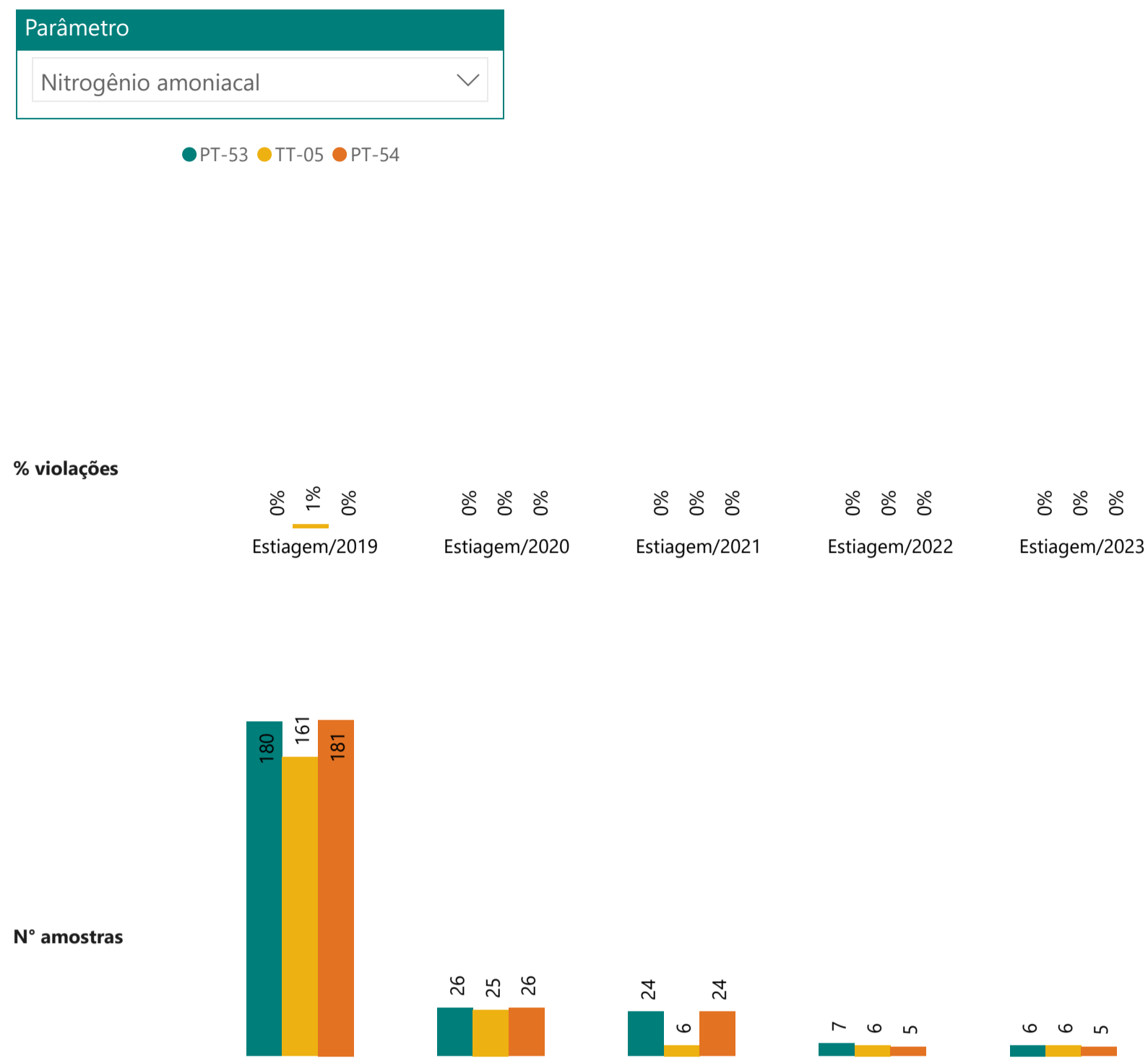
N° amostras



% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante



% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante




No **Gráfico 9.3.3-2**, são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*/Coliformes termotolerantes, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/ 2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto TT-05 e para os pontos de montante (PT-53) e jusante (PT-54) localizados no rio Paraopeba.

Para o Alumínio dissolvido e o Ferro dissolvido as concentrações foram, de modo geral, superiores no TT-05, em relação aos pontos de montante e jusante da confluência, bem como em relação ao ponto de *baseline* sazonal. Esse resultado foi observado principalmente nos períodos de estiagem de 2020, 2021 e 2022, nos quais os P75 calculados (ou seja, pelo menos 25% dos dados) ultrapassaram os VMP da legislação ($Al_D = 0,1$ mg/L e $Fe_D = 0,3$ mg/L), enquanto nos PT-53 e PT-54 essa métrica, bem como as medianas, ficaram abaixo do respectivo valor para cada parâmetro. Os pontos localizados no rio Paraopeba, por sua vez, apresentaram comportamento próximo entre si nos três primeiros períodos (para o ponto PT-54 não houve número de amostras suficientes, em 2022 e 2023, para geração do *boxplot*). Temporalmente, as concentrações mantiveram-se oscilando entre os períodos analisados, mas nota-se que as medianas calculadas para o último período foram inferiores ao anterior (estiagem/2022) nos pontos em que houve formação do *boxplot*. Esses resultados sugerem que, apesar das maiores concentrações desses metais observados no ribeirão das Abóboras, elas não impactam diretamente a qualidade da água no Paraopeba em períodos de estiagem.

Já para o Manganês total, observa-se comportamento espacial contrário aos demais parâmetros estudados. Para esse metal foram observadas concentrações consideravelmente mais elevadas nos pontos do rio Paraopeba, nos quais a maior parte dos valores foram superiores ao VMP e à mediana do *baseline* sazonal, em todos os períodos analisados. No TT-05, por sua vez, as concentrações do Manganês total ficaram majoritariamente abaixo do VMP e da mediana do *baseline*. Temporalmente, no PT-53, nota-se redução das medianas nos três primeiros períodos de estiagem (2019, 2020 e 2021) seguida de elevação nos anos seguintes, enquanto no TT-05 as medianas oscilaram ao longo do período de monitoramento, ainda que tenha havido redução entre estiagem/2022 e estiagem/2023. Para o PT-54 houve decréscimo nos valores observados nos três primeiros períodos e não houve número de amostras suficientes, em 2022 e 2023, para geração do *boxplot*.

Para a Turbidez os teores foram, de modo geral, superiores no TT-05, em relação aos pontos de montante e jusante da confluência, bem como em relação ao ponto de *baseline* sazonal, apresentando medianas mais elevadas e, para os períodos de estiagem de 2020, 2022 e 2023, acima do VMP estipulado na legislação. Nos PT-53 e PT-54, por sua vez, a maior parte dos valores não ultrapassou o VMP ao longo de toda a série histórica analisada, ainda que, de modo geral, também tenham ficados superiores, e em menores proporções, próximos, ao valor de *baseline* de estiagem. Temporalmente, no PT-53, nota-se tendência de manutenção nas medianas entre os períodos de estiagem, exceto na estiagem/2021 que apresentou os menores valores. No TT-05 as medianas oscilaram ao longo do período de monitoramento, ainda que tenha havido redução entre estiagem/2022 e estiagem/2023. Para o PT-54 houve decréscimo nos valores observados nos três primeiros períodos e não houve número de amostras suficientes, em

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 208 / 399

2022 e 2023, para geração do *boxplot*. Esses resultados sugerem que, apesar dos maiores teores desse analito no ribeirão das Abóboras, eles não impactam ou pouco contribuem diretamente na qualidade da água no rio Paraopeba em períodos de estiagem.

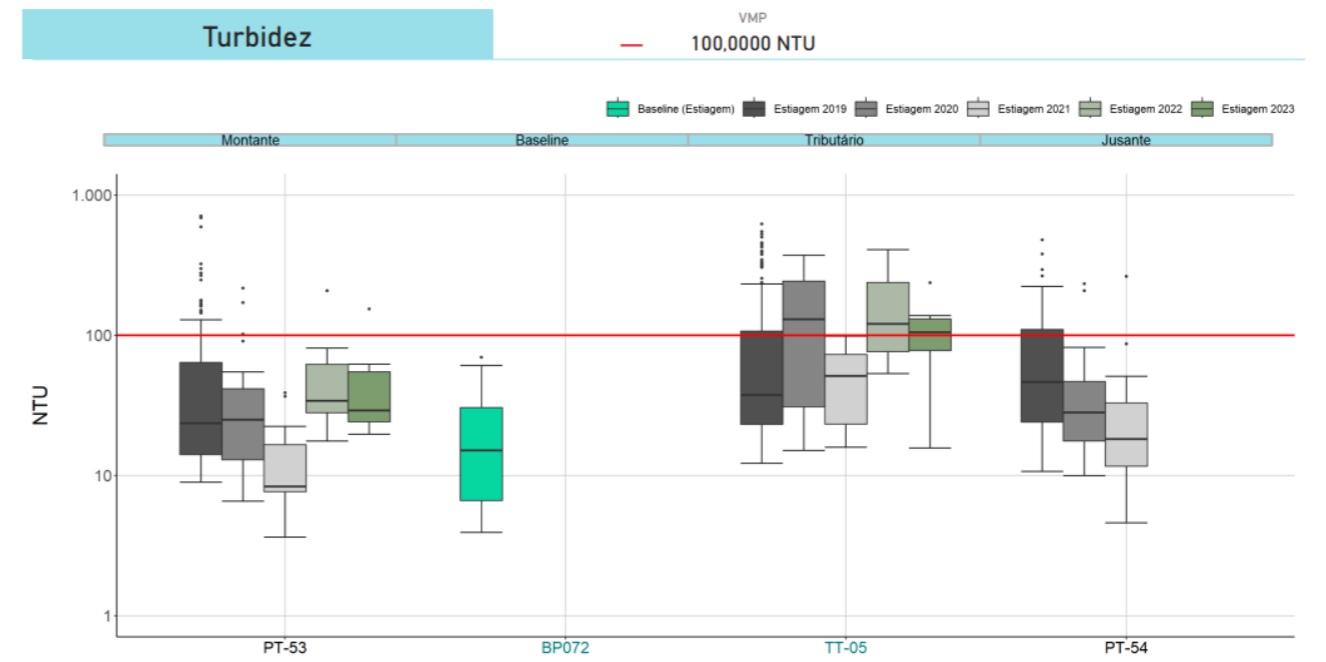
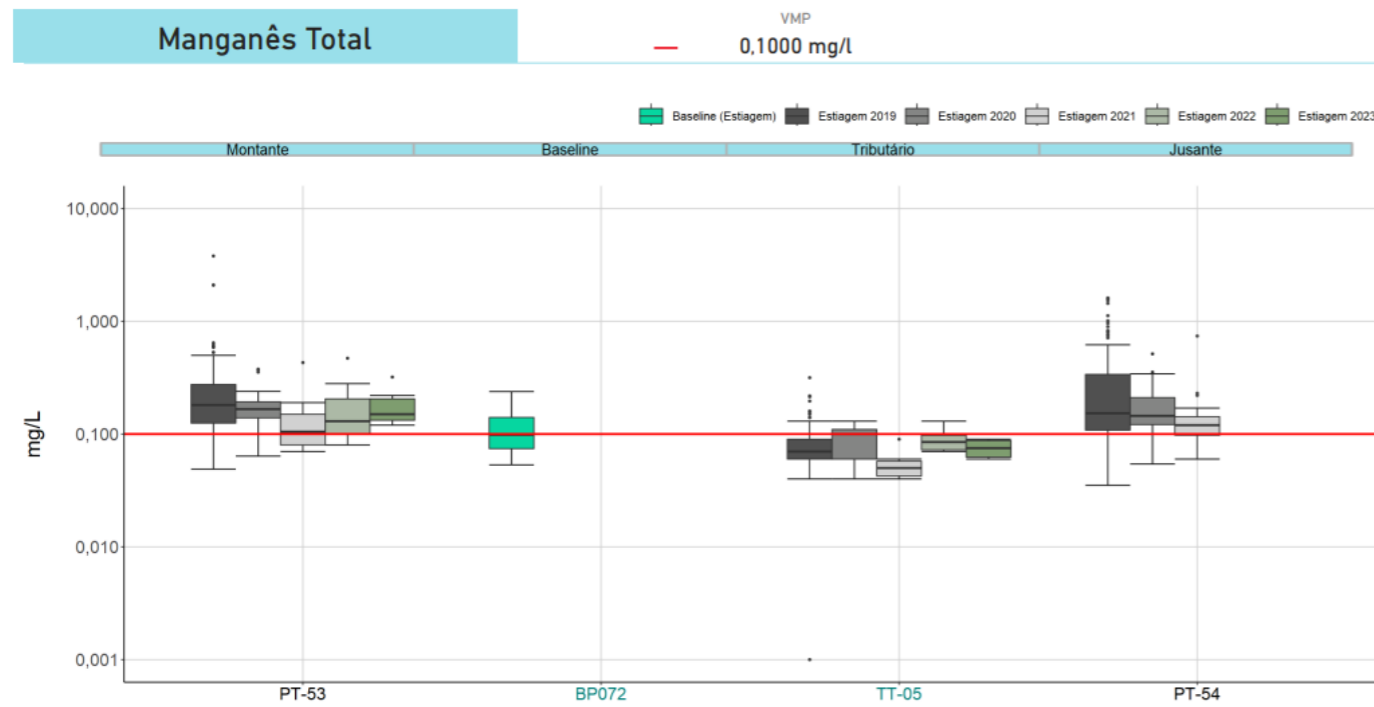
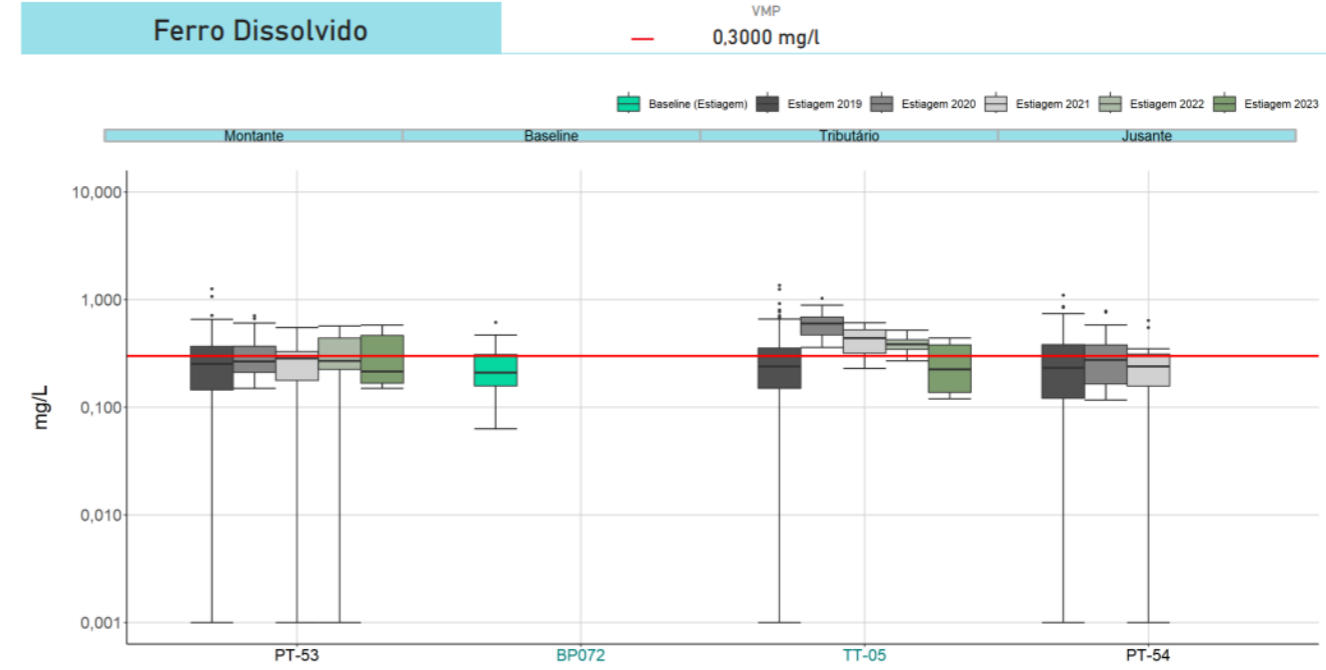
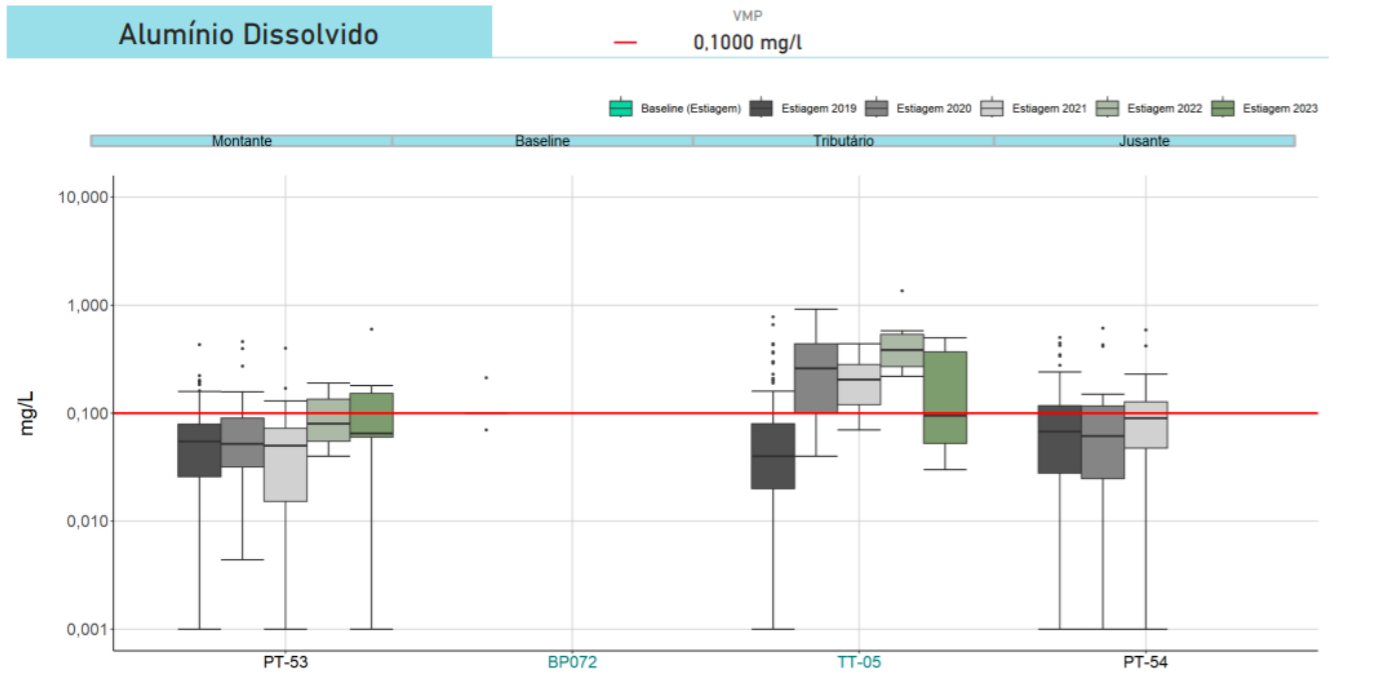
Para Fósforo total, as concentrações oscilaram entre os períodos considerados e apresentaram magnitude, de modo geral, próxima entre os pontos analisados, incluindo o *baseline*, exceto, na estiagem/2020, para o qual as concentrações foram mais elevadas no TT-05 em relação aos pontos no rio Paraopeba, e na estiagem/2022 no qual foram menores. Em todos os períodos e pontos de monitoramento, exclusive nas exceções mencionadas, a maior parte dos valores obtidos ficaram acima do VMP (0,1 mg/L) do analito. Considerando os últimos ciclos de estiagem, nota-se uma elevação da mediana entre 2022 e 2023, nos PT-53 e TT-05. O PT-54, por sua vez, apresentou comportamento próximo do PT-53 nos três primeiros períodos, mas não houve número de amostras suficientes, em 2022 e 2023, para geração do *boxplot*.

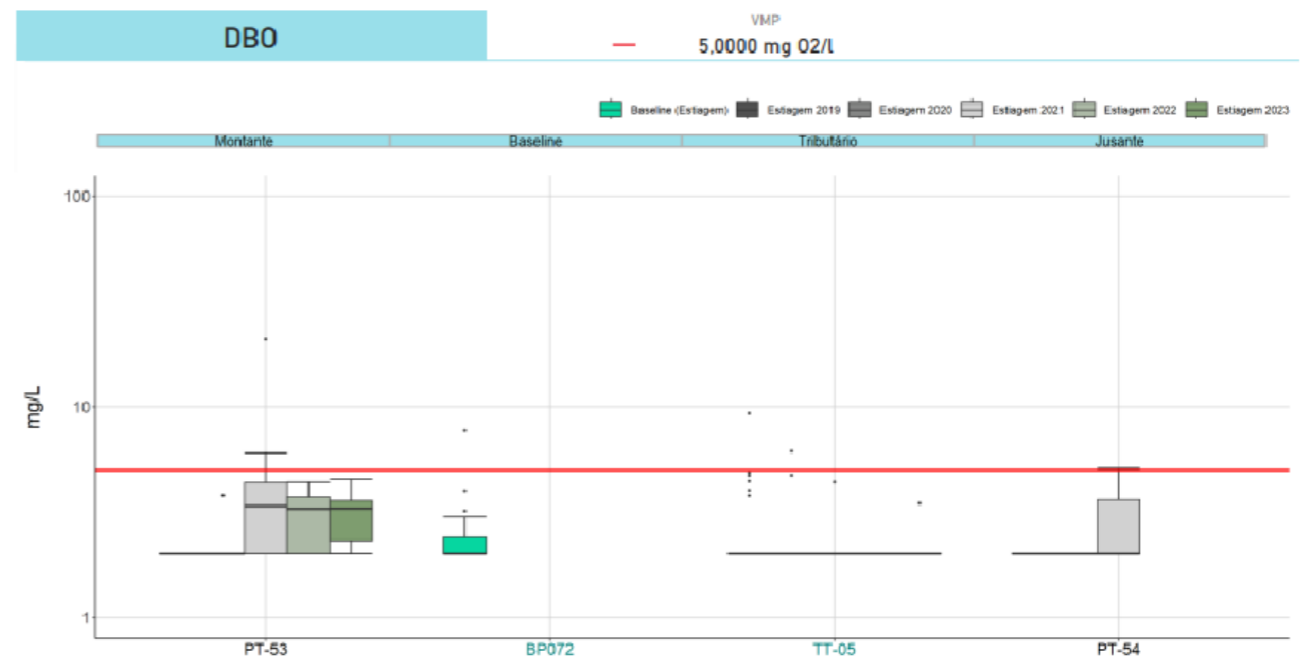
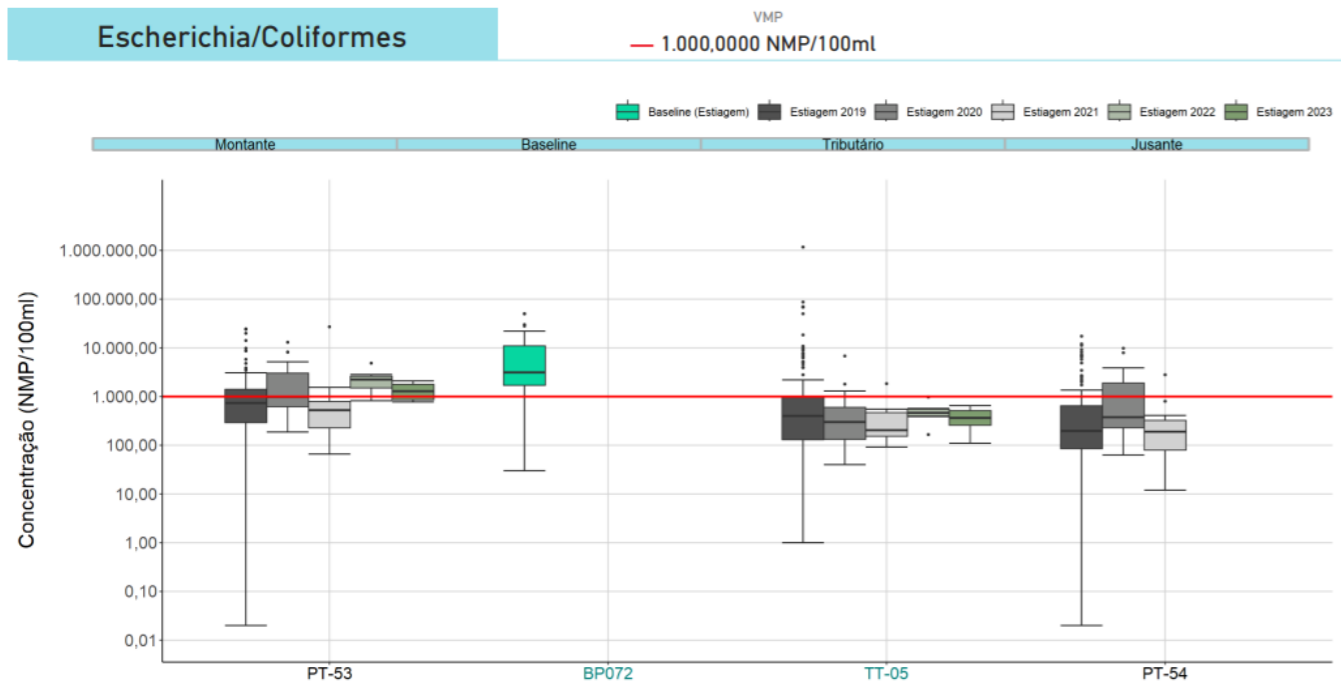
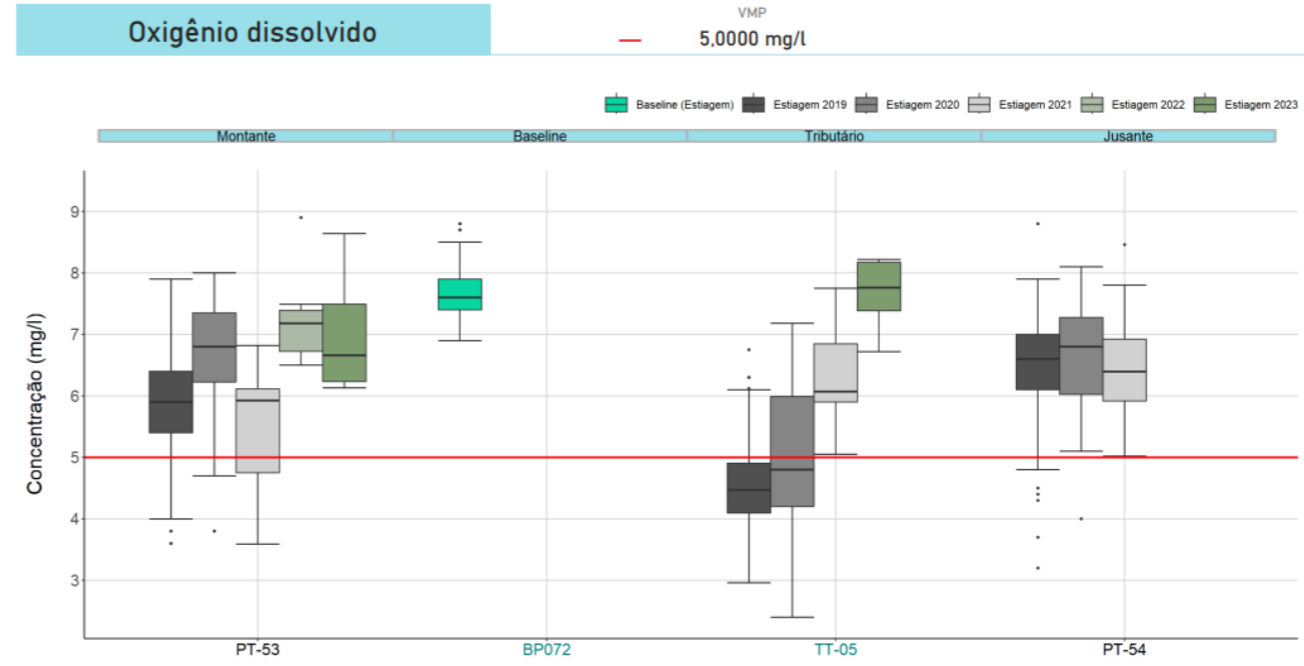
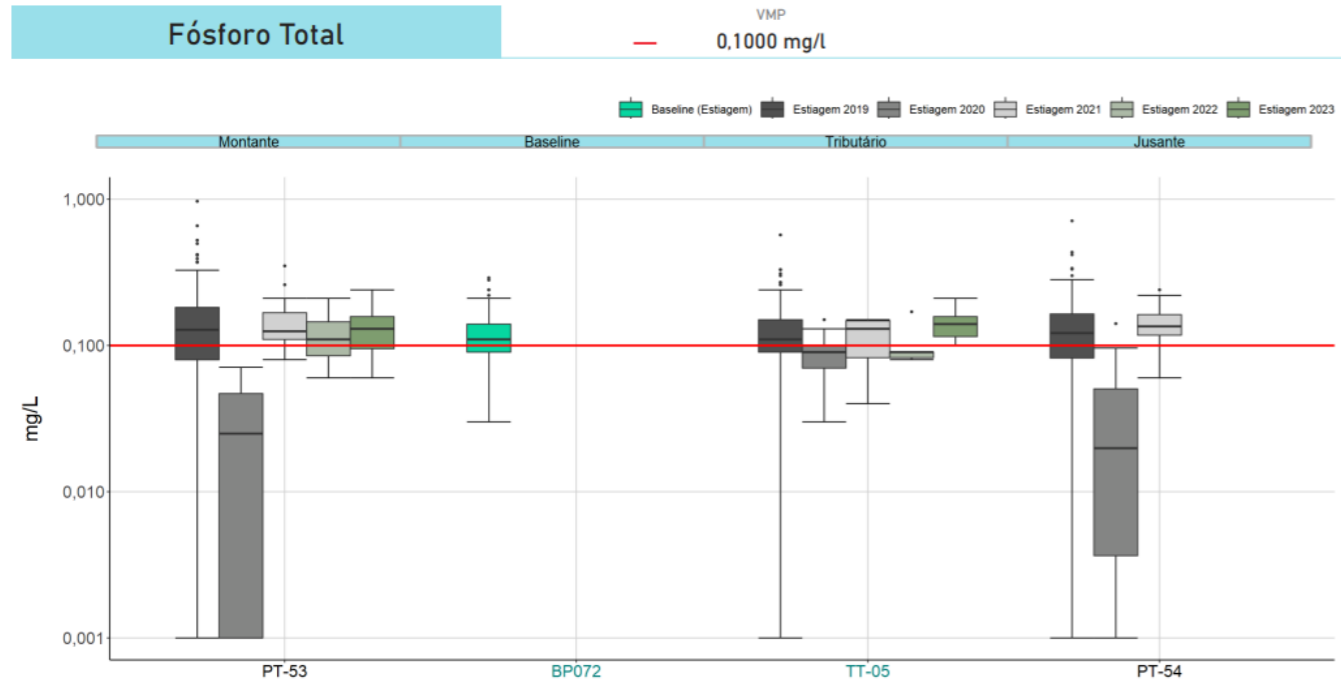
Já o Oxigênio dissolvido apresentou, de modo geral, concentrações elevadas e acima do mínimo exigido na legislação em todos os pontos e períodos analisados, ainda que majoritariamente abaixo dos valores de *baseline* sazonal. Exceções se deram no TT-05, durante as estiagens de 2019 e 2020, nas quais o P75 e a mediana, respectivamente, ficaram abaixo desse valor e indicaram condições mais redutoras do ambiente. Temporalmente, percebe-se oscilação entre as medianas obtidas nos pontos do rio Paraopeba, com redução das concentrações de OD da estiagem/2022 para estiagem/2023, enquanto no TT-05, notoriamente, há uma elevação das concentrações ao longo do período de monitoramento, o que indica uma melhoria gradual na qualidade da água do ribeirão das Abóboras.



Para *E. coli*/Coliformes termotolerantes, teores um pouco mais elevados foram verificados no ponto de montante, indicando melhores condições de qualidade no ribeirão das Abóboras e possível contribuição do mesmo no processo de diluição desses valores. Ainda assim, para todos os pontos, esses valores foram, na maior parte, inferiores ao do *baseline* sazonal. Em termos de violação, os resultados ficaram majoritariamente abaixo do VMP (1000 NMP/100 mL), exceto no PT-53 durante as estiagens de 2022 e 2023, nas quais o P75 e a mediana, respectivamente, apresentaram desvio desse valor.

Para DBO, concentrações mais elevadas foram observadas exclusivamente nos três últimos períodos monitorados no PT-53, para os quais grande parte dos valores ficaram acima da mediana medida para o *baseline*, ainda que inferiores ao VMP. Ademais, as medianas nos demais pontos e períodos foram iguais ao LQ do método analítico. De fato, apenas desvios pontuais foram observados para toda a malha amostral e série de dados.

Gráfico 9.3.3-2 Boxplots - TT05





	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 211 / 399
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	

Na **Tabela 9.3.3-1** podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para as comparações dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, DBO, *E. coli* / Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e sólidos suspensos totais entre os pontos de montante (PT-53) e jusante (PT-54) nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Tabela 9.3.3-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras



PT-53 (Mont.) X PT-54 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022	Est. 2023
Manganês Total	0,442	0,421	0,379	0,744	0,714
Ferro Dissolvido	0,427	0,728	0,509	0,568	0,855
Alumínio Dissolvido	0,006	0,891	0,018	0,807	0,522
Turbidez	0,000	0,621	0,008	1,000	0,315
Fósforo Total	0,456	0,689	0,860	0,408	0,927
DBO	1,000	0,336	0,039	0,066	0,045
EColi / ColiTermot.	0,000	0,018	0,004	0,051	0,121
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,001	0,052	0,256	0,233
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,985	0,004	0,256	0,784
Sólidos Suspensos T.	0,000	0,210	0,001	0,744	0,409

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05).

Nos períodos de estiagem analisados, percebe-se que apenas parâmetros de aspecto sanitário apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre o ponto de montante e o de jusante, sendo ele DBO. Por outro lado, para os parâmetros majoritários (Ferro, Alumínio, Manganês e Turbidez) nas estiagens de 2019 e 2021 houve indicativo de diferenças significativas nas comparações estabelecidas para Alumínio dissolvido e Turbidez, e, dessa forma, há indicativos de que o tributário ribeirão das Abóboras contribua para a elevação destes parâmetros no rio Paraopeba.

9.3.4. Ribeirão dos Gomes (CE-01)

O ribeirão dos Gomes, monitorado por meio do ponto CE-01 e localizado na Região 2, possui sua confluência com o rio Paraopeba a jusante do maciço da UHE Retiro Baixo pela margem direita e apresenta uma bacia de contribuição essencialmente rural e com vocação agroindustrial. Destaca-se que o ponto CE-01 é enquadrado como Classe 1 e os seus resultados foram analisados de acordo com essa condição. O ponto de montante (PT-57) está localizado prontamente a jusante do maciço da hidrelétrica, refletindo as condições de qualidade do ambiente lântico do reservatório, mas sob influência exclusivamente das vazões turbinadas da usina, o que seria a condição mais comum, uma vez que as vazões vertidas tendem a ser menos permanentes no tempo, especialmente nos períodos de estiagem.

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 212 / 399

No **Gráfico 9.3.4-1**, podem ser observados os percentuais de violação para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem//2020, estiagem//2021, estiagem//2022 e estiagem//2023 para o ponto CE-01 e para os pontos de montante (PT-57) e jusante (CE-02) localizados no rio Paraopeba.

Para o período atual, estiagem/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação: de Alumínio dissolvido, o qual apresentou percentuais superiores nos pontos de montante e jusante à confluência (PT-57 e CE-02) em relação ao tributário CE-01; Ferro dissolvido Oxigênio dissolvido, cujos percentuais foram mais elevados no tributário; e Manganês total e Turbidez, para os quais os desvios ocorreram exclusivamente no CE-01. Analisando de forma espacial e ao longo de toda a série histórica, nota-se maiores percentuais de violação no tributário, exceto para o Alumínio dissolvido. Por outro lado, observa-se percentuais semelhantes entre montante e jusante, exclusive o Oxigênio dissolvido para o qual os percentuais foram, de modo geral, superiores no ponto PT-57. Sendo assim, de acordo com o panorama verificado, infere-se que o tributário ribeirão dos Gomes/das Almas, representado pelo ponto CE-01, de modo geral, não impacta na qualidade da água do rio Paraopeba após a confluência (CE-02), durante períodos de estiagem.

Estabelecendo uma avaliação temporal, percebe-se, majoritariamente, percentuais de desvios semelhantes na estiagem/2023 em relação à estiagem/2022, apesar da moderada elevação para os parâmetros Alumínio dissolvido e Oxigênio dissolvido. Entretanto, de modo geral, os percentuais de violação oscilaram entre os períodos de estiagem comparados, mantendo-se com certa estabilidade.

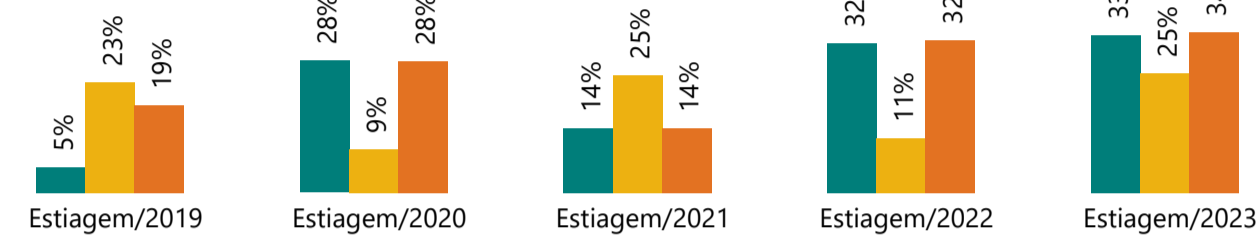
Gráfico 9.3.4-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 no CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

% Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante

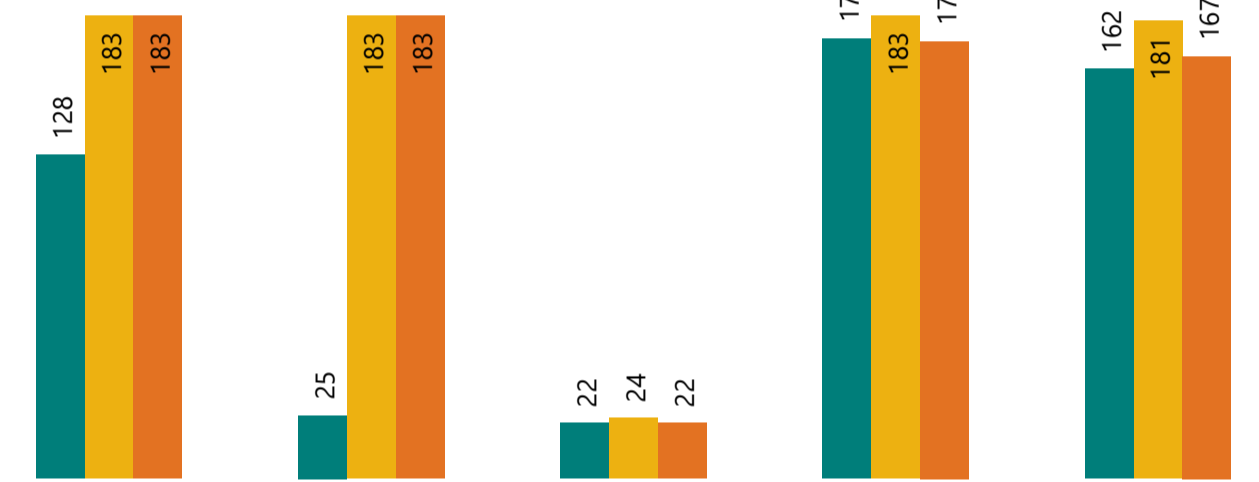
Parâmetro
Alumínio Dissolvido

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



N° amostras



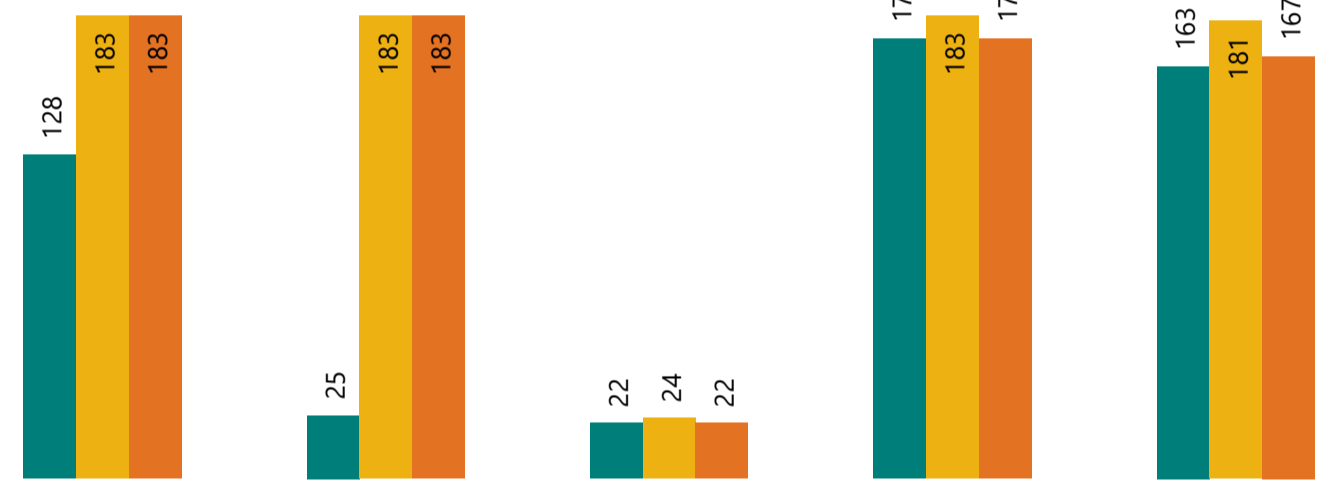
Parâmetro
Arsênio Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



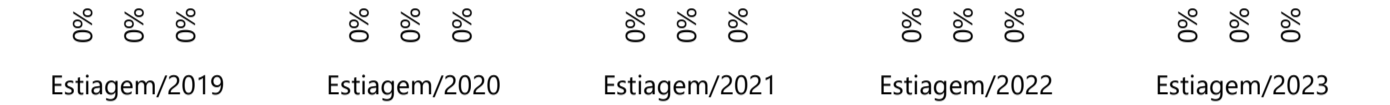
N° amostras



Parâmetro
Cádmio Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



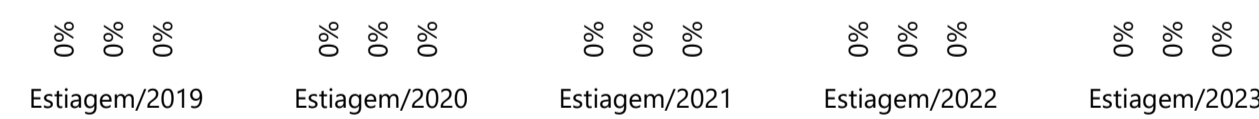
N° amostras



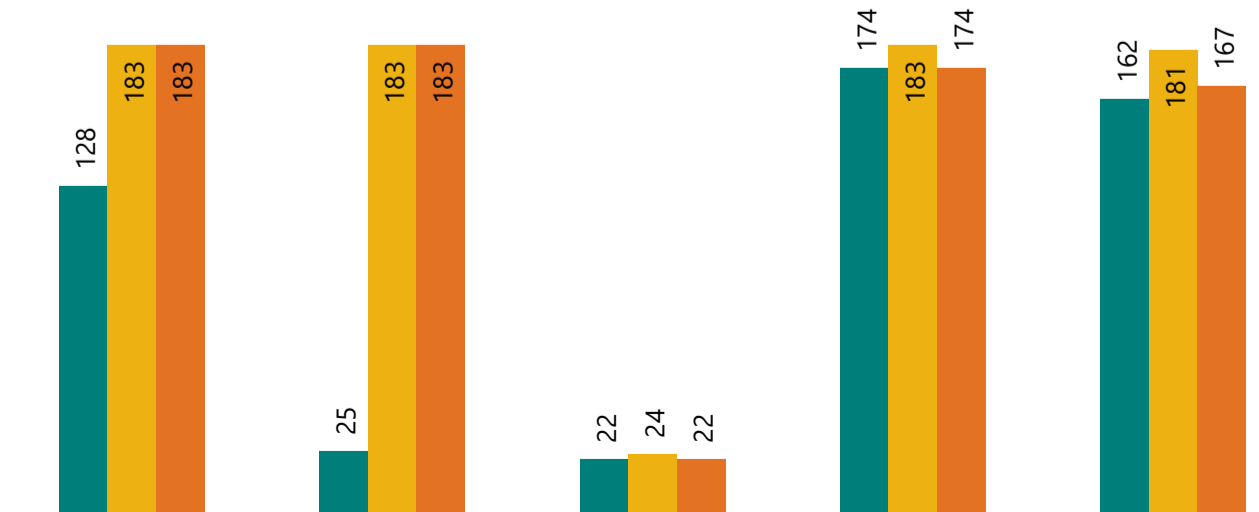
Parâmetro
Chumbo Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



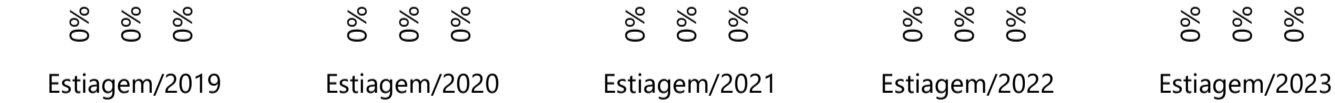
N° amostras



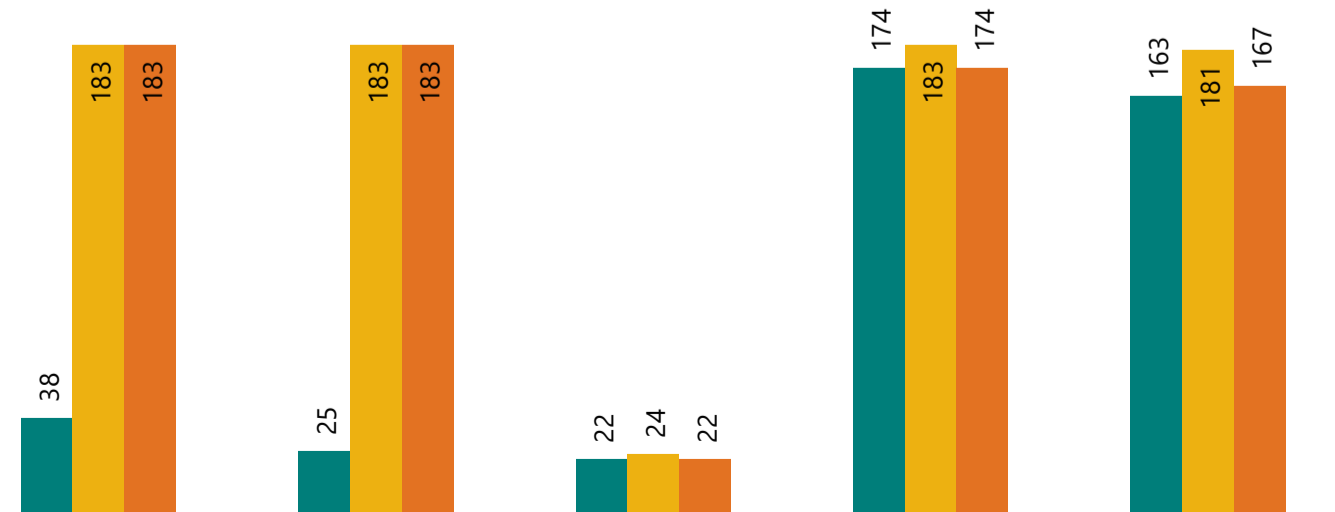
Parâmetro
Cobalto Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



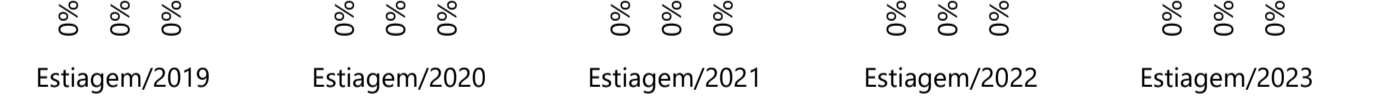
N° amostras



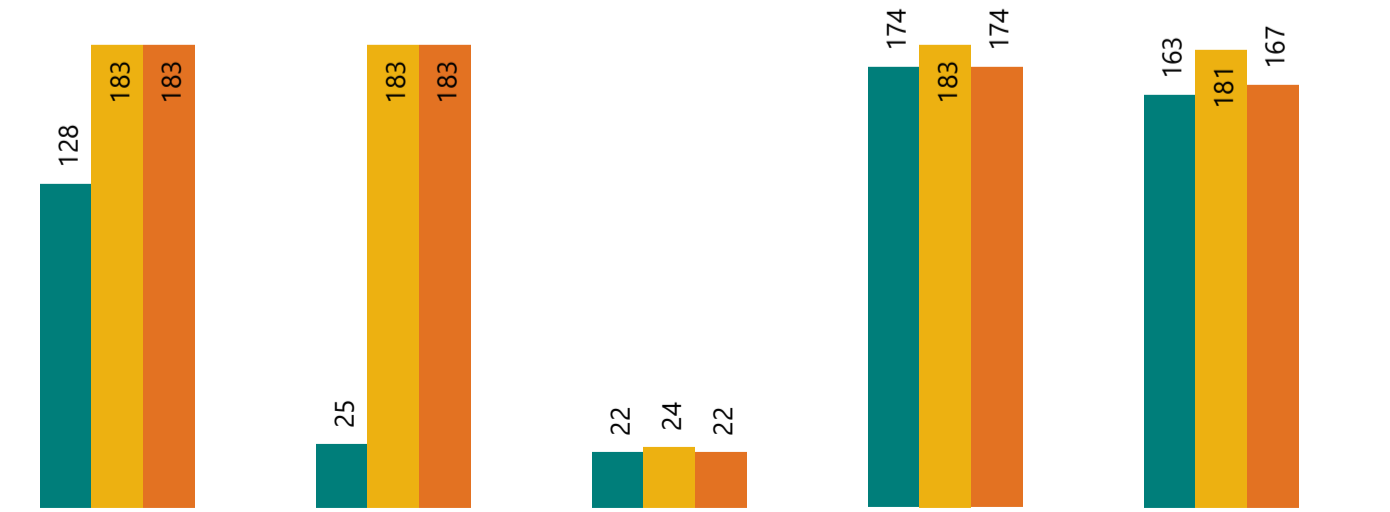
Parâmetro
Cobre Dissolvido

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



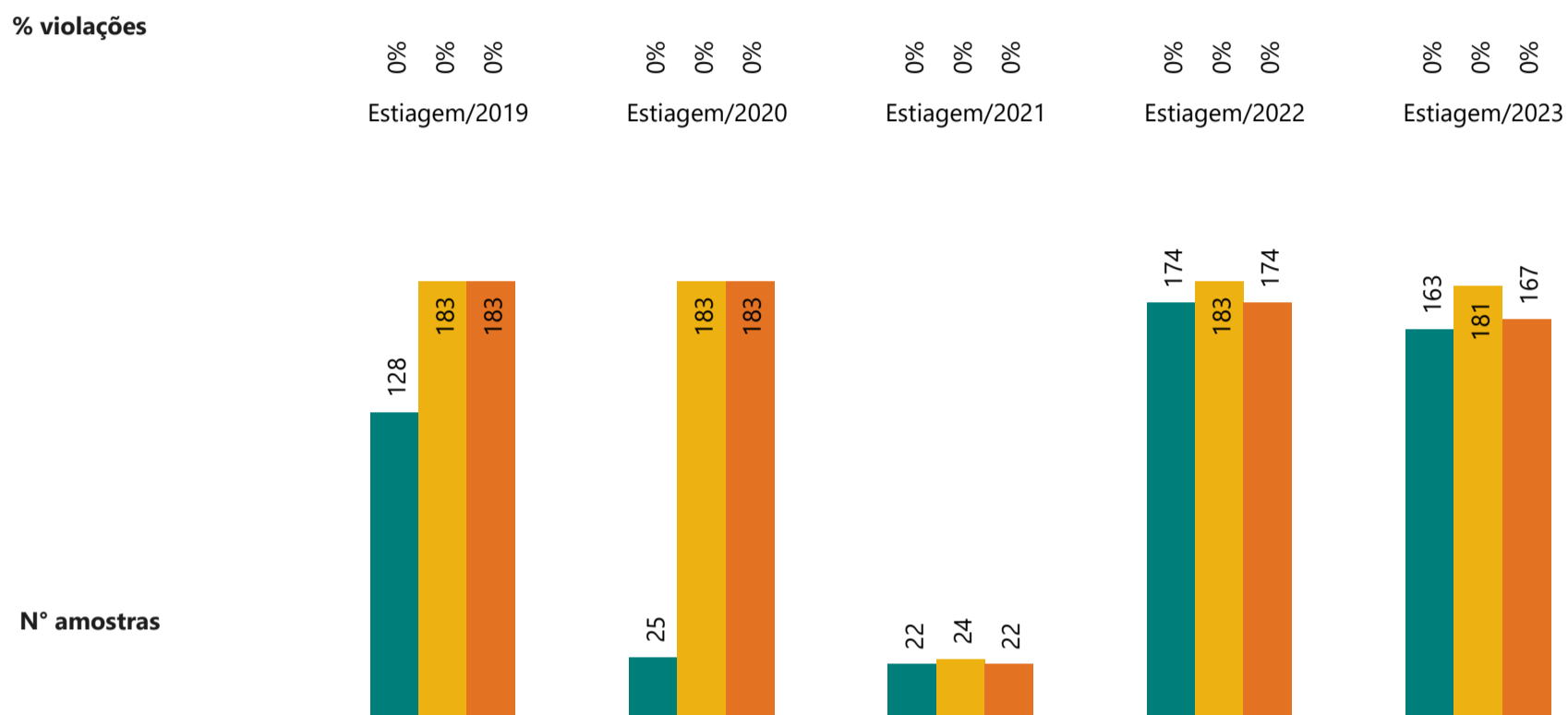
N° amostras



% Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante

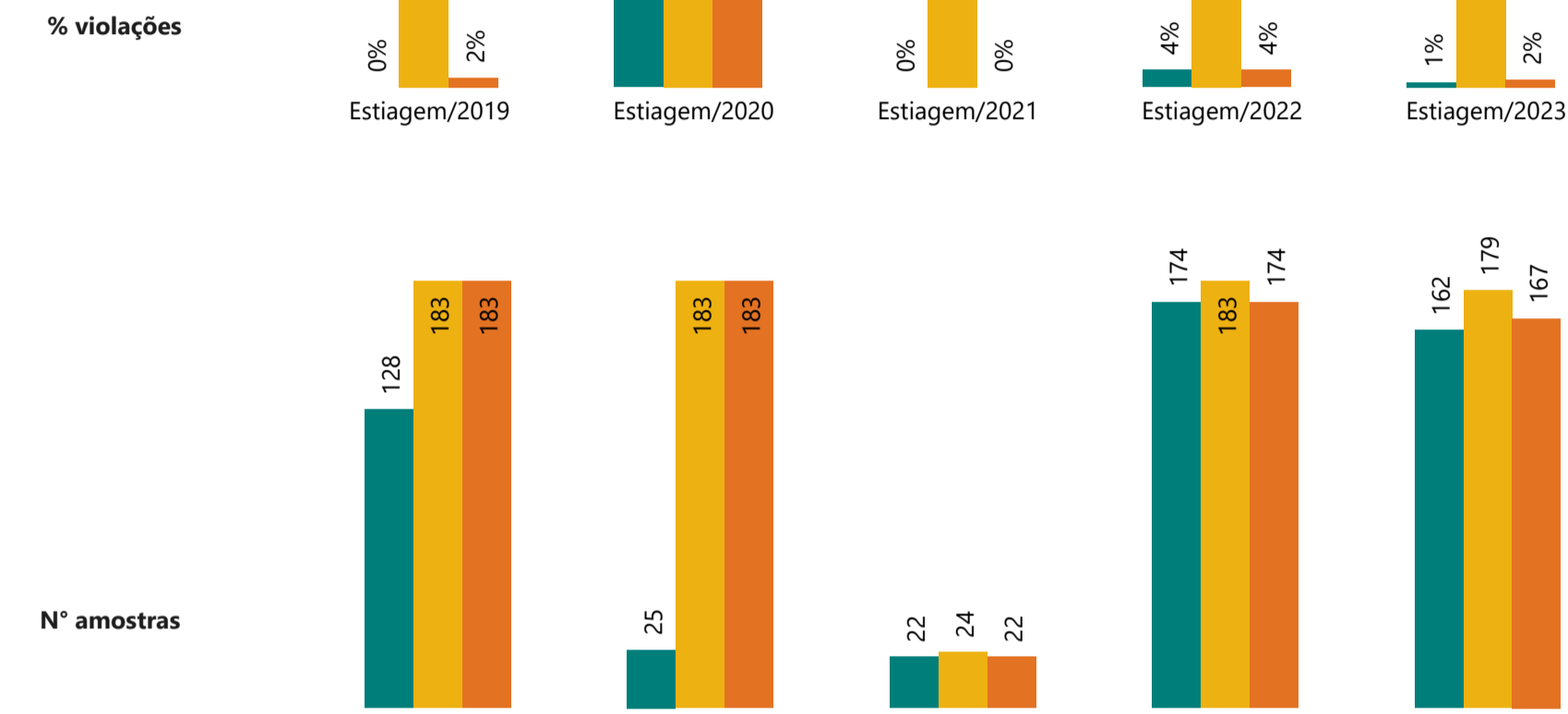
Parâmetro
Cromo Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02



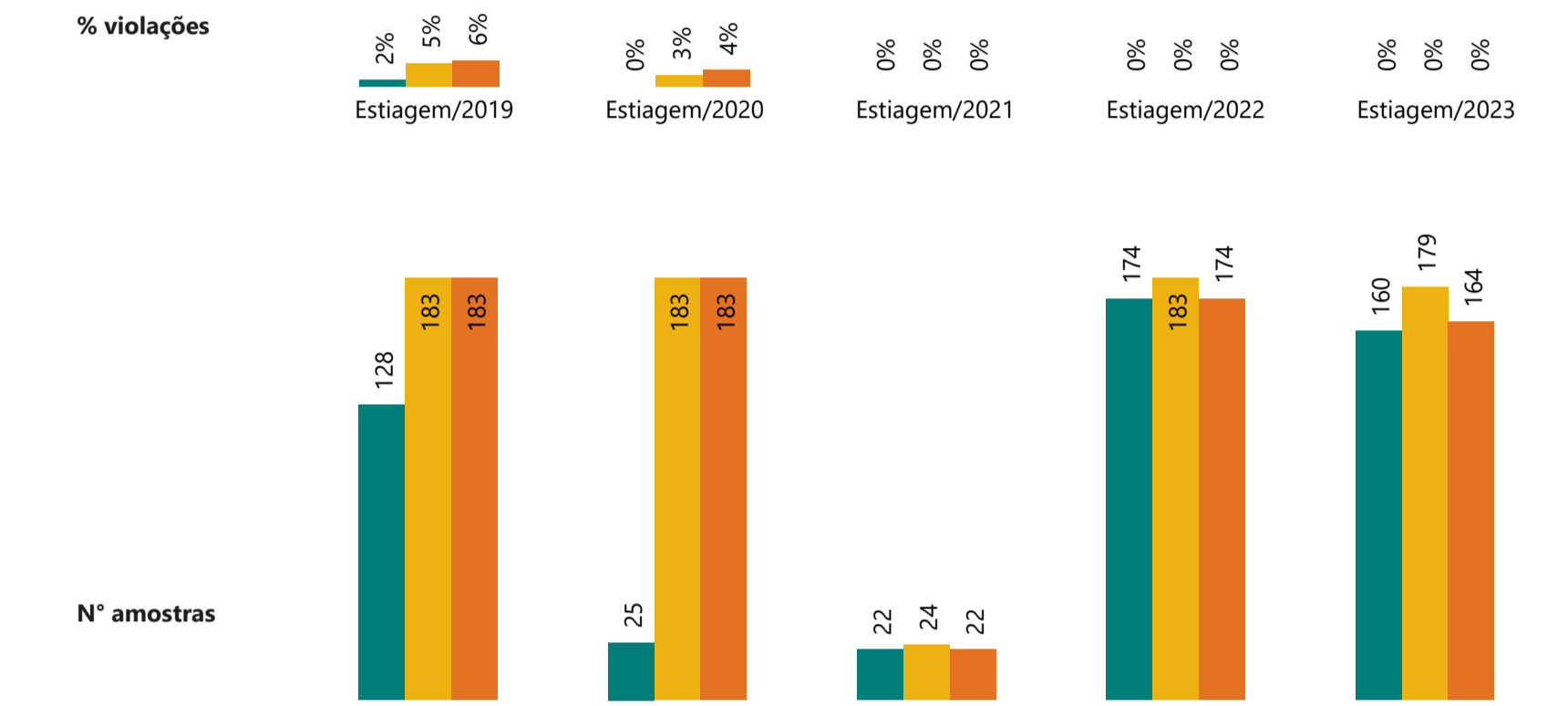
Parâmetro
Ferro Dissolvido

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02



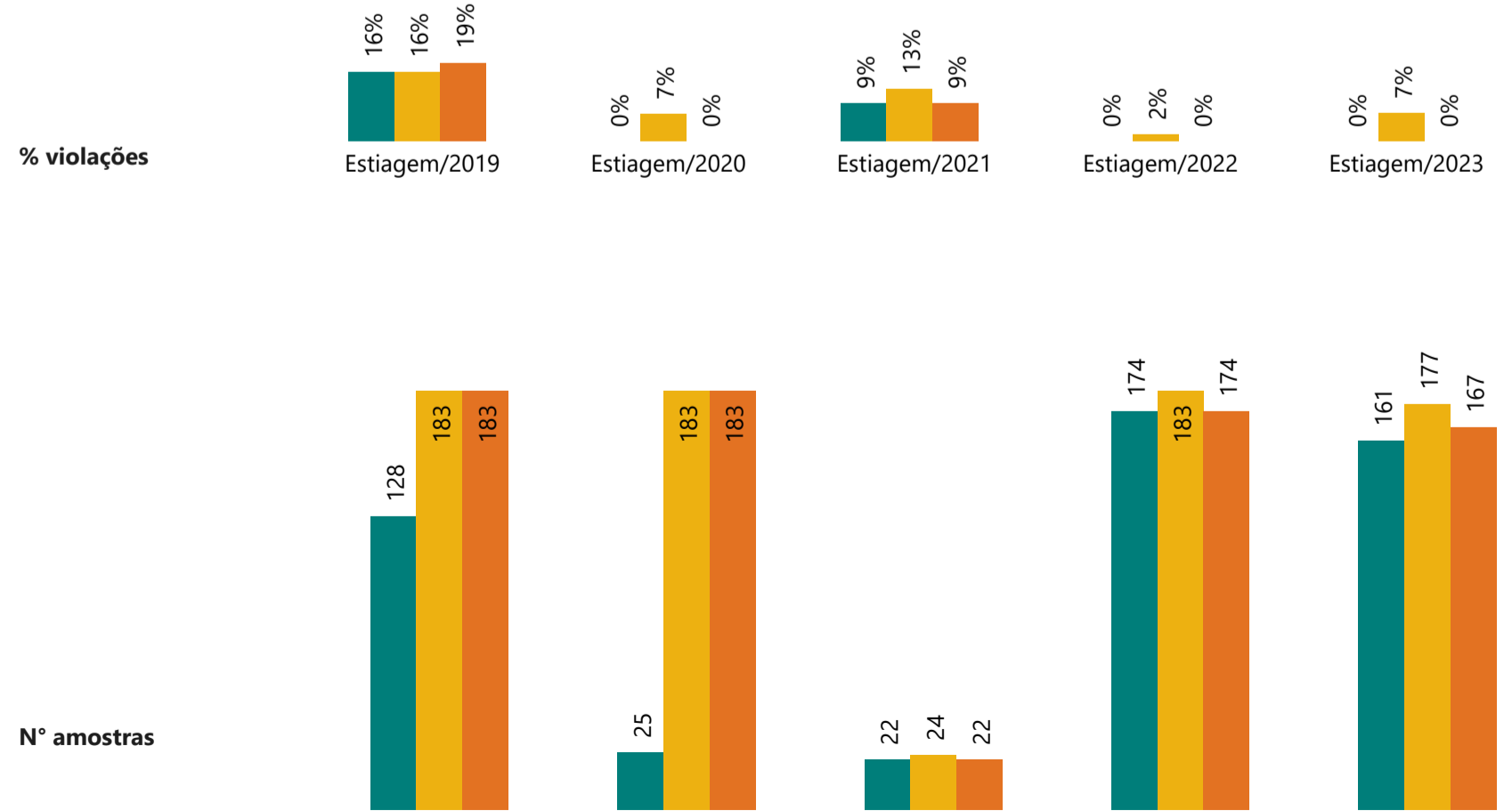
Parâmetro
Fósforo Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02



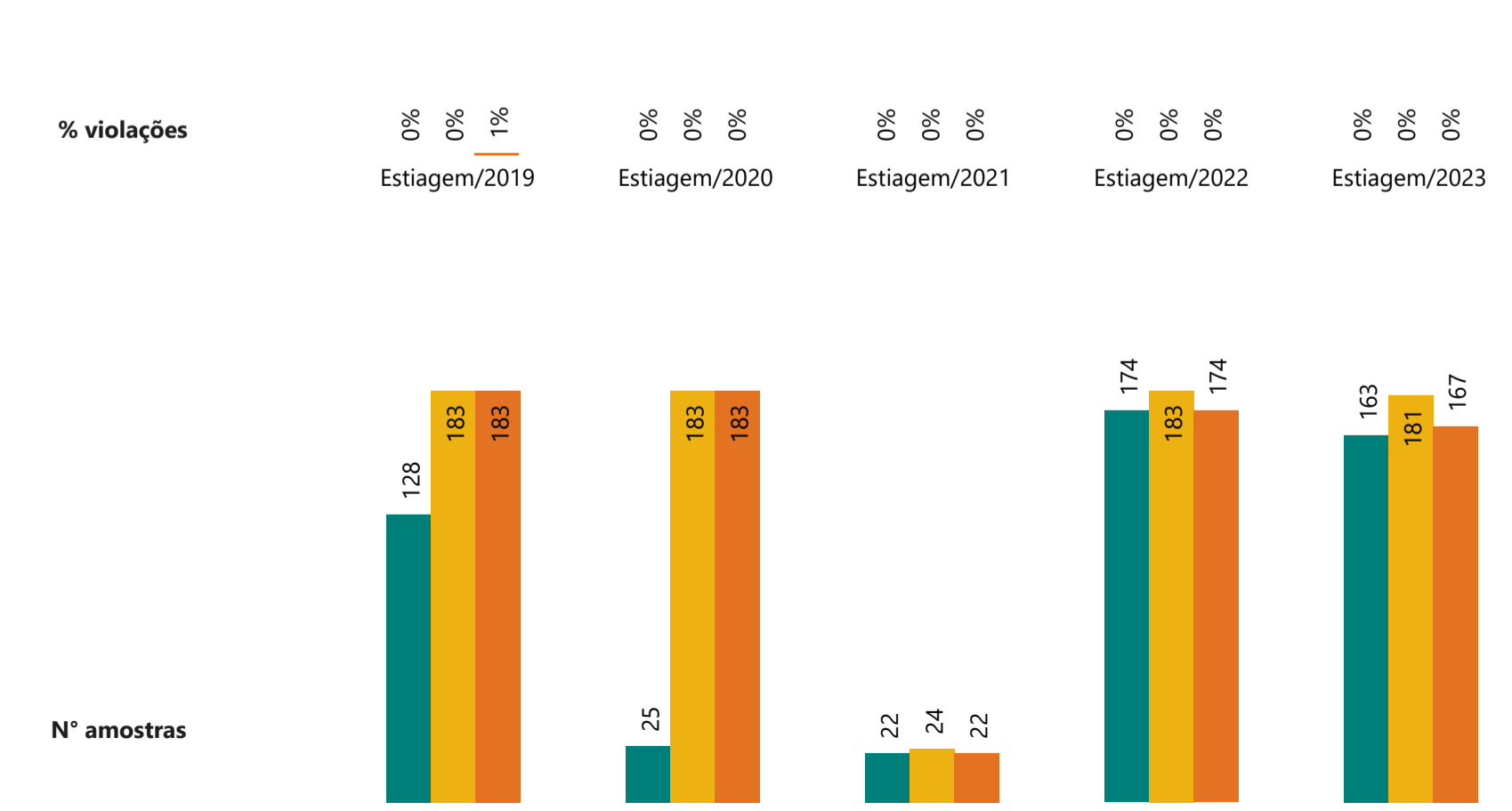
Parâmetro
Manganês Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02



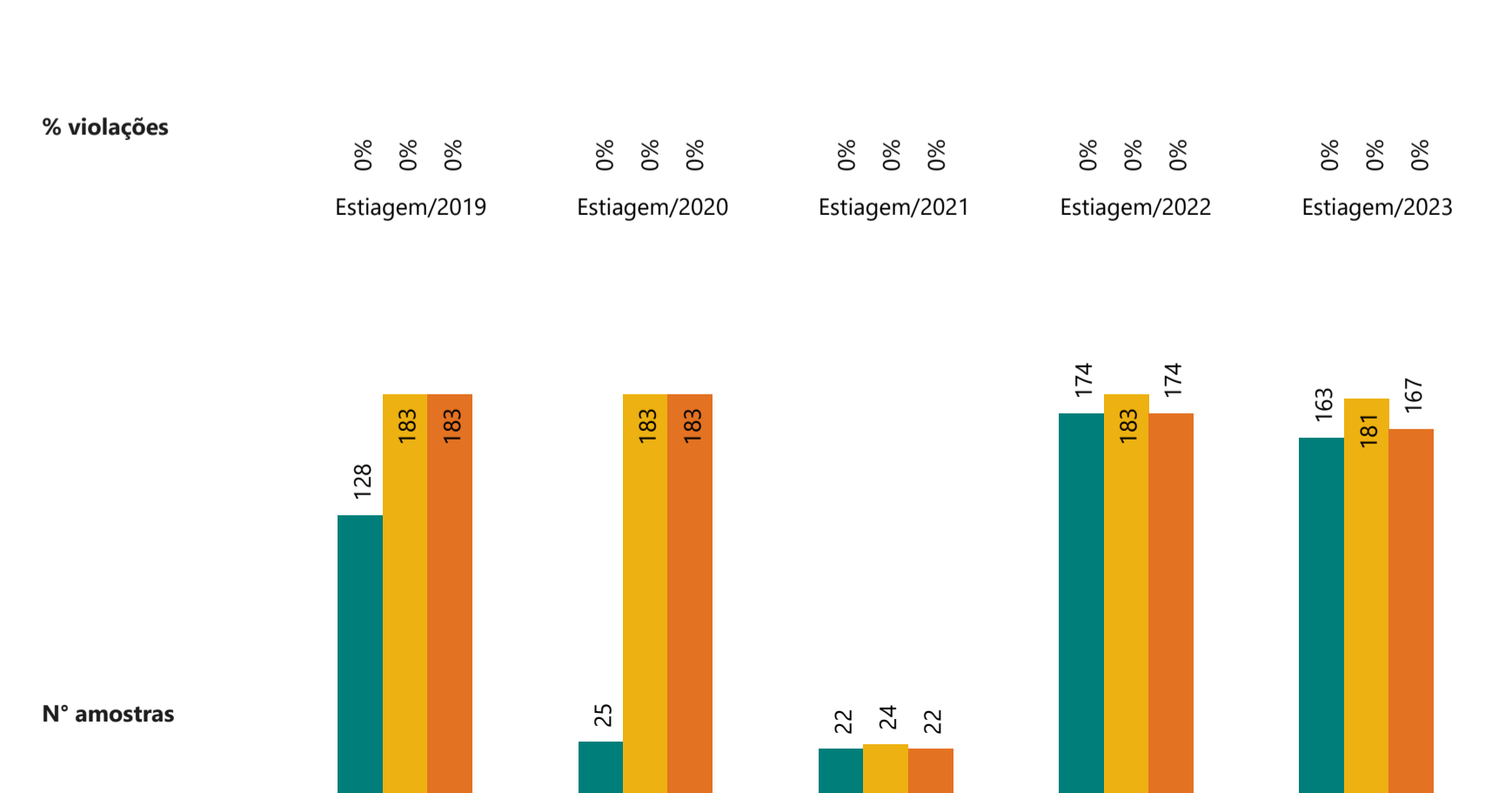
Parâmetro
Mercúrio Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02





Parâmetro
Níquel Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02



% Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 216 / 399



No **Gráfico 9.3.4-2**, são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*/Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 para o ponto CE-01 e para os pontos de montante (PT-57) e jusante (CE-02) localizados no rio Paraopeba.

Para Alumínio dissolvido, especialmente, observa-se menor dispersão dos resultados, bem como medianas mais elevadas, no ponto CE-01. Para os pontos de montante e jusante, o comportamento do metal foi similar entre si, principalmente nos três últimos períodos de estiagem. Ressalta-se o fato de que, ainda que as medianas do PT-57 e CE-02 tenham sido menores que aquelas observadas no ribeirão dos Gomes, para os períodos de estiagem/2020, estiagem/2022 e estiagem/2023, algumas concentrações elevaram o P75 nos pontos de montante e jusante, deixando essa métrica superior às observadas no CE-01 e ao VMP (0,1 mg/L) estipulado na legislação. Ainda assim, para todos os pontos e períodos, a maior parte dos resultados permaneceu abaixo desse valor. Temporalmente, nota-se moderada oscilação entre as concentrações e medianas no CE-01, com moderada elevação entre os períodos de estiagem/2022 para 2023. Para os pontos PT-57 e CE-02, observa-se uma considerável redução entre estiagem/2020 e estiagem/2021 e posterior elevação nos anos seguintes, ainda que nos três últimos períodos a mediana tenha se mantido igual ao LQ do método analítico.

Para Ferro dissolvido, nos pontos do rio Paraopeba, notou-se comportamento semelhante ao observado para o Alumínio dissolvido: valores similares entre PT-57 e CE-02, principalmente nos três últimos períodos de estiagem, e considerável redução entre estiagem/2020 e estiagem/2021 com posterior elevação nos anos seguintes, apesar das medianas iguais ao valor de LQ nos últimos três períodos. Exceto por alguns valores pontuais, as concentrações desse metal permaneceram abaixo do VMP (0,1 mg/L). Já para no ribeirão dos Gomes, é perceptível a elevação das concentrações de Ferro dissolvido em relação aos demais pontos, inclusive ao de *baseline* sazonal, e medianas próximas ao longo do período monitorado. Para todos os períodos analisados, o P25 foi próximo ou superior ao VMP, indicando que a maior parte dos resultados apresentou desvio em relação a legislação.

Os resultados indicam que, apesar dos maiores valores de Alumínio dissolvido e Ferro dissolvido observados no tributário, eles não impactam diretamente a qualidade da água no Paraopeba em períodos de estiagem.

Para o Manganês total, observa-se que o ponto de montante apresenta concentrações consideravelmente inferiores aos demais pontos monitorados, inclusive o *baseline* sazonal, principalmente nos quatro últimos períodos de estiagem nos quais, exceto por alguns *outliers*, esses valores foram iguais ao LQ do método analítico. Já para os pontos CE-01 e CE-02, temporalmente, nota-se oscilação dos valores no ribeirão dos Gomes e redução dos resultados medidos no ponto de jusante, principalmente nos dois últimos períodos de estiagem. Quando comparados entre si, há uma redução nas concentrações medidas no ponto de jusante, mais evidente nas estiagens de 2021, 2022 e 2023. Esses resultados indicam que o tributário contribui, durante períodos de estiagem, no acréscimo de Manganês total no ponto CE-02, ainda que entre

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	Folha 217 / 399

eles haja um processo de diluição dessas concentrações. Ainda assim, para todos os pontos e períodos analisados, as concentrações desse metal mantiveram-se majoritariamente abaixo do VMP e, de modo geral, próximas ou abaixo do *baseline* sazonal.

Para Turbidez, os teores medianos entre os períodos de estiagem, foram moderadamente superiores no ribeirão Gomes, quando comparados ao PT-57 e CE-02, que por sua vez apresentaram comportamento semelhante entre si. Temporalmente, nota-se, de modo geral, redução dos valores nos primeiros períodos de estiagem, voltando a se elevar durante as estiagens de 2022 e 2023. Exceto por alguns *outliers*, observados principalmente no CE-01, não houve superação dos teores de Turbidez em relação ao VMP (40 NTU) e as medianas mantiveram-se próximas ou abaixo daquela obtida para o *baseline* sazonal. Esses resultados indicam que, apesar dos teores moderadamente superiores de Turbidez observados no tributário, eles não impactam diretamente a qualidade da água no Paraopeba em períodos de estiagem.

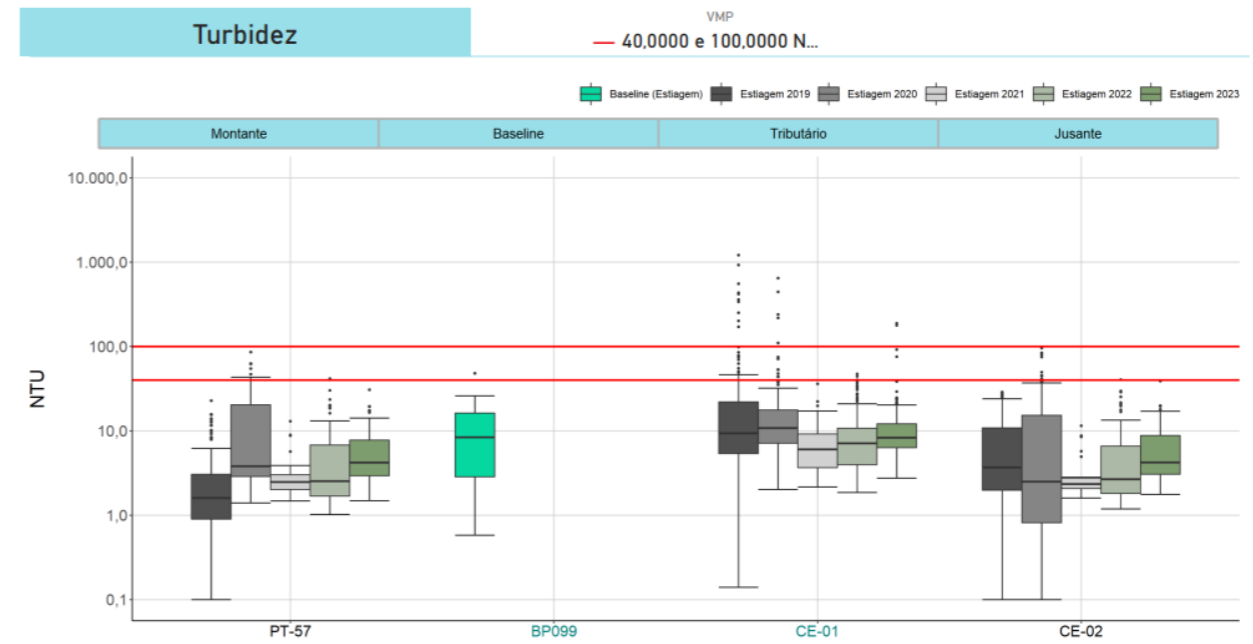
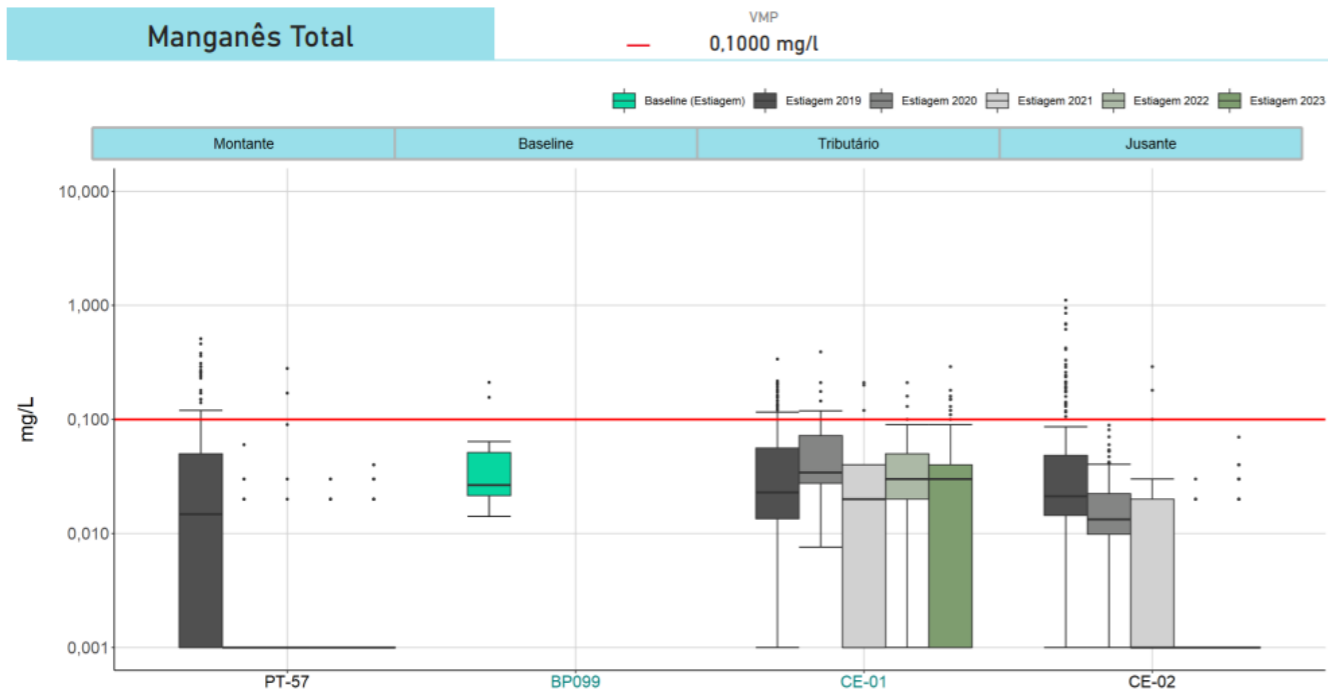
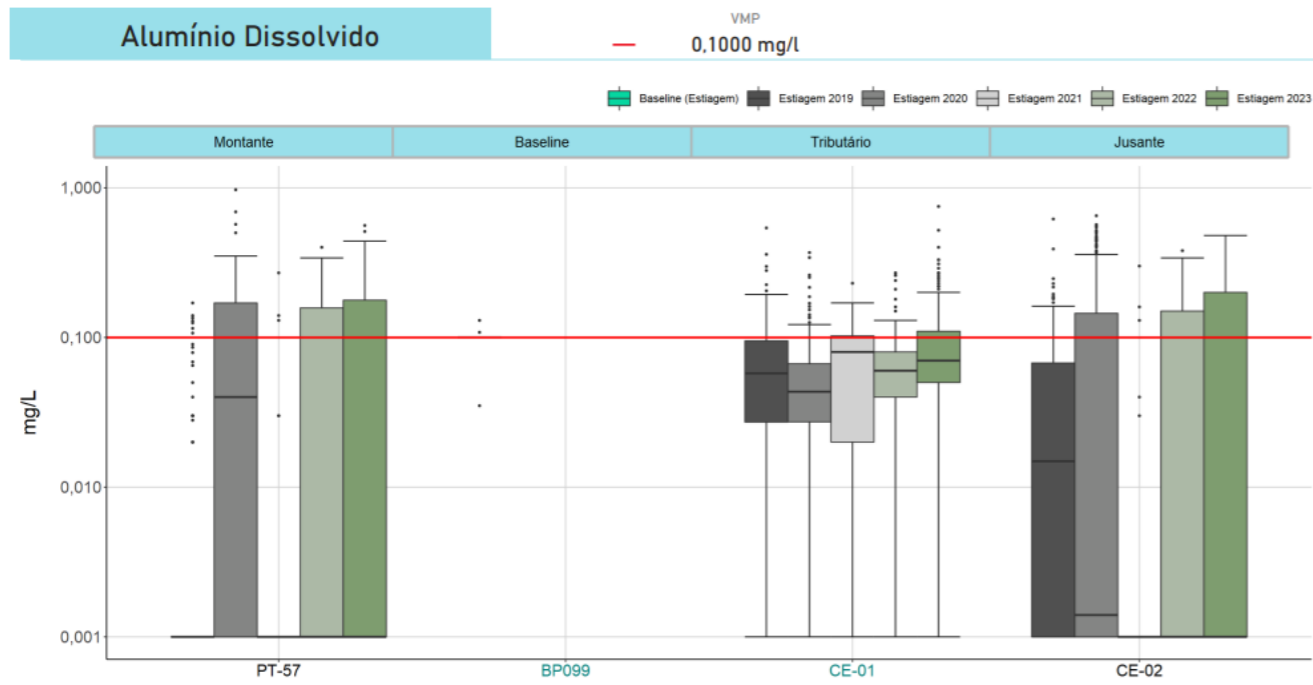
Para Fósforo total, a maior parte das medianas foram iguais ao LQ do método analítico, exceto pelos períodos de estiagem/2020 no PT-57 e estiagem/2023 no CE-01. Ainda, assim, considerando todo o conjunto de dados, percebe-se elevação das concentrações entre a estiagem/2022 e estiagem/2023. Ademais, com exceção de alguns resultados, as concentrações deste analito permaneceram abaixo do limite legal e dos teores observados no *baseline* sazonal.

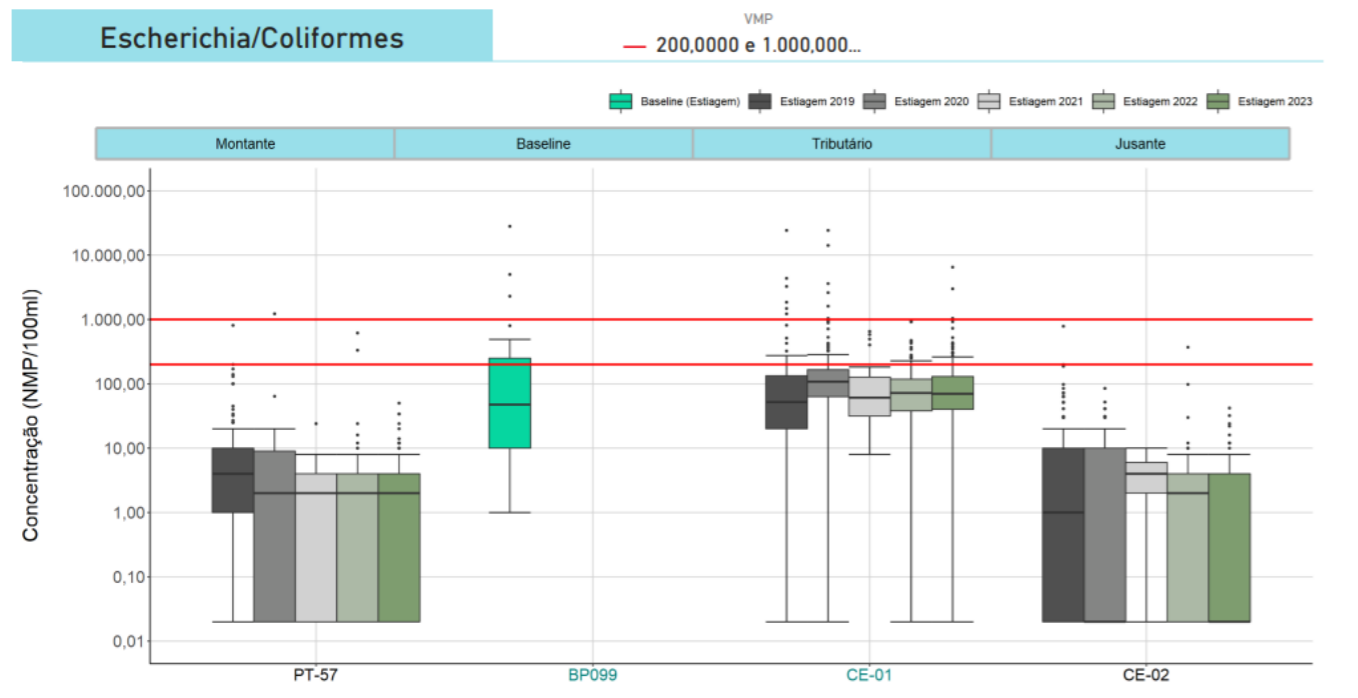
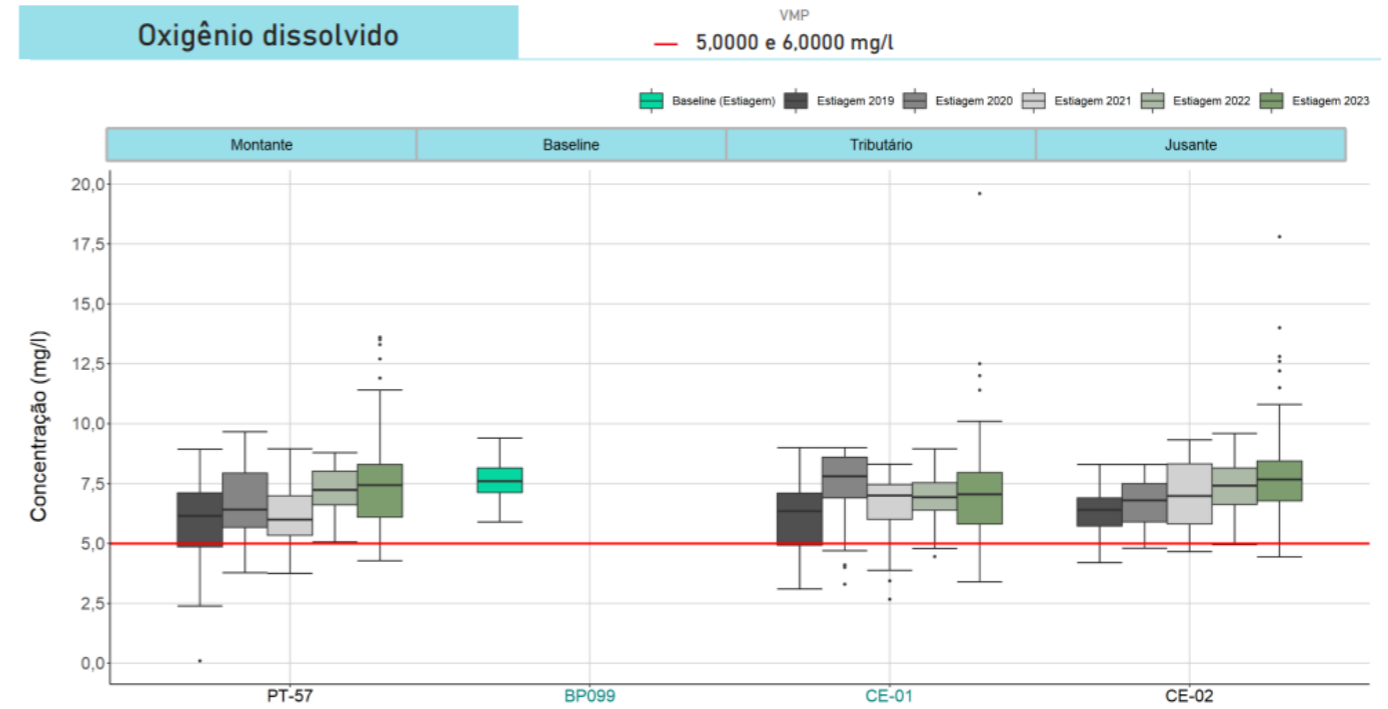
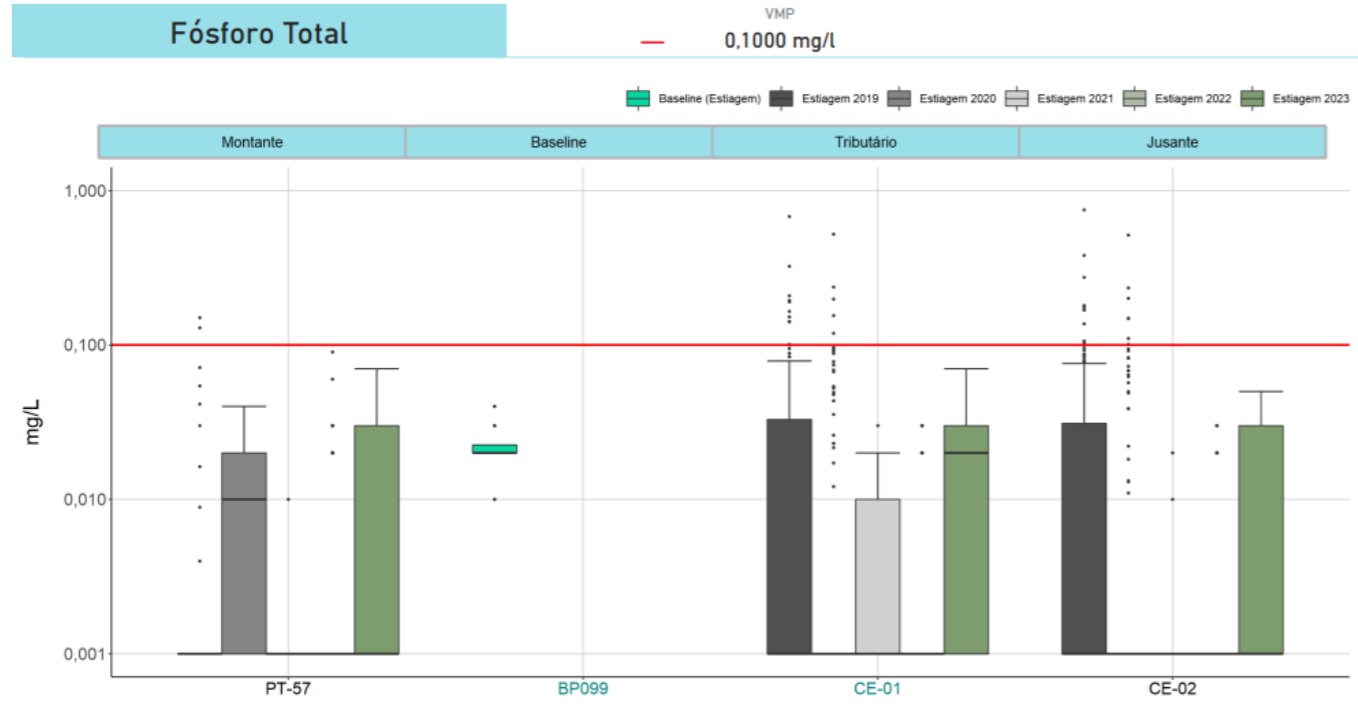
Para Oxigênio dissolvido, o comportamento e os teores medianos foram semelhantes principalmente entre o PT-57 e CE-01, que apresentaram oscilação desses valores entre os períodos de estiagem analisados. Considerando os dois últimos ciclos, nota-se aumento dos valores de OD em ambos os pontos. Para o CE-02, apesar de apresentar medianas próximas aos outros dois pontos, nota-se, temporalmente, moderada elevação nos teores medianos ao longo da série histórica. De modo geral, a referida métrica, em todos os pontos e períodos, ficaram próximas da calculada para o *baseline* sazonal. Ademais, percebe-se que a maioria dos resultados ficou acima do mínimo estipulado na legislação, indicando condições mais oxidantes nesses ambientes.

Já para *E. coli*/Coliformes termotolerantes, os resultados foram mais elevados no CE-01 se comparados aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba, enquanto esses, quando comparados entre si, apresentaram valores próximos ou inferiores no CE-02, indicando que, ainda que os resultados tenham sido mais elevados no ribeirão Gomes, esses valores não alteraram a qualidade da água no rio Paraopeba. De modo geral, a maior parte dos resultados ficou abaixo do VMP para sua referida classe de enquadramento e permaneceram próximos ou inferiores ao *baseline*. Temporalmente, para cada ponto, nota-se, de modo geral, uma manutenção das medianas observadas no PT-57 e no CE-01. Para o CE-02 as medianas oscilaram, mas apresentaram decréscimo nos três últimos períodos, principalmente entre estiagem/2022 e estiagem/2023.

Para DBO, os resultados ficaram majoritariamente abaixo do LQ do método analítico, salvo alguns valores pontuais que violaram o VMP, ao longo de todo o período analisado.

Gráfico 9.3.4-2 Boxplots- CE-01





Na **Tabela 9.3.4-1** podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para as comparações dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, DBO, *E. coli* /Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e sólidos suspensos totais entre os pontos de montante e jusante nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Tabela 9.3.4-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes

PT-57 (Mont.) X CE-02 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022	Est. 2023
Manganês Total	0,000	0,000	0,415	0,555	0,994
Ferro Dissolvido	0,000	0,003	0,984	0,873	0,896
Alumínio Dissolvido	0,000	0,391	0,962	0,572	0,704
Turbidez	0,000	0,009	0,760	0,595	0,295
Fósforo Total	0,000	0,000	0,555	0,060	0,052
DBO	0,091	1,000	1,000	0,320	0,313
EColi / ColiTermot.	0,003	0,501	0,225	0,747	0,246
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,199	0,611	0,386
Oxigênio Dissolvido	0,170	0,938	0,031	0,203	0,112
Sólidos Suspensos T.	0,000	0,007	0,937	0,956	0,003

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05). A legenda "NA" indica que não há dados suficientes para a realização do teste estatístico.

De modo geral, nos ciclos de estiagem analisados, notou-se que o parâmetro mais recorrente com diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante foi Sólidos suspensos totais. No período de estiagem mais recente (2023), ocorreram diferenças significativas entre os resultados do ponto de montante e de jusante apenas para Sólidos suspensos totais.

Estabelecendo uma análise conjunto, assim como observado para os demais tributários avaliados no **item 7.3**, percebe-se que os parâmetros majoritários são os que possuem maior frequência de diferenças significativas durante os períodos de estiagem, além do Sólidos suspensos totais que, mostra-se superior no tributário em relação ao rio Paraopeba. Dessa forma, há indícios de que o ribeirão dos Gomes pode interferir na qualidade da água do rio Paraopeba em termos dos aspectos majoritários e Sólidos suspensos totais da água.

9.4. Considerações

No ribeirão Sarzedo, representado pelo TT-02, os parâmetros que apresentaram maiores concentrações/teores se comparado aos pontos localizados no rio Paraopeba e ao *baseline* foram Fósforo total, DBO e *E. coli*/Coliformes termotolerantes, representando, portanto, uma possível fonte de contribuição para a elevação da concentração destes parâmetros no rio

Paraopeba. Destaca-se a evolução das concentrações de Oxigênio dissolvido no tributário, que se apresentava em baixos teores, inclusive inferiores a 5 mg/L (VMP), e vem aumentando no decorrer dos períodos de estiagem. Por fim, em relação às violações, percebe-se que o parâmetro com desvios mais recorrentes é o Manganês total, com resultados inconformes tanto no tributário como no rio Paraopeba, no período de estiagem/2023.

No que tange ao rio Betim, representado pelo TT-01, os pontos localizados no rio Paraopeba apresentaram relativa proximidade com os resultados do *baseline* de estiagem. Além disso, para grande parte dos parâmetros analisados, os teores medianos do ponto de jusante (PT-14) permanecem próximos ao indicado para o ponto de montante da confluência (PT-48). Similar ao cenário observado no TT-02, o TT-01 apresentou concentrações mais elevadas de Fósforo total, DBO e *E. coli* se comparado aos pontos PT-14 e PT-48, representando, uma possível fonte de contribuição para a elevação da concentração destes parâmetros no rio Paraopeba, além de uma baixa concentração de Oxigênio dissolvido. Em termos de desvios, destaca-se o Fósforo total, que teve 100% de amostras inconformes no tributário nos quatro últimos ciclos de seca (2020, 2021, 2022 e 2023).

Já no ribeirão das Abóboras/Grande, monitorado pelo TT-05 e localizado em porção da bacia com caráter mais rural, o parâmetro que se sobressaiu com concentrações mais destoantes em relação aos pontos a montante e jusante no rio Paraopeba foi o Alumínio dissolvido, o qual ficou acima do VMP desde a estiagem/2020. Os resultados do teste estatístico corroboram a análise feita através do *boxplot*, tendo em vista houve pequena ocorrência de diferenças significativas entre o ponto de jusante e o de montante para DBO.

Quanto ao ribeirão dos Gomes/das Almas, representado pelo ponto CE-01, nota-se comportamento de proximidade ou superioridade em relação ao *baseline* sazonal para os parâmetros majoritários, com destaque para Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez. Para Alumínio dissolvido os resultados tanto no rio Paraopeba como no tributário são semelhantes, tendo em vista as características geológicas/pedológicas da área de drenagem na qual o ponto CE-01 está inserido. No que diz respeito às violações no CE-01, os maiores percentuais foram vistos para Ferro dissolvido na estiagem/2023, entretanto, conforme o teste estatístico, apenas para Sólidos suspensos totais os valores foram significativamente diferentes entre si, comparando o ponto de montante e o de jusante no rio Paraopeba.

Destaca-se também, o ribeirão dos Gomes, cuja influência no rio Paraopeba não é clara e esta condição está associada à diferença de vazão entre o citado curso d'água e seu tributário. As águas do afluente são confinadas hidráulica na margem direita do rio Paraopeba e a zona de mistura se torna mais extensa, o que minimiza alterações efetivas no ponto CE-02, mas pode indicar mudanças no ponto JRB-01 localizado na mesma margem e mais a jusante. Ademais, a grande diferença de vazão aumenta substancialmente a capacidade de diluição no rio principal, embora os resultados de sólidos suspensos totais no ponto CE-01 durante os períodos de estiagem mostrem que o afluente tem qualidade da água divergente em comparação pontos de montante e jusante do rio Paraopeba.

As alterações mais expressivas nos tributários estão relacionadas aos parâmetros compatíveis com o uso e ocupação do solo, destacando-se *E. coli* e Fósforo total, oriundos, principalmente, de contribuições sanitárias. Importante destacar as influências das condições relacionadas à diluição na zona de mistura (tributário e rio Paraopeba) e, ainda, aos processos de autodepuração ao longo do corpo hídrico. Destaque deve ser dado para o rio Betim, cuja bacia apresenta marcante caráter urbano (lançamento de efluentes sanitários e industriais) que, em determinadas condições, tem potencial de refletir na qualidade da água do rio Paraopeba. Da mesma forma, pode ser citado o comportamento peculiar do ribeirão dos Gomes e que se destaca no trecho a jusante da usina de Retiro Baixo.

É importante ainda destacar que a variabilidade nas concentrações entre os pontos de montante, jusante e *baseline* pode estar associada, dentre outros aspectos, às diferentes frequências e abrangências temporais adotadas entre os monitoramentos IGAM e Vale. O monitoramento pretérito oficial disponível do IGAM apresenta frequência trimestral de coletas e análises e reporta um espaço temporal de dados mais abrangente (2000 a 2018). O monitoramento Vale, por outro lado, com histórico de frequência variando entre diário/semanal/quinzenal/mensal, permitiu gerar um conjunto de dados substancialmente superior em um intervalo de tempo menor (janeiro/2019 a setembro/2023), mas que abrange períodos sazonais de características muito díspares entre si, além do próprio efeito do rompimento nos trechos afetados. Assim, entende-se que é provável que estejam sendo observados comportamentos mais peculiares no monitoramento vigente (Vale) e que, possivelmente, não haviam sido detectados na bacia nos monitoramentos pretéritos ao rompimento (IGAM).

Finalmente, é importante destacar que os tributários são afluentes diretos do rio Paraopeba, mas, devido à diferença entre suas vazões e a do rio principal, nem sempre possuem carga (vazão x concentração) suficiente para causar alterações significativas a jusante de seus pontos de deságue, embora ainda possam gerar alterações associadas às condições de uso e ocupação típicos da bacia onde estão inseridos. Na estiagem/2023, para cada tributário, poucos parâmetros apresentaram diferença estatística significativa entre os resultados do ponto de montante e de jusante.

10. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba

10.1. Objetivo

O objetivo da avaliação granulométrica foi avaliar a sua distribuição ao longo dos períodos sazonais de estiagem e no espaço, além de servir como referência para verificação das variações das concentrações dos metais em razão do tamanho do grão.

10.2. Metodologia

A distribuição granulométrica dos sedimentos seguiu as orientações da Resolução CONAMA nº 454/2012 para material a ser dragado, que tem como referência de classificação granulométrica a escala Granulométrica de Wentworth (WENTWORTH, 1922).

10.3. Resultados

O histórico de evolução da pluma de rejeitos foi apresentado no **item 3.8**, a pluma se dissipou no rio Paraopeba até o dia 08/03/2019, quando estacionou no reservatório de Retiro Baixo (PT-21) no dia 08/03/2019. Com a estiagem/2019, as frações sólidas que estavam em suspensão se dissiparam e depositaram no leito do rio.

As condições hidrológicas dos cenários ocorridos no período de 2019 a 2023 compreendem, principalmente, nos períodos chuvosos, importantes fatores de influência para o transporte através de arraste/carreamento/suspensão de materiais da bacia, influenciados pelo escoamento superficial e vazões do rio Paraopeba. Nos períodos de estiagem, a dissipação e deposição de sedimentos em suspensão predominam ao longo do eixo longitudinal e transversal deste rio.

O início do monitoramento granulométrico ocorreu em janeiro/2019, durante o período chuvoso de 2019, marcado por precipitação regular, não intensa, mas que auxiliou no transporte de materiais pós-rompimento da barragem em janeiro/2019, os quais foram transportados por arraste como carga de fundo e suspensão até o reservatório da UTE Igarapé (ARCADIS, 2020b), além de transporte de sedimentos em suspensão até os municípios de Pompéu/Curvelo, quando adentraram no reservatório da UHE Retiro Baixo, dissipando-se na estiagem/2019. Com a chegada das chuvas de 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), um novo ciclo hidrológico começou na bacia do rio Paraopeba, este provocado por chuvas intensas em um curto intervalo de tempo e que promoveu suspensão de partículas, erosão de margens de rios, transporte de materiais por arraste/salteamento/suspensão e que, novamente, com o retorno da estiagem e diminuição do nível/vazão, tenderam a se depositar no leito e nas margens do rio Paraopeba e seus afluentes. O ciclo de chuva de 2020/2021, porém, foi caracterizado por cenário de chuvas menos intensas que o ciclo chuvoso anterior, seguido por

estação de estiagem e baixa pluviosidade até alcançar mais um novo ciclo de chuvas de 2021/2022 que, entre dezembro/2021 e fevereiro/2022, apresentou incidência de chuvas muito intensas e contínuas. Após março/2022, com a nova condição de estiagem, as chuvas se reduziram, e mais um período de deposição de materiais em suspensão continuou. Posteriormente, em outubro/2022 se iniciou o período chuvoso 2022/2023, o qual se estendeu até março/2023, este, marcado por chuvas menos intensas do que o período anterior. O último período de seca, estiagem/2023, novamente é marcado por baixa vazão e pluviosidade e pela da deposição de materiais em suspensão.

Neste documento, focou-se na análise sequencial da granulometria dos sedimentos de corrente nos períodos de estiagem/2019 até 2023 e verificou-se a evolução dessa granulometria ao longo do rio Paraopeba. Os resultados das análises granulométricas dos sedimentos totais coletados no rio Paraopeba, foram divididos por períodos sazonais de estiagem, incluindo os períodos de 01/04/2019 a 30/09/2019 (**Gráfico 10.3-1**), 01/04/2020 a 30/09/2020 (**Gráfico 10.3-2**), 01/04/2021 a 30/09/2021 (**Gráfico 10.3-3**), 01/04/2022 a 30/09/2022 (**Gráfico 10.3-4**) e 01/04/2023 a 30/09/2023 (**Gráfico 10.3-5**), entre o ponto de monitoramento PT-52, próximo a ponte de Melo Franco em Brumadinho, região a montante do rompimento e o PT-22, localizado na entrada do reservatório da UHE Três Marias, entre os municípios de Felixlândia e Pompéu.

Em relação aos pontos de monitoramento avaliados tem-se a ponderar que os PT-50 e PT-51 foram descontinuados em março/21; os PT-04 e PT-56 foram descontinuados em novembro/2021; o ponto CE-02 teve a suspensão da amostragem de sedimentos de fundo, conforme Plano de monitoramento Emergencial (PME) revisão 23 e alinhamento na Sessão Técnica-AECOM em 29/06/2022 e o ponto JRB-02 foi integrado ao monitoramento conforme PME revisão 24. Conforme Plano de monitoramento Emergencial (PME) revisão 26, e em atendimento a proposição da AECOM feita através do Relatório de Auditoria 46, foram inseridos na malha amostral, os pontos PT-59, PT-60, PT-61 e PT-62. Por fim, conforme Plano de monitoramento Emergencial (PME) revisão 27, houve a exclusão do ponto PT-47E, a partir de 01/04/2023.

Destaca-se ainda que, entre os anos de 2019 e 2023, não houve dados para alguns pontos de monitoramento. Isso ocorre por diversas razões, tais quais: ausência de material sedimentar disponível para coleta em ponto de monitoramento de fundo rochoso; acesso inseguro ao ponto de monitoramento; ausência de acesso ao ponto de monitoramento e condições inseguras para coleta. Portanto, a análise do comportamento granulométrico espaço-temporal dos pontos de monitoramento pode apresentar limitações em algumas regiões/pontos para períodos específicos ao longo da bacia do rio Paraopeba. As informações referentes aos pontos não coletados estão destacadas em cada gráfico, referente a cada período de monitoramento.

A partir do **Gráfico 10.3-1**, constatou-se que no período de estiagem/2019, que integra o período de estiagem após o rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A. O ponto PT-52, localizado na Região Montante, tendeu a refletir a dinâmica natural da bacia, composto em sua maioria por materiais finos, sobretudo

silte. Na maior parte dos pontos notou-se a predominância de sedimentos siltosos, exceto do PT-43 ao PT-49 (Região 2A) no qual a fração areia (grossa a muito grossa) foi mais expressiva. Apesar desses locais estarem posicionados em porções mais sinuosas do rio, os sedimentos tiveram predominância de frações arenosas, possivelmente por conta de a posição da coleta ter sido na porção central do rio ou até mesmo, de potencialmente, ter uma maior declividade nesta região. No restante do perfil prevaleceu sedimentos de granulometria silte, incluindo as deposições dentro do reservatório da UHE Retiro Baixo que, por sua característica mais lântica, permitiu a deposição de materiais mais finos. Entre PT-01 e PT-15, a granulometria fina (silte e argila) pode ser resultante de coletas em margem de rio, onde, devido a menor velocidade de transporte do rio, se depositaram os sedimentos mais finos. No PT-22, Região 2C, foi observado um padrão de acúmulo de sedimentos na fração silte.

No **Gráfico 10.3-2**, que aponta para o período de estiagem/2020, notou-se predomínio das frações granulométricas siltosas, exceto na Região 2A, entre os pontos PT-53 e PT-16, PT-18 e PT-49, onde predominaram sedimentos mais grossos (areia muito fina a muito grossa). Os materiais mais grossos podem estar relacionados às posições de coleta ao longo da porção central do rio ou a uma mudança na dinâmica natural do rio decorrente das chuvas que atingiram a região no período chuvoso torrencial de 2019/2020 que antecedeu a estiagem/2020. Tendo em vista esse contexto, este período de estiagem foi o que mostrou os menores teores de argila, inclusive com alguns pontos não apresentando tal fração em seu perfil. A granulometria fina (silte e argila) indicada entre os pontos PT-11 e PT-12 pode estar relacionada às coletas terem ocorrido em margem de rio, porém dentro da área coberta pelo rejeito, e ao próprio rejeito depositado no leito do rio, onde potencialmente se depositaram materiais finos e rejeitos da rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, devido à menor velocidade de transporte do rio e ao rompimento próximo, respectivamente. Além disso, esses pontos estão localizados próximos ao barramento Estaca Prancha, local de acumulação de sedimentos, assim como os pontos do reservatório da UHE Retiro Baixo (PT-20 ao PT-21, Região 2B), que também são localizados em ambientes de baixa energia que possibilita a deposição de argila e silte. Na Região 2A, a fração siltosa foi predominante nos pontos PT-17 e PT-19, apontando pouca contribuição de argila em toda a região. No PT-22 (Região 2C) foi observado um padrão de acúmulo de sedimentos na fração silte (87,11%).

De acordo com as avaliações realizadas nas amostras compostas de sedimentos de fundo coletados por CPRM (2020), entre 2019 e 2020, nas estações de Alberto Flores (próximo ao PT-01), Mário Campos (entre PT-03 e PT-05), Ponte Nova do Paraopeba (próximo ao PT-15) e São Joaquim de Bicas (próximo ao PT-48) notou-se que a granulometria antes do rompimento da barragem foi maior do que após a ruptura da barragem nos pontos de coleta da CPRM. Já no caso de Ponte da Taquara (próximo ao PT-18), a granulometria antes e após a ruptura foi equivalente. Ao se verificar as avaliações deste relatório percebeu-se que, de um ano para o outro, a granulometria nesses mesmos pontos coletados de forma simples foi mais grossa, corroborando com as observações da CPRM (2020).

O **Gráfico 10.3-3** apresenta os dados para a estiagem/2021, período que sucedeu as chuvas menos intensas de 2020/2021. A Região 2A seguiu o mesmo padrão dos ciclos anteriores, com

predominância de materiais mais grossos (areia muito fina a grossa). Tal predomínio desses materiais grossos podem relacionar-se aos aspectos morfológicos da drenagem, em trecho de caráter lótico, e ainda, por vezes, a amostragem na porção central do canal do rio, o qual possui maior energia de transporte e arraste de material de fundo e acumula potencialmente sedimentos mais grossos, além da influência do período chuvoso anterior. De modo similar, essa predominância de materiais mais grossos também ocorreu nos pontos PT-01, PT-13, PT-09, PT-05 e PT-48, que exibiram mais de 50% de sedimentos nas frações areia, também relacionados aos trechos de característica mais lótica do rio e coleta em posição central.

Os pontos nas proximidades do barramento Estaca Prancha (PT-11 e PT-12), PT-02 (Região 1A), nas proximidades da UTE Igarapé (PT-14), a jusante da UTE Igarapé (PT-15 e PT-53) e no reservatório UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21) apresentaram os maiores conteúdos de argila para o período, em função de serem locais propícios para a deposição de sedimentos finos em suspensão. Com exceção da Região 2B, que possui condição mais lântica (intermediária) por conta do reservatório da UHE de Retiro Baixo, UTE Igarapé e da Região Ferro-Carvão, cujo ribeirão homônimo foi contido por uma cortina metálica (barramento Estaca Prancha), as demais localidades até a Região 2A estão em trecho lótico, afetado pelos rejeitos do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, que também contêm materiais de granulometria fina. Além desses, o PT-22 (Região 2C) também apresentou elevado conteúdo de materiais finos, possivelmente devido a condição de solo desnudo na região e deposição de finos provenientes de locais a montante desse ponto; além disso, essa localidade encontra-se na entrada do reservatório da UHE Três Marias, que por estar em área de remanso pode favorecer a deposição de finos.

O **Gráfico 10.3-4** indicou os resultados para o período de estiagem/2022, posterior a um intenso período de chuvas (2021/2022). Neste ciclo de estiagem foi possível observar uma redução das frações mais grossas de areia (grossa e muito grossa) ao longo de todo o trecho, possuindo, entretanto, quantidade expressiva de areia muito fina a média, em comparação ao período de estiagem anterior. A Região Montante apresentou manutenção das proporções de materiais finos e sedimentos mais grossos observada na estiagem anterior (2021), bem como na Região Ferro-Carvão, em que há predomínio de silte e argila. A Região 1A (PT-01 ao PT-05) apontou um predomínio das frações arenosas, exceto o PT-02, o qual, devido às condições morfodinâmicas do rio, bem como a presença de uma ponte a montante, se torna propício para redução do fluxo (remanso) a deposição de sedimentos finos (argila e silte). Já a Região 1B predominaram os sedimentos siltosos, porém ainda com contribuição de areia. Nessa região, o PT-14 e o PT-15 foram os pontos que mais acumularam sedimento devido as condições do rio, visto a influência da UTE Igarapé e da sinuosidade do rio, respectivamente. A Região 2A, extenso trecho lótico, tem predomínio das frações areia muito fina a média. Os pontos PT-17 e PT-18 indicaram concentração de silte nesse período, provavelmente, ocasionado pelo barramento dos sedimentos pela estrutura das pontes que caíram próximas aos pontos de coleta. Já as regiões 2B e 2C estavam compostas praticamente de silte e argila. O ponto JRB-02 ainda possuía cerca de 20% da fração arenosa.

O **Gráfico 10.3-5** aborda o ciclo de estiagem/2023 que apresentou similaridade com o período anterior (estiagem/2022), com manutenção da redução das frações mais grossas quando comparados aos períodos antecedentes a 2022. Na estiagem/2023, todas as regiões mantiveram-se com comportamento semelhante a estiagem/2022, a saber Região Montante com predominância de silte; Ferro-Carvão com predomínio de silte e argila; nas regiões 1A e 1B, predomínio da fração silte com contribuições de areia muito fina e fina, exceto no PT-02 que apresentou maiores concentrações de silte e argila, visto que o local de coleta está em região sinuosa, que contém sedimentos; a Região 2A manteve-se com predomínio das frações de areia fina a média; Região 2B com predomínio de silte e argila, que são frações mais finas e predominantes nesta localidade e por fim, a Região 2C, representada pelo PT-22, em região de remanso e também apresentou predomínio das frações silte e argila.

Gráfico 10.3-1 Variação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019.

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/04/2019 a 30/09/2019

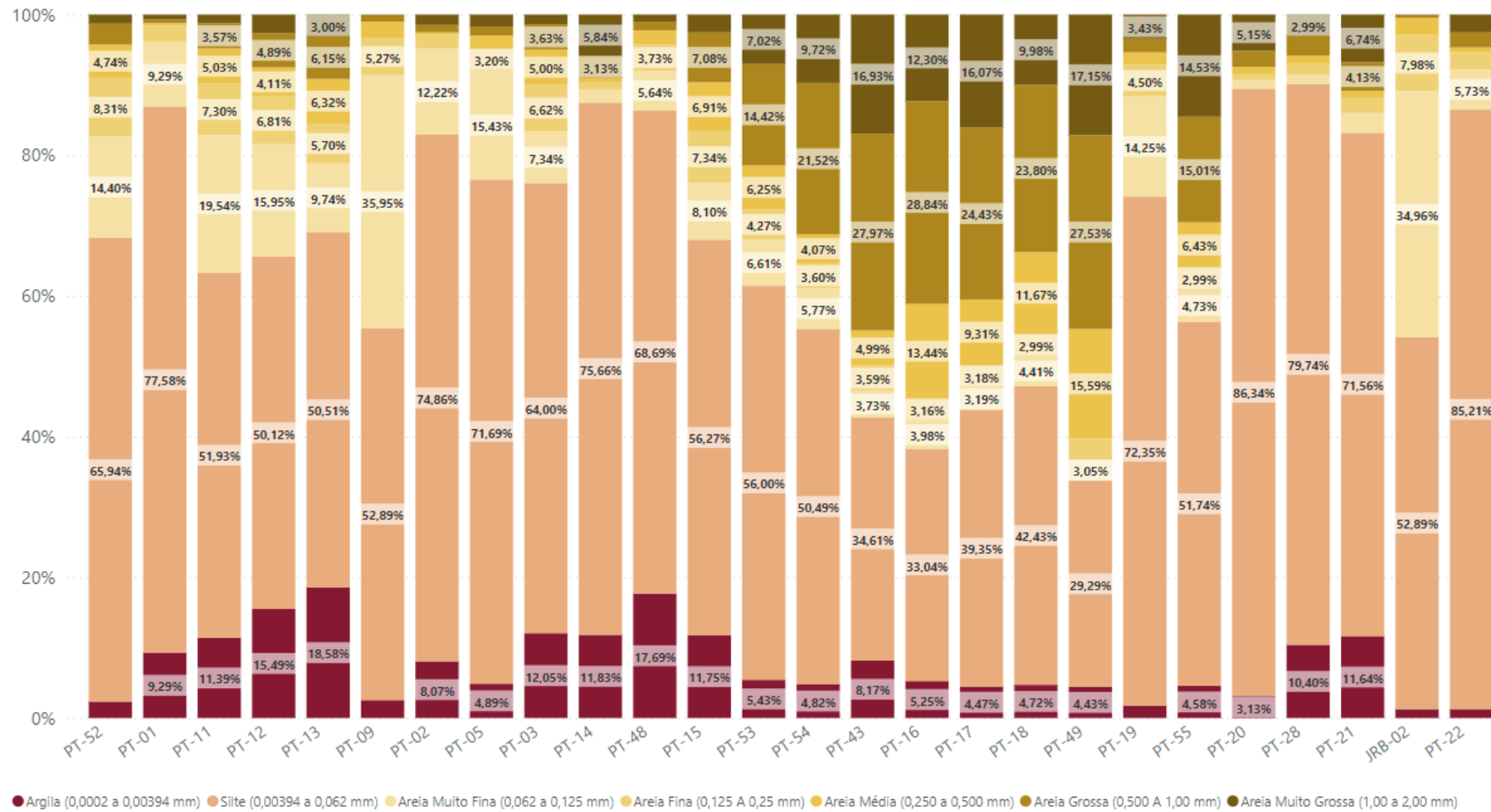
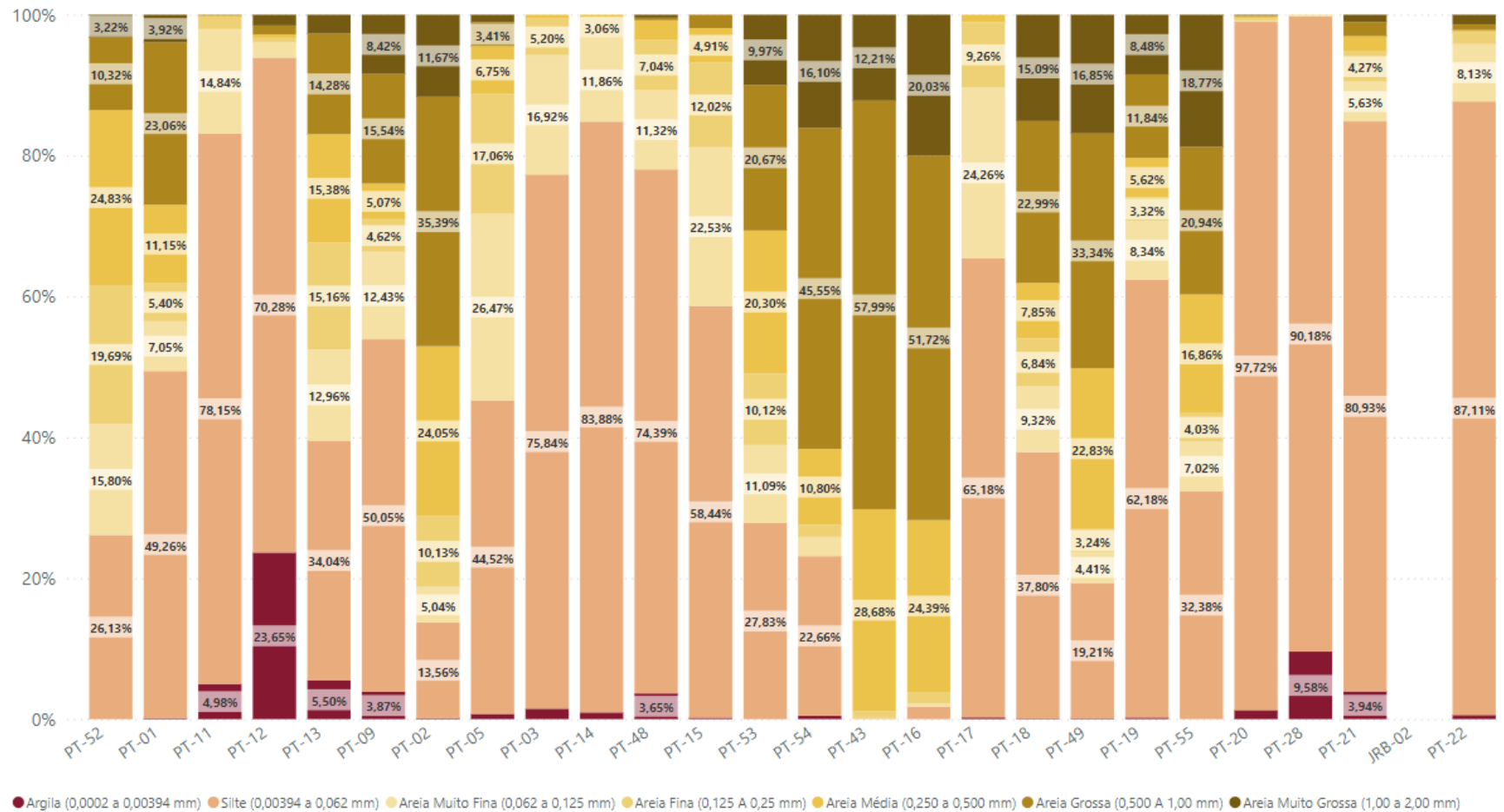


Gráfico 10.3-2 Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020.

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/04/2020 a 30/09/2020



Nota: não houve amostragem de sedimento do ponto JRB-02 devido a presença de fundo rochoso.

Gráfico 10.3-3 Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021.

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/04/2021 a 30/09/2021

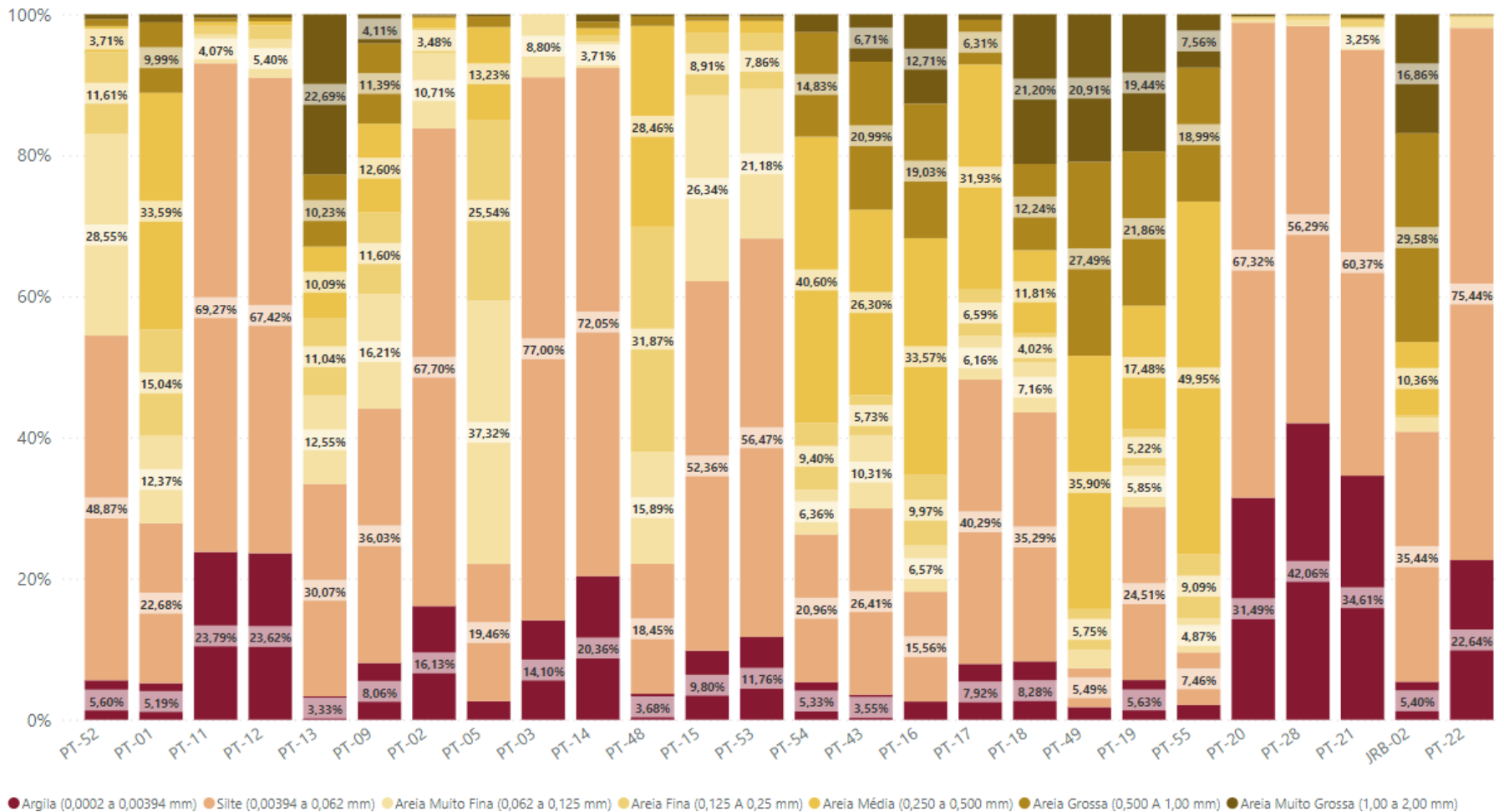


Gráfico 10.3-4 Variação granulométrica no período de abril/2022 a setembro/2022.

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/04/2022 a 30/09/2022

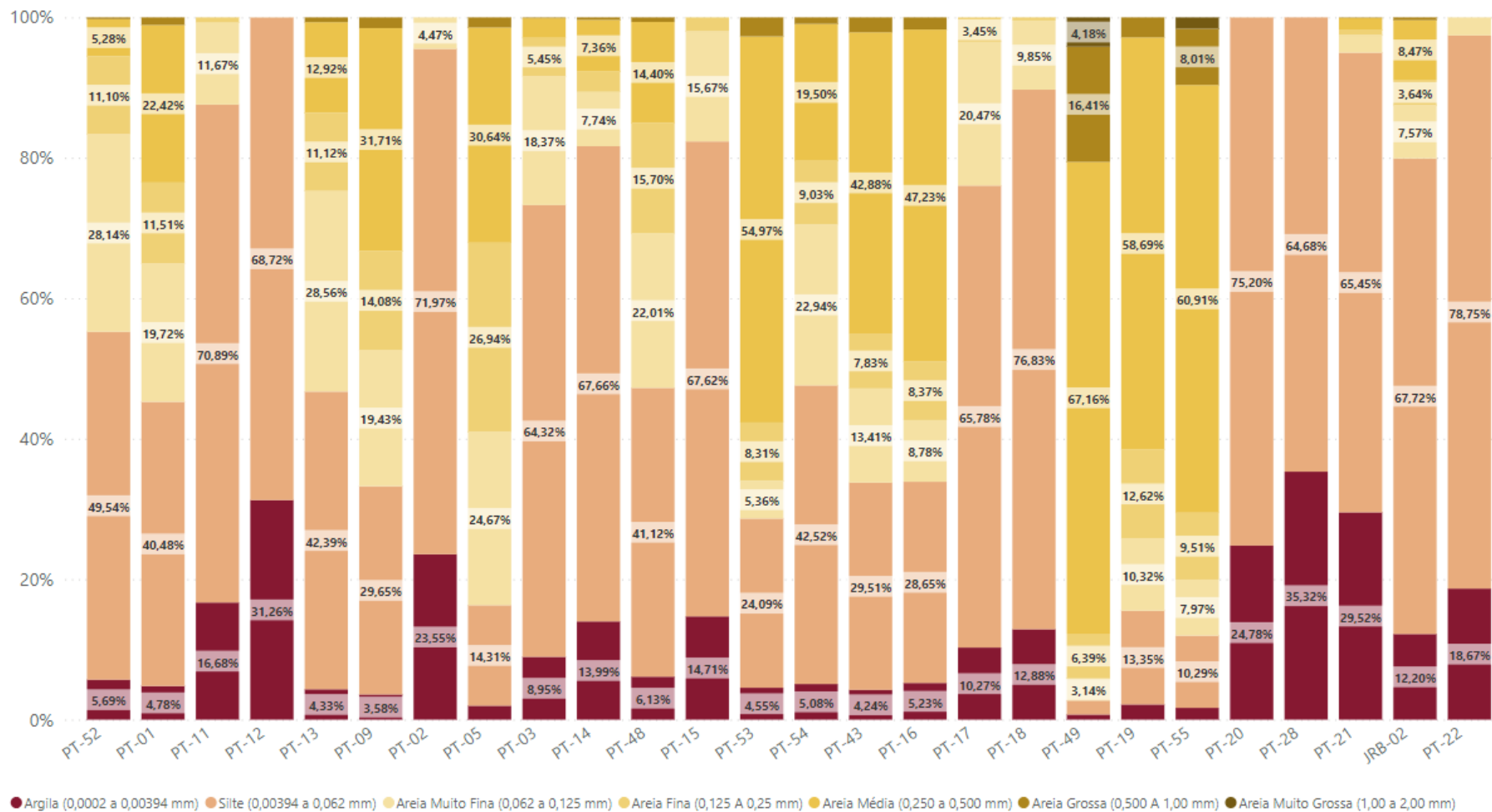
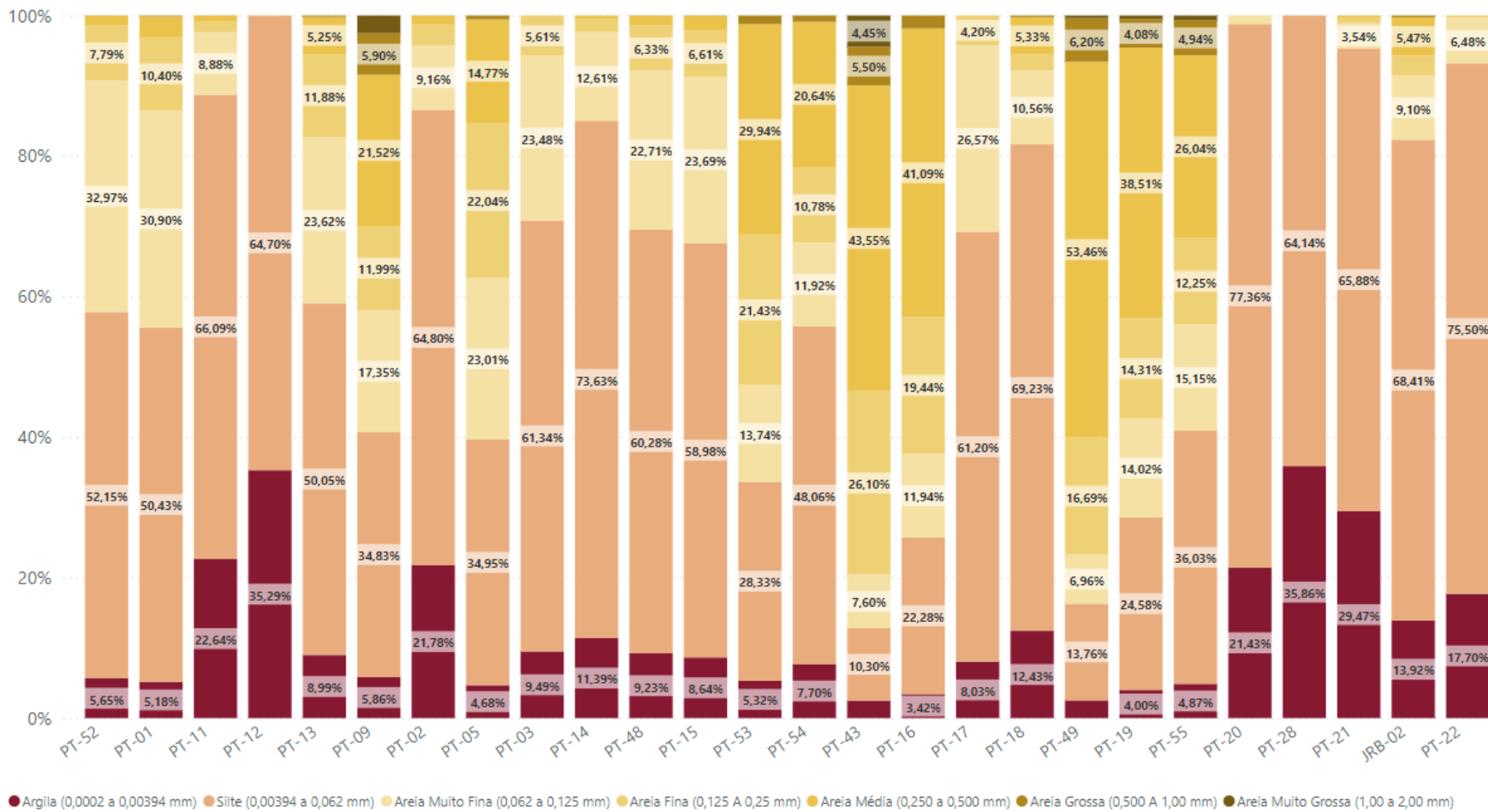


Gráfico 10.3-5 Variação granulométrica no período de abril/2023 a setembro/2023.

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/04/2023 a 30/09/2023



10.4. Considerações

A análise da distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo, coletados com draga, ao longo do rio Paraopeba, no decorrer dos períodos de estiagem (abril a setembro) dos anos de 2019 a 2023, permitiu acompanhar a evolução da dinâmica da bacia do rio Paraopeba espacial e temporalmente.

O período de estiagem/2019 foi o que mais concentrou sedimentos de granulação fina ao longo do perfil do rio Paraopeba, sobretudo silte, desde a Região Montante até a entrada do Reservatório da UHE Três Marias (Região 2C). Também foram observadas proporções maiores de areia grossa a muito grossa nos pontos da Região 2A (PT-43 ao PT-49), trecho em que predominam os gnaisses do Complexo Belo Horizonte. Esse comportamento é resultante da mudança nas condições de declividade, velocidade e sinuosidade do corpo fluvial nesse trecho, enquanto o escoamento superficial, erosão das margens e aumento do aporte sedimentar oriundo dos tributários são fatores que contribuem para o aumento das frações

No período subsequente, estiagem/2020, percebeu-se uma maior distribuição das frações arenosas ao longo do perfil, mesmo se constatando ainda uma larga distribuição de sedimentos siltosos. Essas alterações foram associadas com a mudança da posição da coleta das amostras de posição marginal para a posição central, principalmente nas regiões mais afetadas e à possível contribuição de sedimentos finos do rompimento da barragem B1, principalmente nas regiões 1A e 1B. Neste período foram registrados os menores teores de argila ao longo de todo trecho analisado.

Da estiagem/2021 até a estiagem/2023 o comportamento granulométrico é muito similar entre as regiões, apresentando em geral, manutenção das frações silte, argila e areia em todos os pontos. Um ponto importante é que neste período, as coletas de amostras de sedimentos foram simples como em todos os demais períodos, mas foram feitas em margem, o que favoreceu o acúmulo de finos visto que a coleta se deu local em que o transporte de sedimentos e vazão é menor quando comparado com a porção central do rio Paraopeba. Na comparação desses períodos de estiagem/2021 a 2023, a diferença mais aparente é a redução das frações areia grossa e areia muito grossa, da estiagem/2021 a 2022, que se manteve em 2023, principalmente na Região 2A.

11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de estiagem até 2023

11.1. Objetivo

O objetivo das avaliações estatísticas espaciais e temporais aplicadas aos metais foi verificar sua evolução ao longo do tempo e do espaço, ao longo da extensão do rio Paraopeba até jusante da UHE Retiro Baixo nos períodos estiagem/2019 até setembro/2023.

11.2. Metodologia

11.2.1. Análise de cluster

Neste item serão analisados os resultados dos metais prioritários (Mn, Fe, Al) e minoritários (Pb, Cu, Ni, Cr, P, Zn e As), ao longo do tempo e do espaço considerando o período completo de janeiro/2019 até setembro/2023 e o ciclo hidrológico de abril/2022 até setembro/2023 (estiagem).

A Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR *et al.*, 2005) foi empregada visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas ao longo do rio Paraopeba. Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (*clusters*) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos resultados dos parâmetros prioritários (Mn, Al, Fe e elementos minoritários) mencionados em três formas distintas para verificar comportamentos dos resultados nos pontos monitorados. A mediana dos dados foi empregada devido às diferentes frequências amostrais ao longo do período de monitoramento, visto que a análise considera a obrigatoriedade de que todos os pontos do espaço amostral tenham resultados.

11.2.2. Método da Estatística descritiva e inferencial

Após a análise exploratória multivariada de *Cluster*, foi realizada a avaliação espacial e temporal do comportamento dos parâmetros de sedimento por meio de gráficos do tipo *boxplot* com foco nos períodos de estiagem/2019 até 2023. Estes compreendem recurso visual que permite resumir de forma gráfica a estatística descritiva aplicada aos resultados de monitoramento para exibir medidas como a mediana, percentis (25% e 75%) e os valores pontuais máximos e mínimos, além de *outliers*. Portanto, apresentam valores de tendência central (medianas), dispersão e simetria dos resultados das análises realizadas nas regiões monitoradas (Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C). No Capítulo 3 é apresentada a tabela com a relação dos referidos pontos.

Para corroborar a análise descritiva apresentada nos *boxplots* e identificar a existência de diferença significativa dos parâmetros de qualidade dos sedimentos na estiagem entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de estiagem em cada região (comparação temporal) foi aplicado o teste de hipóteses não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn (quando identificada diferença significativa no teste de Kruskal-Wallis), ao nível de significância de 5% (KRUSKAL; WALLIS, 1952; DUNN, 1964).

O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis é aplicado com o objetivo de comparar três ou mais amostras independentes entre si. Parte da hipótese nula (H_0) de que não há diferença significativa entre as amostras comparadas; e da hipótese alternativa (H_A) de que existe diferença significativa em pelo menos uma das amostras em relação às demais. No caso de rejeição da hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis ($\text{valor-p} \leq 0,05$), sabe-se que há alguma diferença entre as amostras comparadas. No entanto, não se sabe quantas diferenças são e nem entre quais amostras elas se encontram. Para concluir quais amostras são significativamente diferentes entre si é aplicado o teste não paramétrico de comparações múltiplas de Dunn, que compara todos os possíveis pares entre as amostras analisadas (HELSEL; HIRSCH, 2002).

Para as avaliações estatísticas, os LQ foram padronizados em função da existência de múltiplos valores, sendo considerado o menor valor de LQ, e este foi dividido por dois.

11.2.3. Análise de tendência temporal

O teste de Mann-Kendall (HELSEL e HIRSCH, 2002; TRINDADE, 2013; TRINDADE *et al.*, 2017) é indicado como um teste para verificar se os valores da série temporal tendem a aumentar ou a diminuir com o tempo (mudança monotônica). Para a sua execução, nenhuma suposição quanto à normalidade dos dados é requerida (HELSEL e HIRSCH, 2002) e, quando comparado a outros testes paramétricos, ele apresenta maior robustez quanto a desvios de normalidade e não-estacionariedade dos dados da série histórica, justificando o amplo uso em estudos de tendência (BLAIN, 2011).

O teste de Mann-Kendall (MK) define se os valores de um determinado parâmetro Y tendem a diminuir ou aumentar à medida que o tempo T aumenta. A estatística de S de Kendall é computada pela comparação de todos os pares Y e T (concentração do parâmetro e tempo) e mede a dependência monotônica de Y em T. Se o resultado da estatística S de Kendall for positivo, é indicada uma tendência de elevação ao longo do tempo e, ao contrário, se negativo, evidencia tendência de redução nos dados.

Cabe destacar, ainda, que em termos de número de amostras, o conjunto de dados é robusto, mas em questão de tempo tem-se uma série temporal ainda pequena, constituída por cinco ciclos chuvosos e cinco de estiagem. Logo, os resultados do teste de tendência temporal são apresentados como uma ferramenta complementar a análise estatística descritiva e inferencial apresentada anteriormente (gráficos *boxplots* e testes de hipóteses).

Em testes estatísticos de tendência temporal é habitual o preenchimento de falhas eventuais, por meio de estimativas e interpolações. Grandes lacunas de dados podem, no entanto, fazer

com que a série perca sua continuidade e padronização do tempo, o que pode, muitas vezes, trazer mais incertezas para análise do que consistência a ela. Nesse contexto, para o presente estudo, optou-se por aplicar o teste de tendência temporal em dados medianos mensais de cada ponto de amostragem no caso dos sedimentos, de forma a se ter uma série temporal homogênea.

Neste documento, a tendência temporal da série de dados completa foi avaliada, desde o início do monitoramento até o final do período de estiagem/2023, sem distinção dos períodos de chuva e estiagem. Como passo anterior à análise de tendência temporal, a influência da sazonalidade nos dados foi verificada por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney, ao nível de significância $\alpha = 5\%$. O teste de Mann-Whitney foi aplicado com o objetivo de comparar duas amostras independentes entre si (HELSEL; HIRSCH, 2002). O teste foi aplicado partindo da hipótese nula (H_0) de que não há diferença significativa dos resultados entre os períodos de chuva e de estiagem; e da hipótese alternativa (H_A) de que os valores são significativamente diferentes entre os períodos de chuva e de estiagem. Para os casos em que não houve diferença significativa entre os dois períodos sazonais (valor-p > 0,05), não foi considerada a influência da sazonalidade nos dados e o teste de Mann-Kendall foi aplicado. Nos casos em que o valor-p do teste foi significativo (valor-p \leq 0,05), foi considerada a existência de influência da sazonalidade nos dados e a tendência temporal dos parâmetros foi verificada pela aplicação do teste Sazonal de Mann-Kendall.

Posteriormente, a tendência temporal foi avaliada para a série de dados dos períodos de estiagem separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de interesse. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados.

Para a avaliação estatística, os LQ foram padronizados em função da existência de múltiplos valores, sendo considerado o menor valor de LQ, e este dividido por dois

11.3. Resultados e discussão

No período de estiagem/2023, alguns pontos de monitoramento não foram amostrados de acordo com o plano de amostragem em vigência, por motivos de impossibilidade de coleta embarcada e/ou por questões de insegurança. Os pontos não amostrados, pelo menos uma vez, e localizados ao longo do rio Paraopeba foram: JRB-02, PT-03, PT-48 e PT-17 tiveram poucos resultados/amostragem, principalmente entre meados de 2020 a meados de 2021, devido às condições de acesso, e, por isso, não foram considerados na análise de cluster. O ponto JRB-02 foi inserido em agosto/2022 no escopo desse monitoramento.

11.3.1. Análise de Cluster

A avaliação dos agrupamentos foi realizada de três maneiras de forma a verificar a evolução dos dados no espaço-tempo. Dessa forma, três dendrogramas foram construídos e podem ser vistos na **Figura 11.3.1-1**, **Figura 11.3.1-2** e **Figura 11.3.1-3**.

O dendrograma da **Figura 11.3.1-1**, considerou todos os ciclos sazonais de janeiro/2019 até setembro/2023. Esse dendrograma se assemelhou com o dendrograma das chuvas de 2022/2023, exceto pelo PT-14 que no período anterior esteve em outro agrupamento e nesta avaliação ficou agrupados com os pontos da Região 2B, possivelmente, por estar em área de retenção hidráulica e de maior acúmulo de finos.

Na **Figura 11.3.1-1** evidenciou-se que houve um bom agrupamento dos pontos de monitoramento no espaço se aproximando do unifilar. Os dados dos pontos de coleta PT-11 e PT-12 na Região Ferro-Carvão e PT-02 na Região 1A apresentaram similaridades estatísticas. A similaridade que ocorre entre eles é que todos se encontram em áreas de retenção hidráulica, o que favorece o acúmulo de materiais finos.

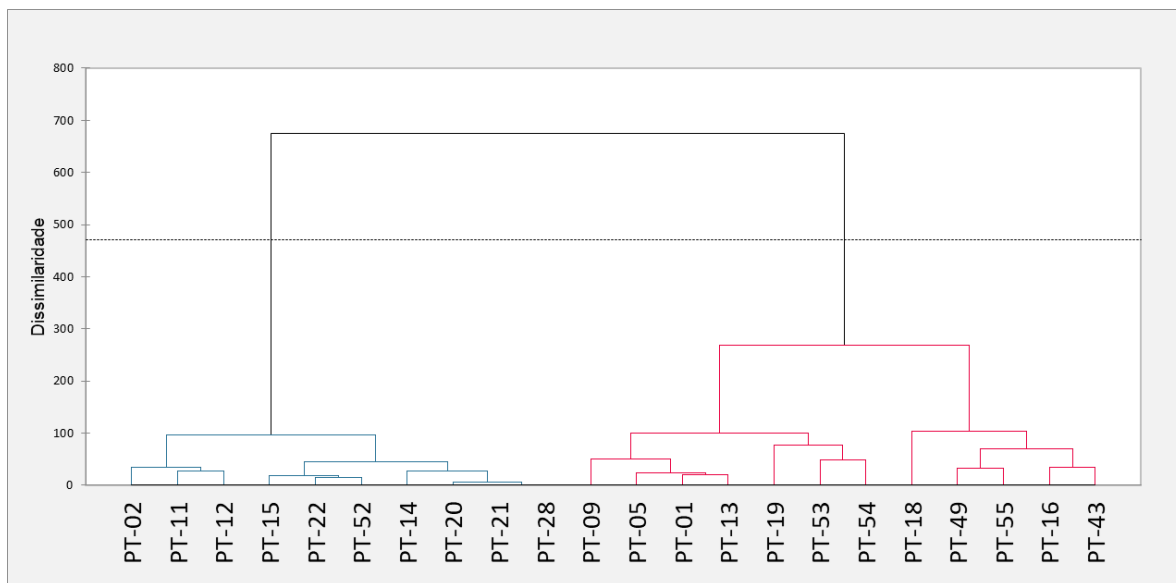
O agrupamento PT-09, PT-05, PT-01 e PT-13 está espacialmente na Região 1A e ficou mais ao centro do cluster. Nestes locais, ao longo do monitoramento, ficou evidenciado a influência do rejeito, os quais com o tempo foram se misturando ou sendo sobrepostos pelos sedimentos do rio Paraopeba. Os pontos de coleta agrupados PT-53, PT-54 e PT-19 vem na sequência. Os pontos PT-54 e PT-53 estão em região de predomínio dos sedimentos provenientes de intemperismos de rochas e lixiviação de solo do Quadrilátero Ferrífero, enquanto o PT-19 está espacialmente mais distante, já em áreas de influência do Grupo Bambuí. O ponto PT-19 está próximo a áreas de exploração de ardósia e mineradoras, que pode ser um fator que aproxime as composições químicas dos minerais do Quadrilátero e em menor significância aos sedimentos marinhos que deram origem ao Grupo Bambuí.

O agrupamento indicado pelos pontos PT-49, PT-55, PT-18, PT-16 e PT-43 na **Figura 11.3.1-1** também englobou pontos que estão espacialmente próximos e que compartilham da mesma característica química, ou seja, considerados como sedimentos naturais do rio Paraopeba na Região 2A, onde predominam sedimentos provenientes do Grupo Bambuí e das lateritas, indicando maior similaridade entre eles.

Os pontos da Região 2B (PT-20, PT-21 e PT-28) se agruparam com o PT-14 da Região 1B, enquanto o PT-52 (Região Montante), o PT-22 (Região 2C) e o PT-15 (Região 1B) também fizeram um agrupamento. Com exceção do PT-14 e PT-15, que oscilaram em fases com presença de rejeito nas amostras de sedimentos de corrente, os demais estão em regiões com sedimentos que sempre tiveram a característica do rio Paraopeba, não afetadas pelo rompimento da barragem. Os PT-14 e PT-15, foram os que mais se distanciaram composicionalmente, provavelmente por estar em região afetada pelo rompimento da barragem B1 e receberem as contribuições naturais do rio que se sucederam no tempo.

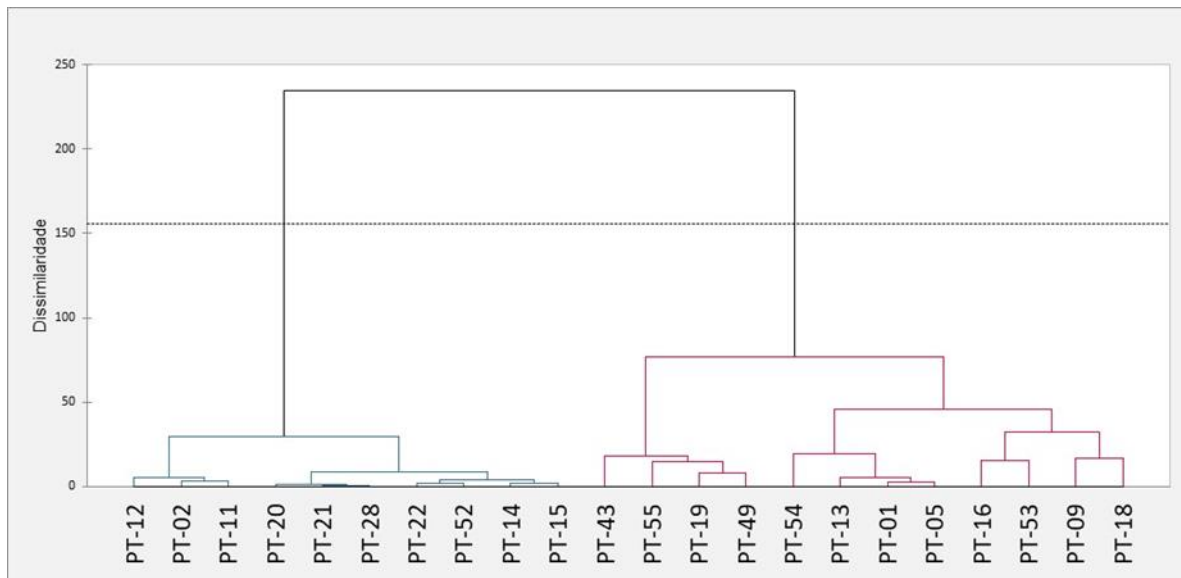
Desta avaliação, tem-se que os agrupamentos tenderam a seguir uma ordem unifilar parecida com a apresentada ao longo do rio Paraopeba. Além disso, os pontos que se situam predominantemente em áreas de alguma retenção hidráulica (PT-02, PT-11, PT-12, PT-14, PT-20, PT-21, PT-28 e PT-22) se agruparam. Os pontos da Região 2A ficaram todos agrupados com característica recorrente de material com predomínio de sedimentos do rio Paraopeba.

Figura 11.3-1 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Todo o período de monitoramento (janeiro/2019 a setembro/2023).



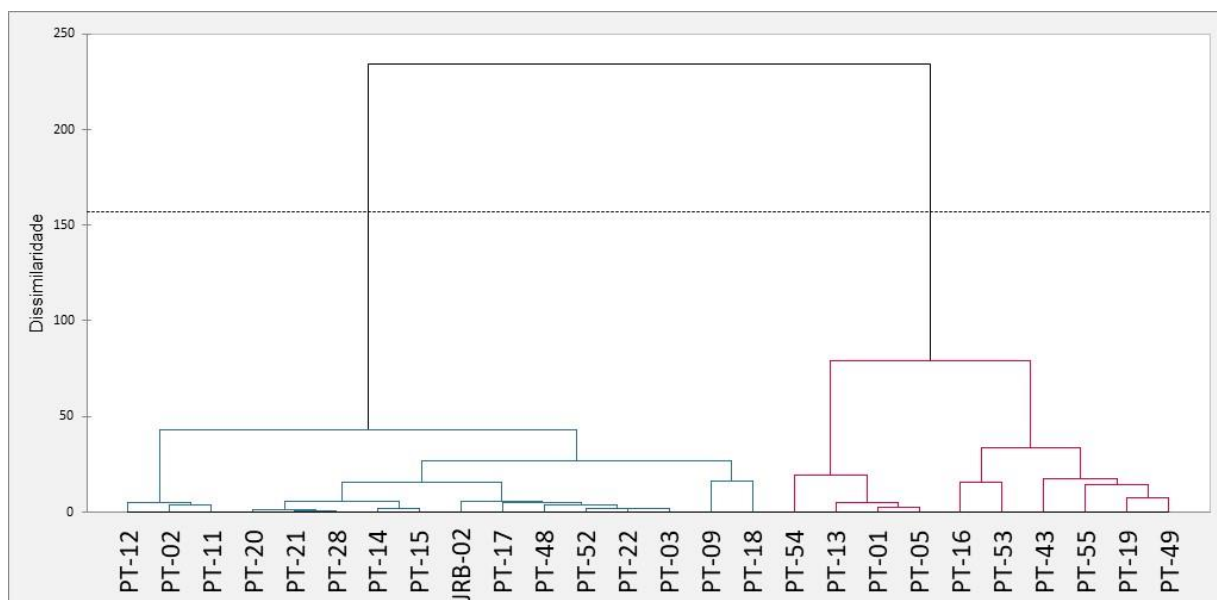
Ao se avaliar o ciclo hidrológico de outubro/2022 a setembro/2023 com os mesmos pontos que envolveu todos os ciclos constatou-se que os agrupamentos foram idênticos como se pode observar na **Figura 11.3.1-2**.

Figura 11.3-2 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Último ano hidrológico (outubro/2022 a setembro/2023) sem os pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48.



Adicionalmente, ao se inserir os resultados analíticos dos pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48 neste ciclo de outubro/2022 a setembro/2023 (**Figura 11.3.1-3**) verificou-se um rearranjo no agrupamento, com o JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48 agrupados com os pontos das regiões 2B, 1B, 2C e Montante. Esses pontos estão distanciados espacialmente e a similaridade identificada foi por conta de serem locais em que ocorrem retenção hidráulica por fatores diversos, tais como: reservatório de água, pilares de pontes, destroços de pontes que retem sedimentos, barramentos como o da UTE Igarapé, entre outros. Os pontos PT-09 e PT-18 aparecem no grupo um pouco deslocados. O PT-18 tem em comum a questão de deposição de sedimentos finos no leito do rio em razão de acúmulo de destroços de uma ponte caída no leito do rio. Os pontos dos agrupamentos com PT-54, PT-13, PT-01 e PT-05 junto com os pontos PT-16, PT-53, PT-43, PT-55, PT-19 e PT-49 indicaram que eles se situam nas regiões 1A e 2A, não seguem a ordem unifilar, mas os pontos agrupam-se em espacialmente mais próximos a área afetada diretamente pelo rompimento da barragem (Região 1A) e a área que teve temporalmente um influência dos sedimentos com o rompimento (Região 2A), mas que desde estiagem 2020 já mostravam predominantes com sedimentos naturais do rio Paraopeba.

Figura 11.3-3 Dendrograma da análise de Cluster para a matriz de sedimentos. Último ano hidrológico (outubro/2022 a setembro/2023) com os pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48.



11.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial

A análise estatística descritiva dos resultados de sedimentos foi realizada para os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 considerando a disposição por regiões (Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C) e apresentadas em gráficos do tipo *boxplot*. Estes gráficos mostram a estatística aplicada aos resultados de monitoramento e medidas como as medianas, os quartis (25% e 75%), além dos valores pontuais máximos e mínimos e *outliers*. Portanto, apresentam valores de tendência central, dispersão e simetria dos resultados das análises realizadas em cada região, comparando-os aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 de cada elemento, quando disponível. Os elementos avaliados foram os prioritários (Mn, Fe, Al) e os traço (Pb, Cu, Ni, As, Cr e Cd). O Fósforo (P) foi incluído especificamente para fins de avaliação de comportamento no rio Paraopeba e no ribeirão Ferro-Carvão.

Do **Gráfico 11.4.2.1-1** até o **Gráfico 11.3.2.3-2**, estão apresentadas as regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C, até o PT-22, o limite com o barramento da UHE Três Marias. Na ordenada, estão os resultados das concentrações dos metais em escala linear. Indica-se que as escalas podem ser diferentes de uma região para a outra, porém o objetivo é que se perceba a evolução dos metais por região e no tempo e conforme sugerido em Notas Técnicas elaboradas pelas instituições IGAM (Nota Técnica nº 18/IGAM/GEMOQ/2021, de 13/08/2021) e AECOM (Nota Técnica Nº 60622935-ACM-DM-ZZ-RP-ZZ-0003-2021, de 15/07/2021), a escala linear de cada região foi preservada para melhor verificação dos resultados. Destaca-se que, para um mesmo parâmetro, há dois gráficos, sendo um deles considerando todos os dados do período e o outro excluindo alguns *outliers* para possibilitar *zoom* e facilitar a visualização dos resultados.

Os gráficos *boxplots* desses e dos demais parâmetros por ponto de monitoramento, podem ser consultados no **Anexo VII-A**. No **Anexo VII-C** estão apresentadas as tabelas com as métricas estatísticas utilizadas, especificamente para a geração dos gráficos *boxplots* por região para os parâmetros prioritários discutidos neste presente item. No **Anexo VII-D**, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência.

11.3.2.1. Elementos prioritários

- **Manganês**

A distribuição estatística espacial e temporal do Manganês nos períodos de estiagem encontra-se no **Gráfico 11.3.2.1-1** e **Gráfico 11.3.2.1-2** (*boxplots*) e **Tabela 11.3.2.1-11** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.3.2.1-22** (estatística sazonal temporal).

Verificou-se que, especialmente, as concentrações de Manganês foram maiores nas regiões do Ferro-Carvão, 1A e 1B. Estas concentrações se reduziram ao longo do tempo e do espaço. Na Região Montante, o Manganês apresentou variação nas medianas sendo próximo a 2.350 mg/kg na estiagem/2019; 727 mg/kg na estiagem/2020, 1.495 mg/kg na estiagem/2021, 1.538 mg/kg na estiagem/2022 e 1.257,50 mg/kg na estiagem/2023. As variações nessas concentrações podem estar associadas com as condições morfodinâmicas do rio, granulometria e aportes de sedimentos provenientes de contribuições locais não relacionadas ao rompimento da barragem B1 e ou assoreamentos. Importante destacar que, na cabeceira do rio Paraopeba, localizado na porção sul da bacia, as ocorrências de Manganês nos sedimentos de corrente foram identificadas com concentrações maiores que 1.000 mg/kg, sendo estes acúmulos potencialmente decorrentes da atividade de exploração mineral (vide Uso e ocupação do solo, no **Anexo II**). É possível que o intemperismo natural das rochas locais, juntamente com o antrópico, que inclui erosão I do solo, favorece a lixiviação e o escoamento de materiais contendo Manganês para o rio Paraopeba.

Na região do Ferro-Carvão, as concentrações de Mn foram as mais elevadas, se comparadas a todas as demais regiões da calha do rio Paraopeba (*boxplots*). Os *boxplots* apontaram aumento das medianas das estiagens de 2019 até 2022, e posterior redução na estiagem/2023. As medianas em cada um dos períodos foram de 4.846,50 mg/kg na estiagem/2019; 9.025 mg/kg na estiagem/2020; 13.263,50 mg/kg na estiagem/2021; 13.799 mg/kg na estiagem/2022 e 12.133 mg/kg na estiagem/2023 (**Gráfico 11.3.2.1-1**). Essas variações foram consideradas temporalmente significativas com base em análises estatísticas temporais dispostas na **Tabela 11.3.2.1-2**. As oscilações nas concentrações podem associar-se principalmente as obras de engenharia no ribeirão Ferro-Carvão desde meados de 2019, que incluiu a instalação de Estaca Prancha (setembro/2019) para conter o avanço da água do ribeirão. Esta foi represada, captada e vertida para tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETAF 1) instalada pela Vale em no segundo semestre 2019. O represamento da água modificou as condições locais para mais lânticas e, entende-se que isso possibilitou deposição de sedimentos finos favorecendo acúmulo de materiais na localidade e aumento nas concentrações de metais ao longo dos períodos sazonais, indicando sedimentação principal de rejeito *in loco* e as contribuições da bacia.

Na Região 1A, que inclui os pontos PT-01 até o PT-05, percebeu-se que as concentrações medianas para Mn foram significativamente menores espacialmente que das regiões Ferro-Carvão e 1B. Pelos *boxplots* (**Gráfico 11.3.2.2-1**), verificou-se, temporalmente, redução das concentrações de Mn nessa região, com medianas oscilando entre 5.031 mg/kg, 1.529 mg/kg, 1.357 mg/kg, 1.254 mg/kg e 1.246,50 mg/kg, respectivamente, nos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023. As medianas dos períodos de estiagem/de 2020 até 2023 são muito próximas, entretanto, o *boxplot* dos dois últimos períodos apresentou uma variação maior, além de uma assimetria notável dos resultados. Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-1**) observou-se que a Região 1A apresentou diferenças significativamente superiores a Região Montante somente nas estiagens de 2020 e 2019, nas demais estiagens avaliadas observou-se diferenças inferiores ou não houve diferença. A estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-2**) mostra que essa região não apresentou diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas.

Na Região 1B, ao se comparar com a Região 1A, percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de Mn foram significativamente maiores, provavelmente por causa do barramento hidráulico, nas proximidades do PT-14 e da UTE Igarapé, que possibilita o acúmulo de sedimentos densos, grossos e finos e potencializa o aumento das concentrações dos metais presentes nestes materiais. Do ponto de vista da avaliação temporal, na Região 1B, os *boxplots* mostraram uma redução das concentrações ao longo do tempo até a estiagem/2021, sendo que na estiagem/2022 o valor da mediana aumentou e depois na estiagem/2023 voltou a reduzir e teve uma menor variação dos dados no último período, o que foi confirmado no teste estatístico temporal (**Tabela 11.3.2.1-2**). A estiagem/2019 mostrou uma maior variação nas concentrações de Mn, cuja mediana foi de 13.500 mg/kg, e subsequentes oscilações nas medianas ao longo dos períodos de estiagem, com valores de 2.960 mg/kg (2020), 1.641 mg/kg (2021), 2.129 mg/kg (2022) e 1.799,50 mg/kg. A estiagem/2023 apresentou redução da mediana em relação a estiagem/2022, indicando diminuição dos valores e menor variação das concentrações quando comparado aos períodos anteriores. Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.1-1**) observou-se que a Região 1B apresentou diferenças significativamente superiores as regiões Montante e 1A somente nas estiagens de 2019 e 2020 e nos demais períodos não houve diferença.

Na Região 2A, os *boxplots* mostraram oscilação dos valores, com redução das concentrações ao longo do tempo. As concentrações de Manganês durante a estiagem/2019 são as mais elevadas e mais discrepantes, com mediana de 640 mg/kg. Os demais ciclos de estiagem apresentam valores de mediana similares e uma tendência de redução da variação das concentrações. As medianas para os períodos de estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023, são, respectivamente, 319,50 mg/kg, 354 mg/kg, 297 mg/kg e 370 mg/kg. A estas alterações atribuiu-se, principalmente, mudanças na granulometria (discretizadas no item 10) das amostras relacionado a mudanças na posição de coleta, feita na porção central para na margem do rio, e as precipitações (que variaram ao longo do tempo, com período mais intensos e outros mais amenos e que transportaram materiais de um local para o outro e que foram se dissipando e sedimentando nos períodos de estiagem).

Nas porções marginais do rio, a granulometria costuma ser mais fina que na porção central do rio. Em sedimentos finos, a capacidade de adsorção de metais aumenta haja vista a maior superfície específica da partícula. A estiagem/2019 apresentou a predominância de frações finas, enquanto em 2020 houve o predomínio de sedimentos mais grossos (areia); já em 2021 houve uma mistura na granulometria dos sedimentos, o que corroborou com o aumento sutil do Manganês. Na estiagem/2022, as concentrações medianas reduziram e foram inferiores às monitoradas no período sazonal anterior, mesmo com coleta em posição marginal. Na estiagem/2023 houve aumento na concentração.

Os períodos de estiagem são caracterizados como momentos de menores vazões dos rios, o que permite a dissipação e deposição dos materiais finos que vinham sendo transportados em suspensão, acarretando sedimentos mais finos no leito do rio.

Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-1**) observou-se que a Região 2A não apresentou diferenças significativamente superiores a nenhuma região, assim como observado na estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-2**) onde não foram registradas diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, os *boxplots* indicaram, entre os períodos de estiagem, um aumento nas concentrações de 2019 até 2022. A partir da estiagem/2022, as medianas tenderam a reduzir seu valor, sobretudo no ciclo de estiagem/2023. As medianas para os períodos foram de 681,50 mg/kg (2019); 1.150 mg/kg (2020); 1.234,50 mg/kg (2021); 1.225 mg/kg (2022) e 989 mg/kg (2023). Diferente das demais regiões, as concentrações de Mn tiveram leve aumento em 2020 e 2021, sugerindo influência das chuvas e contribuições e aportes acumulados localmente, haja vista que em outras localidades a montante, o fato não foi identificado. O acúmulo de sedimentos foi favorecido pelas condições de menor energia propiciadas pelo reservatório.

Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-1**) observou-se que a Região 2B apresentou diferenças significativamente superiores a Região 2A em todas as estiagens monitoradas, exceto na estiagem/2019, na qual mostrou manutenção, além disso, na estiagem/2020, essa região exibiu concentrações superiores a Região Montante. Já por meio da estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-2**) verificaram-se diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2023, 2022, 2021 e 2020, todas comparadas a estiagem/2019.

Na Região 2C, os resultados de Mn oscilaram conforme os *boxplots*, com elevado aumento das concentrações na estiagem/2020 e diminuição das medianas a partir da estiagem/2022. A mediana identificada na estiagem/2019 foi de 857 mg/kg. Nas estiagens seguintes sucedidas por período de chuvas com aumento das vazões nos cursos d'água da bacia do rio Paraopeba resultaram na maior concentração de sedimentos e metais e, por consequência, na elevação das concentrações medianas nos períodos de estiagem/2020 (1.352 mg/kg) e estiagem/2021 (1.356 mg/kg). Essas concentrações reduziram pontualmente na estiagem/2022 (1.287,50 mg/kg), e mais significativamente durante a estiagem/2023 (871 mg/kg). Essa região recebe contribuições difusas advindas de tributários, além das

contribuições das erosões marginais dos solos desnudos da localidade que carregam materiais para dentro do leito do rio.

No tocante da estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-1**) observou-se que desde a estiagem/2020 tanto a Região 2C como a Região 2B apresentaram diferenças significativamente superiores a Região 2A.

Na estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-2**) verificou-se que até 2021, as concentrações nas regiões 2C foram significativamente maiores em relação as estiagens de 2019 e 2020. Já em 2022, as concentrações não apresentaram variação significativa e na estiagem/2023 percebeu-se que as concentrações tiveram redução significativa em relação a 2022, indicando melhora disponibilidade de Manganês nesta localidade.

Gráfico 11.3.2.1-1 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

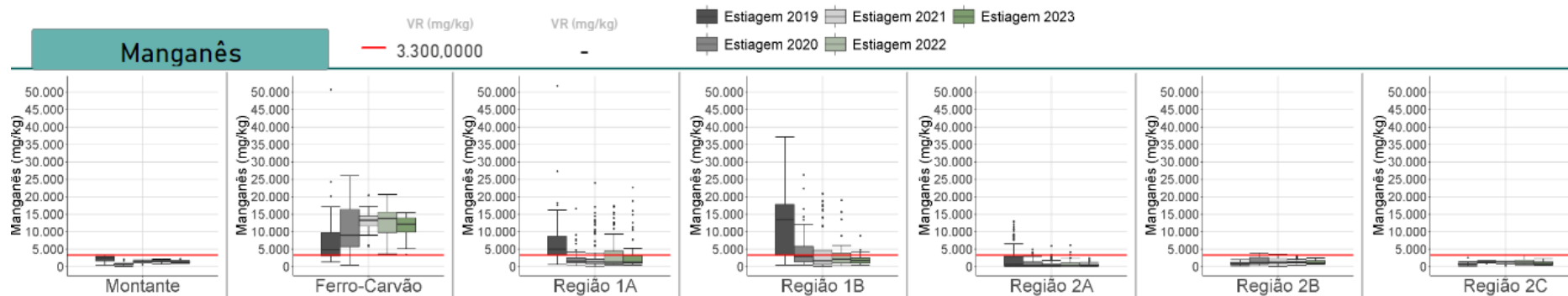


Gráfico 11.3.2.1-2 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

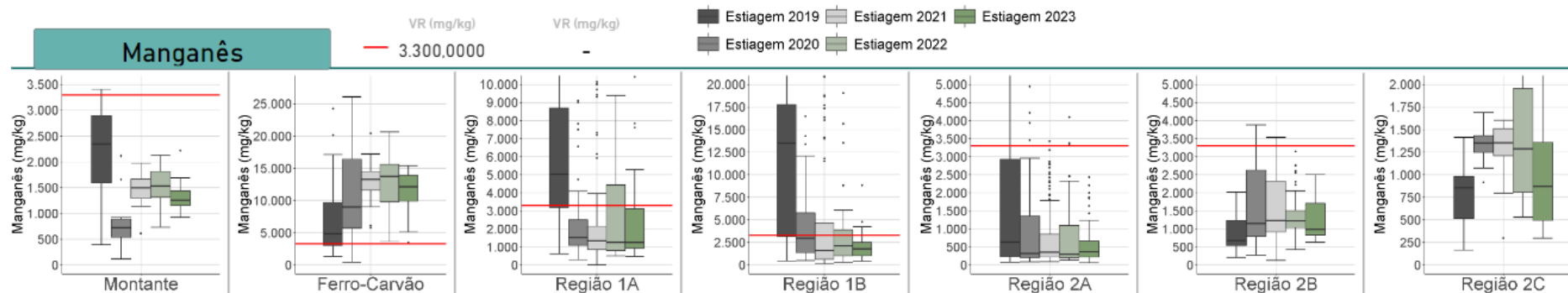


Tabela 11.3.2.1-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Manganês.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	>	~	>	>
Região 1A	-	-	-	>	<	~	~
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	~	~	<	<	<
Montante	-	-	>	>	<	<	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	~	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.1-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês em cada região

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	~	<
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.20	~	~	~	<	~	~	<
Est.23 X Est.19	>	<	<	<	<	>	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	~	>	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.19	>	~	<	<	<	>	>
Est.21 X Est.20	~	>	~	~	~	~	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	>	>
Est.20 X Est.19	>	<	<	<	<	>	>

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Ferro**

A distribuição estatística espacial e temporal do Ferro nos períodos de estiagem encontra-se no **Gráfico 11.3.2.1-3** e **Gráfico 11.3.2.1-4** (*boxplots*) e **Tabela 11.3.2.1-3** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.3.2.1-4** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.3.2.1-3** mostra a evolução do Ferro ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. O **Gráfico 11.3.2.1-4** mostra a evolução do Ferro ao longo dos períodos de estiagem em escala variável.

Na Região Montante, os *boxplots* mostraram redução das concentrações ao longo dos períodos de estiagem, com medianas de 91.000 mg/kg em 2019; 80.850 mg/kg em 2020; 57.786,50 mg/kg em 2021; 45.755 mg/kg em 2022 e de 46.804 mg/kg em 2023. Nas estiagens de 2019 e 2020, os valores de Ferro foram mais elevados, sendo que na estiagem/2020 a variação das concentrações foi a mais alta. Tais variações podem estar relacionadas com a influência das precipitações do período de chuva 2019/2020, que promoveram o aporte, transporte e deposição de materiais, além de favorecer a ocorrência de erosões marginais e escoamentos superficiais. Já a partir da estiagem/2021 em diante, os valores tenderam a diminuir e a variar menos, sugerindo cenário mais natural da bacia, ou seja, sem a condição premente do rompimento da barragem B1. Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-3**) observou-se que a Região Montante apresentou diferenças significativamente inferiores a Região Ferro-Carvão em todas as estiagens monitoradas, sendo que na estiagem/2019, foi observada manutenção. A estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostrou que essa região teve resultados significativamente inferiores até a estiagem/2021 e depois na comparação a estiagem/2023 com 2022, as variações não foram significativas.

Na região do Ferro-Carvão, os *boxplots* oscilaram ao longo dos períodos sazonais de estiagem, com aumento das concentrações até a estiagem/2020, seguido de redução até o período de 2023. As medianas e máximas foram maiores que na Região Montante e o comportamento foi de aumento das medianas entre os períodos de estiagem/2019 (126.179,50 mg/kg) e 2020 (333.000 mg/kg). Já nos três últimos períodos de estiagem, verificou-se concentrações menores (206.875 mg/kg em 2021, 176.900,50 mg/kg em 2022 e 176.862 mg/kg em 2023). A Estaca Prancha e as posteriores atividades de retirada dos sedimentos depositados na lagoa em alguns períodos de estiagem podem ter contribuído com as variações nas concentrações do Ferro na localidade. Ainda, a estiagem/2023 apresentou mediana e concentrações similares a estiagem/2022, indicando maior frequência de concentrações mais baixas.

Em relação a estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) observou-se que essa região apresentou diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2020, 2021 e 2022 quando comparadas a estiagem/2019, porém ao se comparar os períodos de 2023 com os demais períodos constatou-se redução significativa ao comparar 2023 com os dados de 2021 e sem variação quando comparado 2023 com 2022.

Na Região 1A, os *boxplots* mostraram redução dos valores ao longo do tempo. Foram constatadas concentrações medianas de Ferro maiores durante a estiagem/2019 (140.368 mg/kg), quando comparada ao restante das outras estiagens como em 2020 (103.578 mg/kg), 2021 (89.694 mg/kg) e 2022 (59.124 mg/kg). A estiagem/2023 apresentou um aumento da mediana em relação ao ciclo de estiagem anterior (62.039 mg/kg), padrão semelhante ao observado na Região Montante. Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-3**) observou-se que a Região 1A apresentou diferenças significativamente superiores a Região Montante somente nas estiagens de 2019 e 2021 e nos anos seguintes não mostrou variação significativa em relação a esta mesma região, indicando redução nos aportes provenientes do ribeirão Ferro-Carvão para a área ou até mesmo de contribuições locais. Já a estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostrou que essa região não apresentou diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas. Em particular na comparação de 2023 com os anos de 2019, 2020 e 2021, percebeu-se que a variação foi significativa para redução, enquanto que em 2022, não houve variação significativa nas concentrações.

Na Região 1B, os *boxplots* apontam dois padrões de distribuição das concentrações de Ferro distintos: um com elevadas concentrações do metal nas estiagens de 2019 e 2020 e outro, a partir da estiagem/2021, com redução das concentrações e menor variabilidade dos dados.

Na estiagem/2019, a concentração mediana foi de 166.504 mg/kg, com aumento na estiagem/2020 para 180.000 mg/kg, relacionado a pontos com acúmulo de sedimentos fino em trechos sinuosos e/ou com barreiras. Nesse sentido, a influência das chuvas anteriores a estiagem/2020, que foram mais intensas, podem ter repercutido com revolvimento, transporte, possíveis erosões marginais e do canal, inclusive do rejeito depositado em trechos a montante, e de sedimentação de materiais. Na estiagem/2021, a concentração mediana diminuiu para 66.130 mg/kg seguido de aumento em 2022 e 2023, respectivamente, para 68.306,50 mg/kg e de 69.922,50 mg/kg, porém sempre menores que nos anos de 2019 e 2020. Essas flutuações foram relacionadas com redução da deposição de sedimentos nos trechos mais sinuosos ou de retenção hidráulica, bem como menor contribuição dos trechos de montante e efeitos, provavelmente, relacionados à diminuição nas precipitações no ciclo sazonal anterior. Entre 2021/2022, um novo ciclo de chuvas intensas se instalou e resultou promovendo uma nova dinâmica de transporte e sedimentação para a bacia, justificando as oscilações nos valores de Fe dos períodos de estiagem mais recentes.

Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-3**) observou-se que a Região 1B apresentou diferenças significativamente superiores a Região Montante (estiagens de 2019, 2020, 2022 e 2023) e superiores a Região 1A na estiagem/2020, enquanto nos demais períodos não teve variação significativa.

A estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostrou que essa região não apresenta diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas. Ao se comparar a estiagem/2023 com os períodos anteriores percebeu-se que as concentrações tenderam de significativamente menores que em 2019 e 2020 a sem variação quando comparados 2023 com os anos de 2021 e 2022, o que sugere maior estabilidade no aporte de ferro para a bacia do rio Paraopeba.

Na Região 2A, as concentrações oscilaram ao longo dos períodos de estiagem com *boxplots* exibindo redução nas concentrações e da variação dos dados. A concentração mediana de Ferro na estiagem/2019 foi equivalente a 29.300 mg/kg, reduziu para 13.200 mg/kg na estiagem/2020, seguido de incremento na estiagem/2021 (13.371 mg/kg) e nova redução em 2022 (7.295 mg/kg). Na estiagem/2023, a mediana da região mostrou aumento (12.477,50 mg/kg). As medianas dos resultados analíticos de Ferro nos sedimentos da Região 2A, apresentaram valores inferiores 30.000 mg/kg, indicando que as maiores concentrações deste elemento ficaram até a Região 1B, em que as medianas foram superiores a 50.000 mg/kg.

Em relação a estatística espacial (**Tabela 11.3.2.1-3**) observou-se que a Região 2A não apresentou diferenças significativamente superiores em relação as demais regiões, enquanto a estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostra que a Região 2A também não apresenta diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas. Ela mostrou estabilidade temporal nas concentrações quando comparados o ano de 2023 em relação a 2020, 2021 e 2022.

A Região 2B está localizada no reservatório da UHE Retiro Baixo, em ambiente intermediário que propicia a deposição dos sedimentos transportados pela vazão do rio, uma vez que nestes ambientes a energia é reduzida e os sedimentos se dissipam. Os *boxplots* apresentaram aumento das medianas de 2019 a 2020 e redução a partir de 2021 até a estiagem/2023. As medianas dos períodos de estiagem analisados foram 63.892,50 mg/kg (2019), 74.300 mg/kg (2020), 65.620 mg/kg (2021), 61.936 mg/kg (2022) e 60.385 mg/kg (2023). As medianas do Ferro na Região 2B (entre 60.000 e 75.000 mg/kg) foram maiores que na Região 2A (entre 7.000 e 30.000 mg/kg), que está em ambiente lótico (**Gráfico 11.3.2.1-3** e **Gráfico 11.3.2.1-4**), indicando o acúmulo maior de sedimentos finos nestes ambiente e consequente adsorção de substâncias químicas.

Na **Tabela 11.4.2.1-3** observou-se que essa região apresentou diferenças significativamente superiores a Região 2A em todas as estiagens monitoradas. Em relação às demais regiões do rio Paraopeba não houve diferença significativa na concentração e as concentrações de 2B foram significativamente inferiores a Região Ferro-Carvão. A comparação temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostrou que 2023 em relação aos demais períodos indicou concentrações significativamente inferiores comparados aos períodos de 2019 até 2021, enquanto não se verificou variações significativa ao se comparar os dados de 2022 com 2023, indicando uma tendência de maior estabilidade na região.

A Região 2C, mais distante da área do rompimento, mostrou manutenção das concentrações ao longo do tempo conforme indicado pelos *boxplots* (**Gráfico 11.3.2.1-3** e **Gráfico 11.3.2.1-4**). As medianas dos períodos de estiagem apresentaram valores de 37.247 mg/kg em 2019, 39.767,50 mg/kg em 2020, 39.814 mg/kg em 2021, 47.788,50 mg/kg em 2022 e 35.741 mg/kg em 2023. A tendência de elevação de concentrações de Ferro nesta região se confirma estatisticamente apenas para a estiagem/2021 em relação aos anos anteriores, relacionado a influência do período de chuvas 2020/2021 e contribuições locais.

Na **Tabela 11.3.2.1-3** observou-se que essa região apresentou predominantemente diferenças significativamente inferiores quando comparadas com as demais regiões, enquanto a comparação temporal (**Tabela 11.3.2.1-4**) mostrou que não houve diferenças significativas entre as estiagens. Estas distinções podem ser decorrentes da alteração da frequência de coleta dos sedimentos ao longo do tempo, cujo número de amostras pode influenciar na comparação dos resultados entre períodos de estiagens distintos.

Gráfico 11.3.2.1-3 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

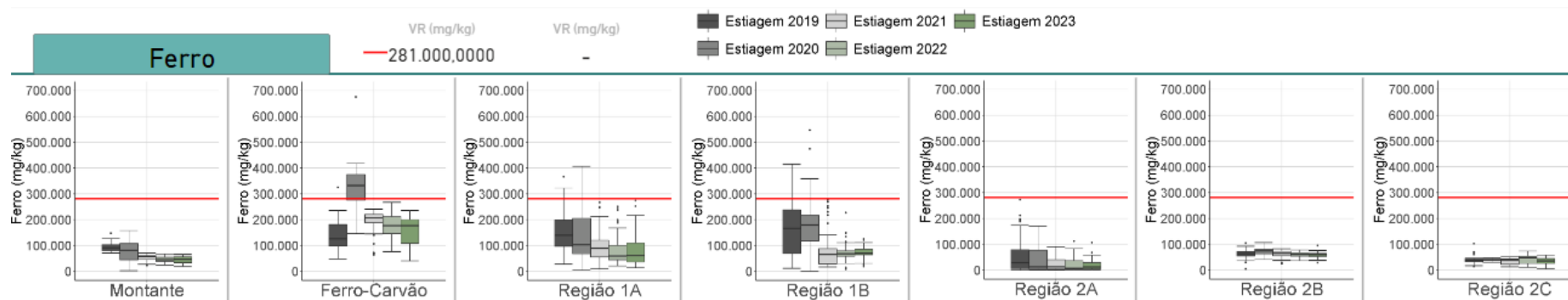


Gráfico 11.3.2.1-4 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

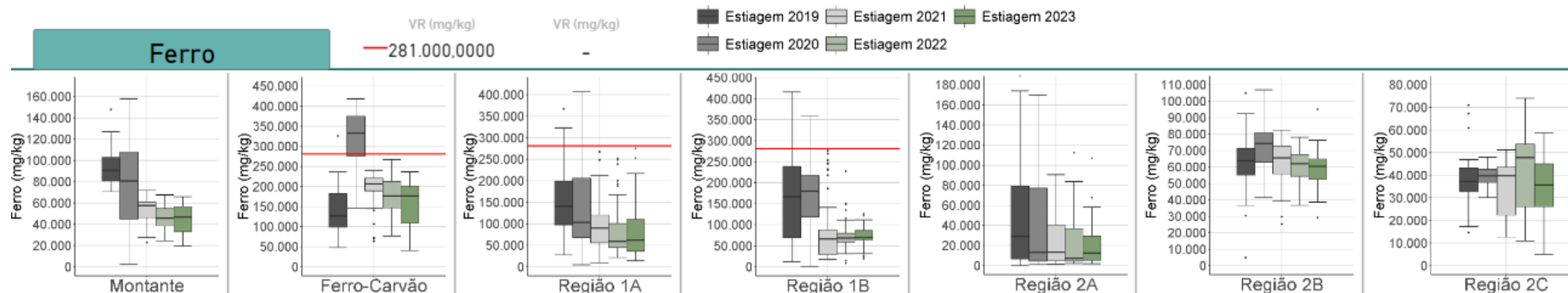


Tabela 11.3.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Ferro

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	>	<	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	>	~	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	>	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	>	<	~	<
Região 1A	-	-	-	>	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	~	<	<	<
Montante	-	-	>	>	<	<	<
Região 1A	-	-	-	~	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.1-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	<	~	<	~	~	<	~
Est.23 X Est.20	<	<	<	<	~	<	~
Est.23 X Est.19	~	<	<	<	<	<	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	<	<	<	<	~	<	~
Est.22 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.21 X Est.20	<	<	<	<	~	<	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.20 X Est.19	>	~	<	~	<	>	~

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Alumínio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Alumínio nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6** (*boxplots*) e na **Tabela 11.3.2.1-5** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.3.2.1-6** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.3.2.1-5** mostra a evolução do Alumínio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. O **Gráfico 11.3.2.1-6** apresenta evolução do Alumínio ao longo dos períodos de estiagem, em escala variável.

De modo geral, percebeu-se que espacialmente, as concentrações de Alumínio apresentam maiores valores na Região 2B. A concentração deste parâmetro nesta região pode estar associada ao barramento da usina UHE Retiro Baixo e a características litológicas, transporte e acúmulo de materiais de montante, que resultam em elevados teores de Alumínio.

Na Região Montante, o Alumínio apresentou, queda das concentrações nos *boxplots* ao longo dos períodos analisados (**Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**). A maior mediana observada foi na estiagem/2019 (26.900 mg/kg) seguida de redução significativa em 2020 (9.750 mg/kg), seguido de aumento em 2021 para 15.836 mg/kg com posterior queda em 2022 (14.373 mg/kg) e em 2023 (12.658 mg/kg). O Alumínio, nesta região, pode estar relacionado às rochas graníticas e gnáissicas do Complexo Bonfim. A comparação espacial (**Tabela 11.3.2.1-5**) mostra que a Região Montante apresentou concentrações significativamente superiores a Região Ferro Carvão, somente na estiagem/2019 e não se constatou variações significativas nos demais períodos. A comparação temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) mostrou não haver diferenças significativamente superiores entre as estiagens de 2023 com os períodos anteriores.

A região do Ferro-Carvão foi a única em que se observou significativa elevação gradual das medianas dos períodos de estiagem observados, como disposto no **Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**. A estiagem/2019 apresentou mediana de 7.926,50 mg/kg; na estiagem/2020 foi de 13.000 mg/kg; na estiagem/2021 foi de 22.341 mg/kg; na estiagem/2022 foi de 22.744,50 mg/kg; e na estiagem/2023 a mediana foi de 23.033 mg/kg. Destaca-se que, no PT-12, as amostras de sedimentos foram coletadas em posição de ambiente represado desde setembro/2019 em função das obras de contenção de avanço de rejeitos no ribeirão homônimo. Este represamento da água modificou as condições locais para mais lânticas e permitiu maior deposição de sedimentos finos, principalmente argila, e por consequência, pode ocorrer aumentos nas concentrações de alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva e indicando sedimentação *in loco*.

A comparação temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) mostrou que as estiagens de 2020, 2021, 2022 e 2023 apresentaram diferenças significativamente superiores em relação a estiagem/2019, ou seja, a concentração de Al no rejeito era baixa.

Na Região 1A, as concentrações medianas de Al durante os períodos de estiagem foram menores (faixa de 5.000 mg/kg a 9.500 mg/kg) que as concentrações medianas identificadas

na Região Montante (que variaram de 9.000 mg/kg a 27.000 mg/kg) e Ferro-Carvão (que variaram de 8.000 a 23.000 mg/kg). A mediana da estiagem/2019 na Região 1A foi de 9.369 mg/kg, com redução na estiagem/2020 (5.442,50 mg/kg) e aumento gradual a partir da estiagem/2021 (6.863 mg/kg); com 7.542 mg/kg na estiagem/2022 e 9.089 mg/kg na estiagem/2023. A comparação espacial (**Tabela 11.3.2.1-5**) mostra que a Região 1A mostrou diferenças significativamente inferiores ou manutenção durante as estiagens. A comparação temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) mostra que somente a estiagem/2023 comparada a estiagem/2020 apresentou diferenças significativamente superiores.

Na Região 1B, localizado em ambiente lótico sobre as rochas do Grupo Nova Lima e do Complexo Belo Horizonte (em que há ocorrência natural de Alumínio, entre outros elementos) as concentrações medianas foram significativamente maiores que as observadas na Região 1A (**Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**). As condições de ambiente e de litologia podem estar relacionadas de alguma forma a essa diferença de concentração de Alumínio entre estas duas regiões, com a erosão do solo, intemperismos de rochas gnáissicas do Complexo Bonfim e Belo Horizonte, presentes na região. Além disso, adicionam-se as variações na morfodinâmica do rio que promovem mudanças nas deposições e conseqüente variações nos resultados. Na avaliação temporal dos ciclos de estiagem percebeu-se manutenção das concentrações a partir da estiagem/2021 em diante. A estiagem/2019 indicou um valor de mediana (18.227 mg/kg) seguido por uma elevação na estiagem/2020 com 23.200 mg/kg e reduções em 2021 (17.091 mg/kg), 2022 (15.093 mg/kg) e em 2023 (14.474 mg/kg). Na **Tabela 11.4.2.1-5** observa-se que essa região apresenta diferenças significativamente superiores a Região 1A em todas as estiagens monitoradas e superiores a Região Montante, na estiagem/2020.

A comparação estatística temporal está na **Tabela 11.3.2.1-6**. Particularmente, em relação ao ciclo de estiagem/2023 quando comparado aos ciclos anteriores de estiagem demonstrou redução significativa em relação a 2019 e 2020 e equilíbrio nas concentrações ao comparar a estiagem/2023 com 2021 e 2022.

Na Região 2A, as concentrações medianas de Al apresentaram distribuição com tendência de redução, entre 2019 e 2023, apesar de apresentarem oscilações entre os períodos. Além disso, as concentrações medianas foram menores que a maioria das regiões a montante (**Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**). A mediana do Alumínio para os diferentes períodos de estiagem foi de 4.540 mg/kg (2019), 2.285 mg/kg (2020), 2.349 mg/kg (2021), 1.611 mg/kg (2022) e 3.036,50 mg/kg (2023).

Na **Tabela 11.3.2.1-5** observou-se na comparação espacial que essa região apresentou diferenças significativamente inferiores as demais regiões a montante dela e isso persiste desde 2021 nesta Região 2A. Na comparação com a estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) e, em particular, o ciclo de estiagem/2023 quando comparado aos ciclos anteriores de estiagem demonstrou redução significativa em relação a 2019 e equilíbrio nas concentrações ao comparar a estiagem/2023 com 2020, 2021 e 2022. Esta condição de equilíbrio pode ser resultado da estabilidade nas concentrações locais, mas também deve ser observada em

conjunto com a evolução espacial, visto que a frequência do monitoramento foi alterada ao longo do tempo.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, constatou-se oscilação entre os *boxplots*, com aumentos e reduções das concentrações ao longo dos períodos de estiagem (**Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**). As medianas durante os períodos sazonais foram de 50.894,50 mg/kg (2019), 69.300 mg/kg (2020), 44.740 mg/kg (2021), 38.877 mg/kg (2022) e 44.143 mg/kg (2023). As medianas da Região 2B foram significativamente maiores que as das demais regiões. Os teores de Al podem estar associados ao transporte e deposições de materiais provenientes de contribuições da lixiviação de rochas contendo Al como Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte e Grupo Bambuí, além de contribuições locais da bacia e da influência das precipitações. Na **Tabela 11.3.2.1-5** observa-se que essa região apresenta diferenças significativamente superiores as regiões Ferro-Carvão, Montante, 1A, 2B e 2A em todas as estiagens monitoradas, visto que o reservatório da UHE Retiro Baixo opera como um decantador/dissipador dos materiais em suspensão que chegam até a barragem. A comparação estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) demonstrou redução significativa em relação a 2019 e 2020 e equilíbrio nas concentrações ao comparar a estiagem/2023 com 2021 e 2022.

Na Região 2C, os *boxplots* oscilaram pouco ao longo do tempo. Assim, as estiagens apontaram medianas em 2019 de 21.938 mg/kg, em 2020 de 20.127 mg/kg, em 2021 de 15.751 mg/kg, em 2022 de 19.201,50 mg/kg e em 2023 de 16.211 mg/kg (**Gráfico 11.3.2.1-5** e **Gráfico 11.3.2.1-6**). Na **Tabela 11.3.2.1-5** observou-se que essa região tem apresentado diferenças significativamente superiores nas regiões 1A e 2A e inferiores na Região 2B de forma constante em todas as estiagens monitoradas e em particular nestas únicas desde 2021, mostrando equilíbrio nas concentrações do Alumínio. A comparação estatística temporal (**Tabela 11.3.2.1-6**) mostrou que não há diferenças significativamente superiores entre as estiagens e mais ainda, que houve redução significativa nas concentrações da estiagem/2023 em relação a 2019 e 2020 e equilíbrio nas concentrações ao comparar a estiagem/2023 com 2021 e 2022.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 258 / 399

Gráfico 11.3.2.1-5 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

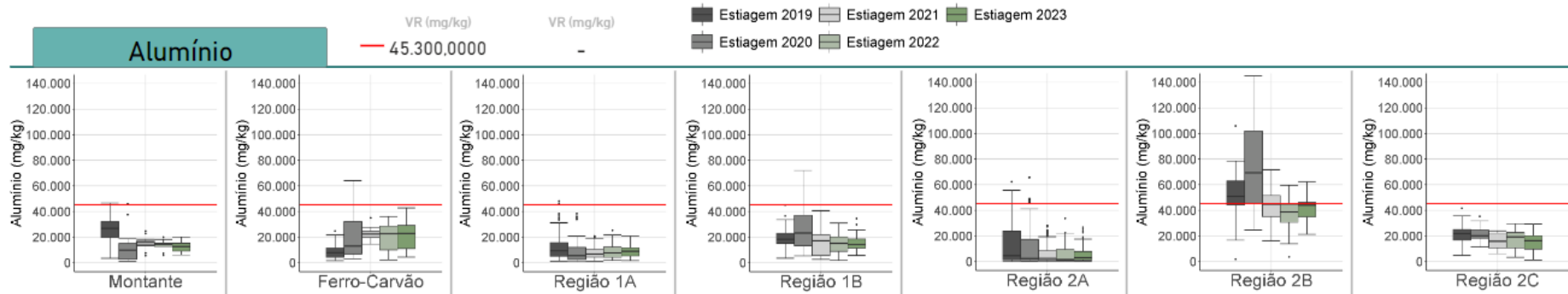


Gráfico 11.3.2.1-6 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

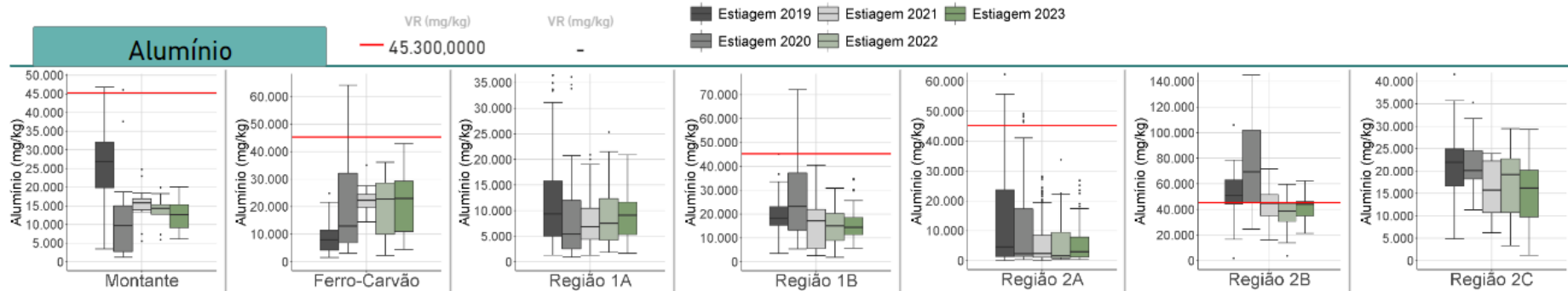


Tabela 11.3.2.1-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Alumínio.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	>	~
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	>	~
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	<	<	>	~
Montante	-	-	<	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	>	~
Montante	-	-	~	>	~	>	>
Região 1A	-	-	-	>	~	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	~	>	~	>	>
Montante	-	-	<	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	~	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.1-6 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.20	~	~	>	<	~	<	<
Est.23 X Est.19	>	<	~	<	<	<	<
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	<	~
Est.22 X Est.20	~	~	~	<	<	<	~
Est.22 X Est.19	>	<	~	<	<	<	~
Est.21 X Est.20	~	~	~	<	<	<	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	<	<
Est.20 X Est.19	>	<	<	>	~	>	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

11.3.2.2. Elementos traço

▪ Chumbo

A distribuição estatística espacial e temporal do Chumbo nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.3.2.2-1** e **Gráfico 11.3.2.2-2** (*boxplots*) e na **Tabela 11.3.2.2-1** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.3.2.2-12** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.3.2.2-1** mostra a evolução do Chumbo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. O **Gráfico 11.3.2.2-2** apresenta a evolução do Chumbo ao longo dos períodos de estiagem, com escala variável.

A concentração de Chumbo na Região Montante, quando comparada com as demais, apresentou oscilação nos valores, entretanto, em todos os períodos os teores ficaram abaixo do valor da Resolução CONAMA 454/12. As medianas mostraram queda entre a estiagem/2019 (19,40 mg/kg) e a estiagem/2020 (12,25 mg/kg), aumento na estiagem/2021 (14,10 mg/kg), queda na estiagem/2022 (12,15 mg/kg) e redução na estiagem/2023 (11,70 mg/kg). O Chumbo apresentou baixa variabilidade nesta porção da bacia do rio Paraopeba. A comparação espacial (**Tabela 11.3.2.2-1**) dessa região em relação a Ferro-Carvão se demonstrou significativamente menor desde 2020. A comparação temporal da estiagem/2023 em relação aos períodos anteriores (**Tabela 11.3.2.2-2**) mostrou redução significativa em relação a 2019 e condição de equilíbrio em relação a 2020, 2021 e 2022.

Na Região Ferro-Carvão, tem-se propensão a elevação das medianas ao longo dos períodos de estiagem analisados. Esse comportamento reflete em um número maior de concentrações acima do VOR nível 1 nas estiagens de 2020 a 2023. Esses quatro períodos de estiagem apontaram aumento significativo em relação a estiagem/2019. Como mencionado, as obras de engenharia e contenção geram o represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão e a consequência é a deposição de sedimentos finos na localidade, sendo esta fração fina a que adsorve mais metais. As medianas observadas nas estiagens foram de 15 mg/kg (2019), 30 mg/kg (2020), 32,90 mg/kg (2021), 33 mg/kg (2022) e 35,90 mg/kg (2023).

A comparação estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) mostra que há diferenças significativamente superiores quando se comparou o período de estiagem/2023 em relação a 2019. Para a comparação de 2023 com os demais anos, os valores não foram significativamente diferentes. As demais comparações históricas entre anos anteriores podem ser conferidas na **Tabela 11.4.2.2-2** e todas elas sempre mostram que os valores de Chumbo sempre foram significativamente maiores em 2020, 2021, 2022 e 2023 em relação a estiagem/2019, o que sugere que o rejeito apresentou menor presença de Chumbo quando comparado às concentrações provenientes de outras partes da bacia.

Na Região 1A, observou-se uma diminuição significativa das concentrações medianas de Chumbo ao longo dos períodos de estiagem, com maior redução a partir de 2020. A estiagem/2019 mostrou valores medianos superiores, de 38 mg/kg, seguido de redução nas concentrações em 2020 (15,50 mg/kg), em 2021 (10,70 mg/kg), em 2022 (9,64 mg/kg) e

aumento em 2023 (11,65 mg/kg). Apesar da constatação de Chumbo no rejeito da barragem B1, as concentrações medianas nas estiagens monitoradas foram inferiores as concentrações detectadas no rejeito (até 50 mg/kg; GEOENVIRON, 2019), além de qualitativamente inferiores as maiores concentrações reportadas nos mapas da CPRM (2018; 32,8 mg/kg) e Arcadis (2020a), com exceção a 2019.

Na **Tabela 11.4.2.2-1** observou-se que essa região apresenta diferenças significativamente superiores as regiões Montante (2019 e 2020) e Ferro-Carvão (2019), enquanto nos demais períodos percebeu-se redução significativa em relação a Região Ferro-Carvão e não se constatou variações significativas em relação a contribuições de Chumbo provenientes da Região Montante. Já a comparação temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) mostrou que as concentrações tiveram diferenças significativamente inferiores entre as estiagens de 2023 e 2019 e 2023 e 2020. Depois, a comparação de 2023 com os anos 2021 e 2022 não indicaram alterações significativas nas concentrações.

Na Região 1B, as variações das concentrações apresentaram redução das medianas desde a estiagem/2020 sendo 34 mg/kg em 2019; 22,90 mg/kg em 2020; 14,60 mg/kg em 2021; 13,85 mg/kg em 2022; e aumento em 2023 com 15,75 mg/kg.

Na análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-1**) percebeu-se que as concentrações de Chumbo na Região 1B foram significativamente superiores do que nas regiões 1A (2020 e 2021), Montante (2020) e Ferro-Carvão (2019). As maiores concentrações medianas ocorreram na estiagem/2019, provavelmente por conta das contribuições da bacia, mas também relacionado a presença do rejeito das barragens. Nos demais períodos percebeu-se redução significativa em relação ao Ferro-Carvão e equilíbrio em relação as regiões Montante e 1A. A comparação temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) mostra que não há diferenças significativamente superiores entre as estiagens. Particularmente, em relação a estiagem/2023 constatou-se redução significativa de Chumbo quando comparado aos anos de 2019 e 2020 e não houve variação significativa quando comparado com os anos 2021 e 2022.

Na Região 2A, os *boxplots* mostram redução gradativa entre as estiagens, tendo em 2019 medianas de 7,70 mg/kg; em 2020 de 5,05 mg/kg; em 2021 de 4,60 mg/kg; em 2022 de 3,04 mg/kg, e em 2023, um leve aumento para 4,25 mg/kg. As baixas concentrações de Chumbo aliadas ao comportamento de redução de concentração, sugerem que as ocorrências deste elemento estejam ligadas a características fontes geogênicas e ou a contribuições difusas locais. A presença de locais com acúmulo sedimentos finos associa-se a maiores quantidades desse metal, haja vista o aumento da superfície específica e capacidade de troca catiônica e adsorção de metais. Destaca-se que nas proximidades do PT-19 há menor velocidade de fluxo em decorrência da maior sinuosidade do rio neste trecho, bem como das dragagens de areia na calha do rio Paraopeba que auxiliam no revolvimento e suspensão de sedimentos e, que por consequência, podem aumentar a concentração do Chumbo no rio, desde que ele esteja presente em minerais formadores de rochas ou até serem produtos de lixiviação ou de reações químicas entre elementos solubilizados no rio Paraopeba ou até erosões marginais dos solos.

A Região 2A mostrou, na análise inferencial espacial (**Tabela 11.4.2.2-1**), que houve diferenças significativamente menores as demais regiões em praticamente todos os períodos monitorados. A comparação estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) mostrou que houve somente diferenças significativamente inferiores na comparação de 2023 com 2019 e que não houve diferenças significativas entre a estiagem/2023 e as estiagens de 2020, 2021 e 2022.

Na Região 2B, as concentrações entre os períodos de estiagem observadas nos *boxplots*, apresentaram similaridade nos valores de medianas com 28,65 mg/kg em 2019; 37,70 mg/kg em 2020, 29,35 mg/kg em 2021, 29,50 mg/kg em 2022 e 27,20 mg/kg em 2023. A análise estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-1**) mostrou que a Região 2B apresentou valores sistematicamente e significativamente superiores às regiões 1A, 1B e 2A e sem variações em relação a Região Montante desde a estiagem/2020 até a de 2023. Enquanto a estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) indicou que a Região 2B mostrou resultados significativamente inferiores quando comparados o período de 2023 com os períodos de estiagem/2020, 2021 e 2022. Nas demais comparações históricas houve outras variações como que na estiagem/2020 a concentração de Chumbo foi significativamente superior que a observada na estiagem/2019. A diferença na avaliação espacial com a temporal pode ser atribuída à frequência do monitoramento que variou ao longo do tempo e alterou o N amostral. Na avaliação espacial, a comparação é com o N amostral de cada região no tempo fixo.

O fato de os teores de Chumbo serem maiores na Região 2B pode estar relacionado ao acúmulo de sedimentos em ambiente de reservatório, transportados em suspensão ao longo do rio Paraopeba e que se depositaram na estiagem, além de contribuições difusas locais, haja vista que os arredores dessa região compreendem áreas desmatadas e com solo exposto, passíveis a erosão, que podem contribuir com a deposição desses sedimentos.

Na Região 2C, observa-se redução gradual das concentrações ao longo dos períodos de estiagem. Tal redução aconteceu desde a estiagem/2019 até a estiagem/2021, com leve aumento das concentrações na estiagem/2022, e posterior redução na estiagem/2023. Os valores das medianas nas estiagens monitoradas foram de 28,30 mg/kg em 2019; 16,50 mg/kg em 2020, 15,20 mg/kg em 2021, 18,30 mg/kg em 2022 e 14,00 mg/kg em 2023. Observou-se que somente na estiagem/2019 houve valores acima do VOR 1, e quem, em nenhuma das estiagens monitoradas houve concentrações acima do VOR 2.

As concentrações de chumbo na Região 2C são inferiores às do reservatório da Região 2B (UHE Retiro Baixo), indicando que o reservatório atuou como um dissipador de sedimentos no próprio local, não contribuindo significativamente com sedimentos provenientes da Região Montante para a Região 2C. A contribuição pode ser local proveniente de mobilização de partículas de áreas desnudas.

A análise estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-1**) mostrou que a Região 2C apresentou valores significativamente superiores à Região 2A em todas as estiagens monitoradas e, superiores as regiões Montante (2020) e a Ferro-Carvão (2019). Em 2023, as concentrações em 2C continuaram significativamente superiores a 2A porém, também se constatou redução em

comparação com Ferro Carvão e 2B e não houve variação significativa em relação as demais regiões.

A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-2**) destacou que não há diferenças significativamente superiores entre as estiagens monitoradas nesta região. Particularmente em 2023, as concentrações foram menores quando comparadas a 2019 e 2020 e mantiveram-se estáveis, ou seja, sem variações significativas nos períodos seguintes.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 265 / 399
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	

Gráfico 11.3.2.2-1 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

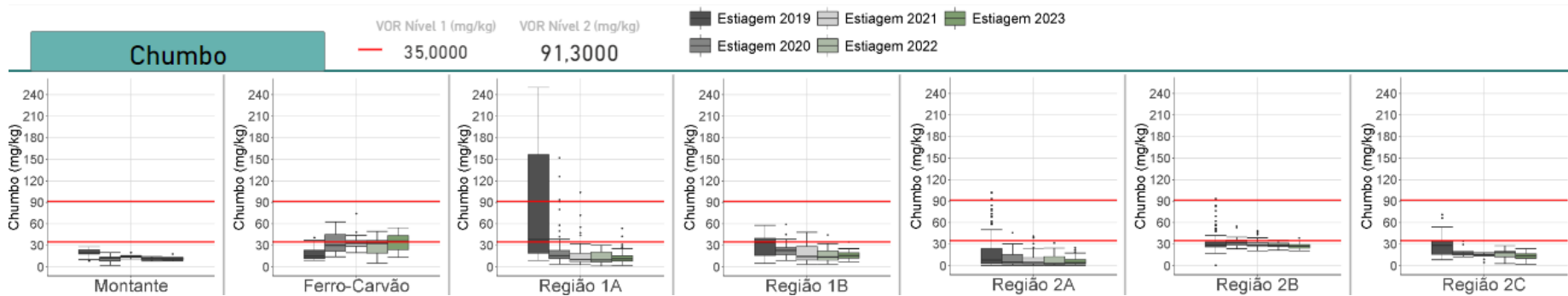


Gráfico 11.3.2.2-2 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

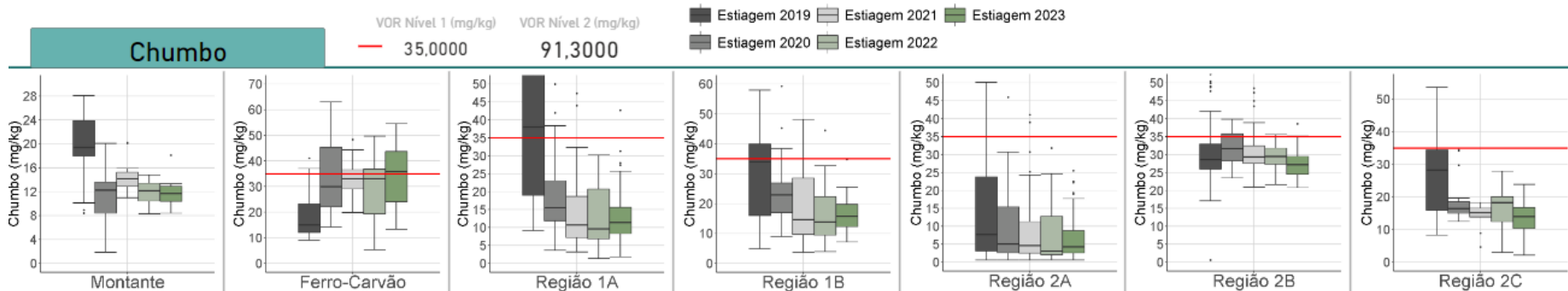


Tabela 11.3.2.2-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Chumbo.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	>	>	~	>	>
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	>	>	<	>	>
Montante	-	-	>	>	<	>	~
Região 1A	-	-	-	<	<	~	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	~

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	<	~
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	<	~
Est.23 X Est.20	~	~	<	<	~	<	<
Est.23 X Est.19	>	<	<	<	<	~	<
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	~	~	<	<	~	<	~
Est.22 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.21 X Est.20	~	>	<	<	~	~	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	~	<
Est.20 X Est.19	>	<	<	<	<	>	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Cobre**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cobre nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4** (*boxplots*) e **Tabela 11.4.2.2-3** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-4** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.3.2.2-3** mostra a evolução do Cobre ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o Cobre teve medianas de concentração na estiagem/2019 de 43 mg/kg. Na estiagem/2020 houve redução e a mediana foi de 12,15 mg/kg. Na estiagem/2021 ocorreu elevação e a mediana foi de 18,45 mg/kg, enquanto na estiagem/2022 a mediana foi de 20,35 mg/kg, e por fim, na estiagem/2023 a mediana reduziu para 17,00 mg/kg (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). A maior redução das medianas foi observada da estiagem/2019 para a estiagem/2020, a partir de 2021 até a estiagem atual (2023), observam-se concentrações semelhantes, com redução da estiagem/2022 para a estiagem/2023. As concentrações do Cobre são relativamente baixas na Região Montante e pode ser decorrente da predominância de lixiviação de materiais empobrecidos neste elemento como os granitoides que são comuns nesta região. Ademais, em relação ao uso e ocupação do solo, não se observou, do ponto de vista regional, áreas de exploração ou uso de Cobre.

A comparação espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou que essa região apresentou diferenças significativamente inferiores a Região Ferro-Carvão desde 2020. A comparação temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou que, historicamente, somente houve variação significativamente inferior dos resultados de 2023 com os da estiagem/2019. Para as demais comparações da estiagem/2023 não houve diferenças significativas com as de 2020, 2021 e 2022 monitoradas nessa região.

Na região do Ferro-Carvão, observou-se pelo *boxplot* incremento das concentrações ao longo dos períodos de estiagem monitorados, sendo que a concentração mais elevada (máxima) observada foi na estiagem/2020, entretanto, a mediana mais elevada foi registrada na estiagem/2021 (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). As concentrações medianas observadas nessa região foram 32,00 mg/kg na estiagem/2019, 47,10 mg/kg na estiagem/2020, 98,10 mg/kg na estiagem/2021, 93,95 mg/kg na estiagem/2022, e 87,40 mg/kg na estiagem/2023. Nota-se que, em todas as estiagens monitoradas, as concentrações foram superiores ao VOR 1 da Resolução CONAMA 454/12, entretanto, sabe-se que, por ser uma área de intervenções de obras, concentrações elevadas são esperadas, haja vista o revolvimento contínuo dos sedimentos na localidade.

A comparação temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) destaca que houve diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2020, 2021, 2022 e 2023 em comparação a estiagem/2019, e na estiagem/2021 em comparação a estiagem/2020. Quando se comparou a estiagem/2023 com as anteriores constatou-se que houve variação significativamente superior na estiagem/2023 em relação a 2019, porém nos demais períodos não se constataram variações significativas.

Na Região 1A, os *boxplots* mostraram diminuição das concentrações de Cobre para todas as estiagens monitoradas, em relação a estiagem/2019, a qual apresentou as maiores concentrações (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). A estiagem/2019 apresentou a maior mediana, com concentração de 32,00 mg/kg, e os ciclos de estiagem posteriores apresentaram redução significativa em relação a estiagem/2019, sendo: 12,95 mg/kg na estiagem/2020, 12,60 mg/kg na estiagem/2021 e 2022, e 15,20 mg/kg na estiagem/2023. Observou-se que a partir da estiagem/2020, as medianas apresentaram certa similaridade entre si, sobretudo nas estiagens de 2021 e 2022, que mostrou manutenção dos valores. Importante mencionar a presença de Cobre no sedimento natural, entretanto, estes estão mais empobrecidos nessa região, com concentrações entre 6 e 12 mg/kg, com base nos dados da CPRM (2018). Considerando que a Região 1A foi afetada pelo rompimento da barragem e que os sedimentos ali depositados têm característica química de rejeitos, a ocorrência do Cobre pode estar relacionada com acúmulo de sedimentos contendo rejeito e a própria bacia. Esta avaliação levou em consideração a constatação que o rejeito original teve concentrações de Cobre com mediana de 50 mg/kg e máxima de 150 mg/kg (GEOENVIRON, 2019), as quais foram maiores que as concentrações observadas nos dados de sedimento de corrente da CPRM (2018) pré-rompimento.

A comparação espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou que essa região não apresentou diferenças significativamente em relação à Região Montante desde 2019 e apresentou diferenças significativamente menores em relação a Região Ferro-Carvão desde 2020, ou seja, esta região não teve influência ou contribuições de Cobre de regiões Montante e nem atribuídas ao rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A.

A comparação estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou que as concentrações de Cobre foram mais elevadas nesta região em 2019 em relação a todos os demais períodos. Ademais, quando se compara o período de estiagem atual com os de 2020, 2021 e 2022 não se constatou variação significativa entre as estiagens.

Na Região 1B, o *boxplot* mostrou diminuição das concentrações ao longo do tempo (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**), com as concentrações medianas mais altas que nas regiões Montante e 1A. A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou diferenças significativamente superiores em relação as regiões Montante (estiagens de 2019 e 2020), Região 1A (2019 a 2021) e Ferro-Carvão (2019), enquanto a análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou significativa tendência de redução de concentrações em grande parte dos períodos de estiagem analisados. As medianas nos períodos chuvosos analisados foram: 61 mg/kg na chuva 2019; 44,20 mg/kg na chuva 2019/2020; 27,80 mg/kg na chuva 2020/2021; 28,70 mg/kg na chuva 2021/2022; e 27,40 mg/kg na chuva 2022/2023.

Na Região 2A, as concentrações medianas de Cobre foram semelhantes às da Região Montante (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). As medianas registradas na Região 2A foram: 22,70 mg/kg na estiagem/2019; 4,59 mg/kg na estiagem/2020; 4,45 mg/kg na estiagem/2021; 2,74 mg/kg na estiagem/2022; e 5,06 mg/kg na estiagem/2023. Apesar da estiagem/2019 apresentar as maiores medianas, as concentrações em desacordo com a

Resolução CONAMA 454/12 de Cobre nesta região foram pontuais. É possível que este comportamento esteja ligado ao fato desta região ter menor contribuição de materiais contendo Cu, haja vista a caracterização geológica local e dos solos. Estes valores se assemelharam as variações identificadas com os dados da CPRM 2008 a 2009 (12 mg/kg a 40 mg/kg).

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou que a Região 2A apresentou diferenças significativamente inferiores em relação as demais regiões em quase todas as comparações, indicando que a presença de Cobre nela sempre foi reduzida em relação as regiões a montante dela. Na análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**), mostrou que entre as estiagens monitoradas, as diferenças significativamente inferiores foram identificadas na comparação da estiagem/2019 com todas as demais, incluindo 2023. Entretanto, ao se comparar os períodos de estiagem/2023 com os demais, não se constatou variação significativa de Cobre na região monitorada.

Na Região 2B, região do reservatório da UHE Retiro Baixo, o comportamento do Cobre é de redução entre as estiagens (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). Assim, na estiagem/2019 a mediana foi de 44,45 mg/kg, na estiagem/2020 de 42,40 mg/kg, na estiagem/2021 de 41,20 mg/kg, na estiagem/2022 de 40,50 mg/kg, e na estiagem/2023 de 39,00 mg/kg.

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**), mostrou que houve diferenças significativamente superiores em relação as regiões Montante, 1A, 1B e 2A desde 2020. Por outro lado, mostrou valor significativamente inferior em relação a Região Ferro-Carvão no mesmo período, indicando presença de Cu no rejeito, porém que não afetou significativamente os trechos do rio Paraopeba a jusante. De acordo com a comparação temporal de 2023 em relação aos demais períodos (**Tabela 11.4.2.2-4**), a Região 2B mostrou resultado significativamente inferior em relação a 2019 e 2020 e não mostrou diferenças significativamente comparados com as estiagens de 2021 e 2022.

Na Região 2C, o *boxplot* mostrou pouca oscilação dos valores medianos, com certa semelhança entre si (**Gráfico 11.3.2.2-3** e **Gráfico 11.3.2.2-4**). Na estiagem/2019, a mediana foi de 18,90 mg/kg, na estiagem/2020 de 16,05 mg/kg, na estiagem/2021 de 20,10 mg/kg, na estiagem/2022 de 24,05 mg/kg, e na estiagem/2023 de 17,70 mg/kg. As concentrações neste trecho podem estar relacionadas as condições locais, como desmatamentos e solos expostos, que promovem a erosão dos solos e aporte ao canal fluvial.

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou diferenças significativamente superiores somente em relação a Região 2A (estiagens de 2020 a 2023), em relação as demais regiões mostrou inferioridade ou manutenção, não tendo uma tendência predominante identificada em relação às regiões de Montante. A análise estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou que não houve diferenças significativas entre as estiagens monitoradas.

Gráfico 11.3.2.2-3 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

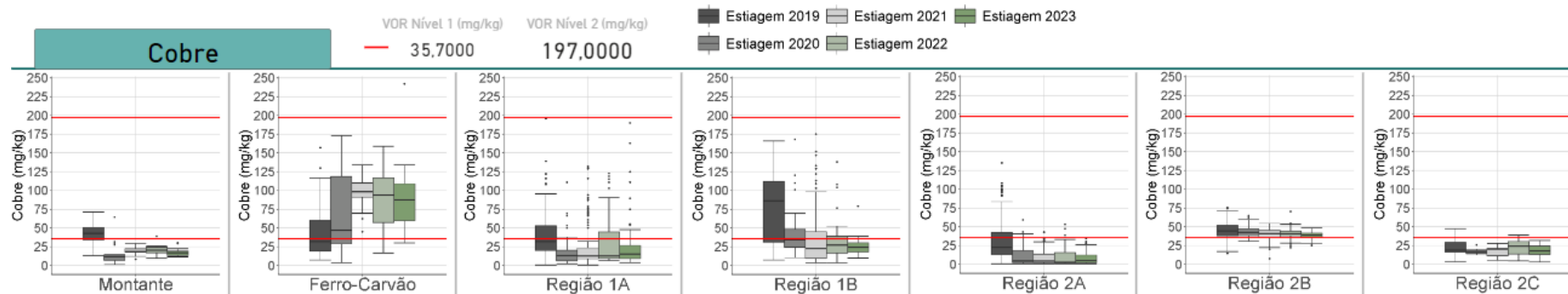


Gráfico 11.3.2.2-4 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

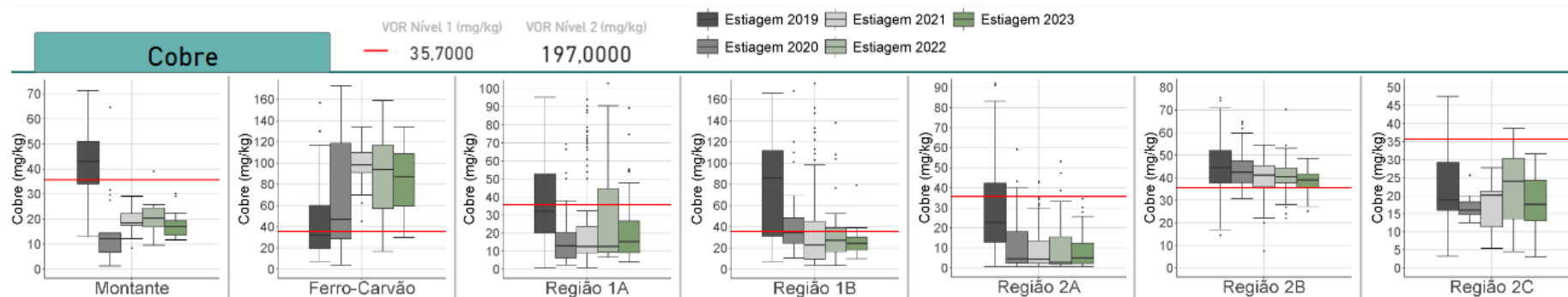


Tabela 11.3.2.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cobre.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	>	~	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	>	<	~	<
Montante	-	-	~	>	<	~	<
Região 1A	-	-	-	>	<	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	<	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-4 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cobre em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.20	~	~	~	<	~	<	~
Est.23 X Est.19	>	<	<	<	<	<	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.19	>	<	<	<	<	<	~
Est.21 X Est.20	>	~	~	~	~	~	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	<	~
Est.20 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

- **Níquel**

A distribuição estatística espacial e temporal do Níquel nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6** (*boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.2-5** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-6** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.2-5** mostra a evolução do Cádmiio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o Níquel apresentou pouca oscilação das concentrações para os períodos sazonais, sobretudo entre a estiagem/2021 e a estiagem/2023, onde os valores medianos apresentaram semelhança entre si, com tendência de redução. As concentrações medianas nessa região apresentaram os seguintes valores: 43,00 mg/kg na estiagem/2019, 12,15 mg/kg na estiagem/2020, 18,45 mg/kg na estiagem/2021, 20,35 mg/kg na estiagem/2022 e 17,00 mg/kg na estiagem/2023 (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**), esses valores são um pouco mais elevados quando, qualitativamente, comparados com os dados da CPRM de 2008 e 2009 (CPRM, 2018) nos sedimentos da bacia do rio Paraopeba, que oscilaram entre 5 e 11,7 mg/kg (Arcadis, 2020b).

De acordo com a análise estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-5**) observou-se que essa região desde 2020 apresenta concentrações significativamente inferiores a região do Ferro-Carvão. De acordo com a análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-6**), observou-se que entre as estiagens monitoradas não houve diferenças significativamente superiores, somente diferenças significativamente inferiores nas estiagens de 2020, 2022 e 2023 em relação a estiagem/2019, e, no restante dos períodos analisados, não houve diferenças significativas.

Na Região Ferro-Carvão, o comportamento do Níquel é, em geral, de elevação das concentrações medianas ao longo das estiagens monitoradas. Nota-se que, a cada estiagem, a mediana apresenta elevação em relação a estiagem anterior, com exceção da estiagem/2022, que apresentou leve redução em relação a estiagem/2021. Observa-se que em todas as estiagens monitoradas, foram registradas concentrações superiores ao VOR 1 e 2, e que, as menores concentrações foram identificadas na estiagem/2019. Neste trecho é importante considerar que o aumento do Níquel pode ocorrer devido a alteração do ambiente em decorrência das obras de engenharia que acontecem desde o início do monitoramento, na região. Assim, na estiagem/2019 a mediana foi de 32,00 mg/kg, na estiagem/2020 a mediana foi de 47,10 mg/kg, na estiagem/2021 a mediana foi de 98,10 mg/kg, na estiagem/2022 a mediana foi de 93,95 mg/kg e na estiagem/2023 a mediana foi de 87,40 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**).

De acordo com a análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-6**) foram observadas diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2020, 2021, 2022 e 2023 quando comparadas a estiagem/2019, e na estiagem/2023 comparada a estiagem/2022. Nos rejeitos originais avaliados pela Geoenviron (2019), as concentrações medianas de Níquel chegaram a 50 mg/kg, ou seja, os valores nos sedimentos detectados no ribeirão Ferro-Carvão, até 2021, foram qualitativamente menores em relação ao rejeito e mais elevados quando comparados

qualitativamente com os dados da CPRM 2008 a 2009 (CPRM, 2018). A partir de 2022 são observados aumentos nas medianas do Ni no Ferro-Carvão.

Na Região 1A, observou-se redução das medianas entre os períodos de estiagem/2019 e 2020, e aumento gradual a partir da estiagem/2021 até a estiagem/2023 (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**). Na estiagem/2019, a mediana foi de 23,00 mg/kg, 15,80 mg/kg na estiagem/2020, 10,60 mg/kg na estiagem/2021, 12,20 mg/kg na estiagem/2022 e 13,95 mg/kg na estiagem/2023. Notou-se que, somente na estiagem/2019 a mediana foi superior ao VOR nível 1.

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-5**) mostrou que a Região 1A apresentou concentrações significativamente superiores a Região Ferro-Carvão somente na estiagem/2019 e depois foram constantemente inferiores até 2023. Já com comparação a Região Montante não houve variação significativa nas concentrações de ambas as regiões ao longo dos períodos de estiagem. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-6**) mostrou que não foram observadas diferenças significativamente entre a estiagem/2023 e as mais recentes, de 2020 até 2021.

Na Região 1B, a ocorrência do Níquel pode estar associada com a lixiviação de rejeitos nos primeiros períodos sazonais, porém do ponto de vista de origem, a região possui rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima que contém Níquel em sua constituição (VICQ *et al*, 2018), com concentrações entre 18,9 mg/kg a maiores que 38,4 mg/kg, em acordo com os dados da CPRM (2018). Esses resultados, quando comparados qualitativamente, sugerem pouca contribuição do rejeito contendo níquel nesta localidade. Isso corrobora com as medianas observadas na estiagem/2019 (36,00 mg/kg), estiagem/2020 (23,70 mg/kg), estiagem/2021 (16,10 mg/kg), estiagem/2022 (16,65 mg/kg) e estiagem/2023 (18,90 mg/kg), observadas no *boxplot* do **Gráfico 12.4.2.2-6**.

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-5**) mostrou que a Região 1B teve valores significativamente superiores de Ni que as regiões Montante (estiagens de 2019 e 2020), 1A (estiagens de 2019 a 2021) e Ferro-Carvão (estiagem/2019), porém ao se avaliar o comportamento da Região 1B como um todo percebeu-se que desde 2022, e o mesmo se repetiu em 2023, que as concentrações na 1B estão significativamente menores que na Região Ferro-Carvão e não tiveram variação estatística significativa quando comparados com as regiões Montante e 1A. A **Tabela 11.4.2.2-6** mostra a avaliação estatística temporal mostrou que quando se compara a estiagem/2023 com as demais estiagens avaliadas percebeu-se que foi estatisticamente significativa e menor em relação a 2019 e 2020 e que não houve diferenças significativas em valores de Ni em relação a 2021 e 2022.

Na Região 2A, as concentrações medianas se assemelharam com os valores mais reduzidos da Região 1A, sendo ambas localizadas em ambiente lótico com trechos sinuosos, onde normalmente são acumulados maior quantidade de sedimentos finos, e que também mostraram reduções significativas e graduais ao longo dos períodos sazonais (**Tabela 11.4.2.2-5** e **Tabela 11.4.2.2-6**). Na estiagem/2019, a mediana do Níquel foi de 19,70 mg/kg, na estiagem/2020 a mediana foi de 12,80 mg/kg, a partir da estiagem/2021 observa-se que as

medianas das estiagens subsequentes apresentaram manutenção, com valores de 0,50 mg/kg, em 2021, 2022 e 2023 (**Gráfico 12.4.2.2-6**).

O *boxplot* da Região 2B mostrou que as medianas foram 25,3 mg/kg na estiagem/2019; 30,30 mg/kg na estiagem/2020 (que apresentou a maior mediana encontrada nessa região); 25,70 mg/kg na estiagem/2021; 22,9 mg/kg na estiagem/2022; e 26,80 mg/kg na estiagem/2023. Todas as medianas apresentaram-se acima do VOR nível 1 (18 mg/kg). Por ser uma região em ambiente lótico do reservatório de Retiro Baixo, e, sabendo-se que no ano de 2020 ocorreram chuvas de volumes históricos, é possível sugerir maior influência, com aumento no transporte de sedimentos e o consequente aumento da deposição. A Região 2B apresenta comportamento das medianas de Níquel diferente das demais regiões, com concentrações significativamente maiores que as demais regiões (**Tabela 11.4.2.2-5**). Temporalmente (**Tabela 11.4.2.2-6**). Essa região não apresentou uma tendência temporal, sendo verificado que em 2023, ainda se notou que as concentrações ficaram maiores que em 2022, enquanto a comparação com 2021 foi de não variação significativa e em 2020 de redução, o que sugere que haja alguma contribuição difusa local, potencialmente associada ao uso do solo local.

Para a Região 2C, observou-se semelhança nos valores medianos desde a estiagem/2019 até 2021, com aumento das concentrações na estiagem/2022 e redução da mediana em 2023. As estiagens monitoradas apresentaram medianas em 2019 de 12,30 mg/kg; em 2020 de 11,25 mg/kg; em 2021 de 10,60 mg/kg; em 2022 de 16,45 mg/kg; e 2022/2023 de 13,30 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-6**).

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-5**) mostra que a Região 2C apresentou valores significativamente superiores a Região 2A na estiagem/2023, no restante dos períodos, as diferenças foram inferiores, ou apresentou manutenção. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-6**) mostrou que os resultados que houve alteração significativa nas concentrações de Ni na Região 2C que visto que em 2019 e 2020, os dados eram menores que praticamente todas as regiões; em 2021 e 2022 ficaram significativamente menores somente quando comparados com as regiões Ferro Carvão e 2B, enquanto as comparações para as demais regiões não teve variação e em 2023, já se observou aumento significativo em relação a Região 2B, enquanto nas demais regiões não houve variação significativa ou ficaram mais baixas.

Na avaliação estatística temporal, ao se avaliar a estiagem/2023 com os períodos anteriores teve-se que as concentrações de 2023 foram significativamente maiores somente que em relação a 2020, enquanto nos demais períodos se manteve se variação.

Gráfico 11.3.2.2-5 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

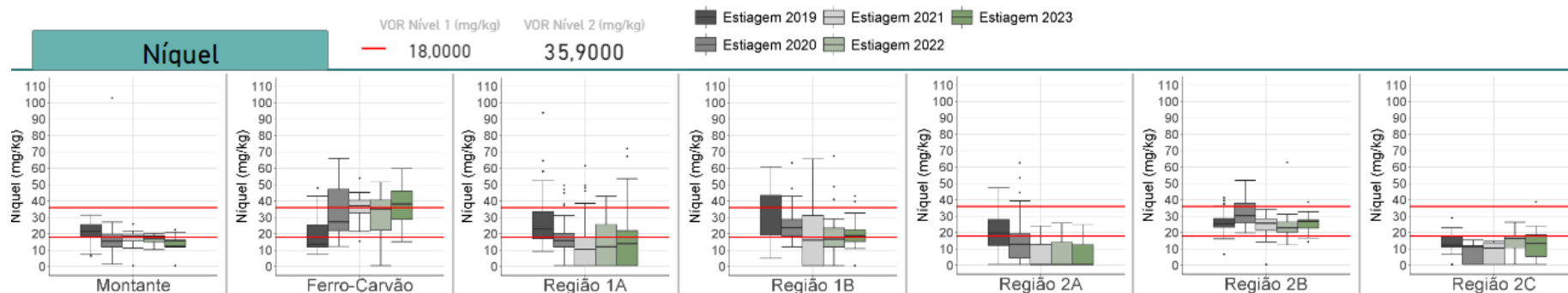


Gráfico 11.3.2.2-6 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

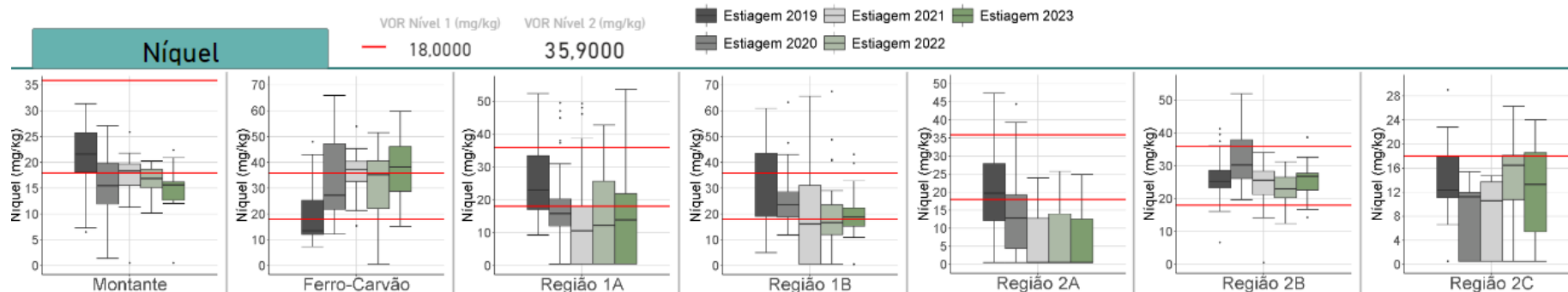


Tabela 11.3.2.2-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Níquel.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	>	~	>	<
Região 1A	-	-	-	>	~	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	>	>	~	>	~
Montante	-	-	~	>	~	>	<
Região 1A	-	-	-	>	<	~	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-6 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Níquel em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	>	~	~	~	~	>	~
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.20	~	~	~	<	<	<	>
Est.23 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	<	~
Est.22 X Est.20	~	~	~	<	<	<	>
Est.22 X Est.19	>	<	<	<	<	<	~
Est.21 X Est.20	~	~	<	<	<	<	~
Est.21 X Est.19	>	~	<	<	<	~	~
Est.20 X Est.19	>	<	<	<	<	>	<

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Cádmio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cádmio nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.4.2.2-7** e **Gráfico 11.4.2.2-8** (*boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.2-7** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-8** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.2-7** mostra a evolução do Cádmio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Ao se avaliar o gráfico *boxplot* do Cádmio observa-se que este parâmetro apresentou pouca disponibilidade na bacia, e os resultados, quando disponíveis, mostraram baixa ocorrência em todos os períodos de estiagem avaliados, visto que os dados das análises de rejeito praticamente não identificaram este elemento (GEOENVIRON, 2019) e que dados da CPRM (2018), também apresentam pouca ocorrência de Cádmio no rio Paraopeba, predominando com concentração de 0,1 mg/kg. Assim, é de se esperar a baixa ocorrência deste elemento nos sedimentos analisados. Contudo, as variações do Cd devem-se possivelmente a contribuições locais e difusas da bacia, indicado pela presença de concentrações quantificáveis na Região Montante, e até mesmo pelo acúmulo de materiais finos no ribeirão Ferro-Carvão.

Em comparação com o período de estiagem anterior (estiagem/2022), a estiagem/2023 mostrou, de modo geral, redução dos valores de Cd para maioria das regiões, quando quantificadas. Somente a Região 1A mostrou aumento das concentrações (mediana, P75 e máxima). A Região Ferro-Carvão foi a que mais apresentou oscilação das concentrações, exibindo desde a estiagem/2021, valores acima do VOR 1. Como a região é represada, os sedimentos finos tendem a se dissipar e se acumularem na lagoa de decantação, aumentando as concentrações associadas a estes finos.

No atual período de estiagem, o Cd apresentou resultados acima do LQ para todas as regiões monitoradas, exceto para as regiões 2A e 2C. De modo geral, observa-se concentrações medianas mais elevadas na estiagem/2023 em comparação com a anterior somente na Região 1A, as demais regiões mostraram medianas mais reduzidas comparando-se com a estiagem/2022. A Região 2A não apresentou, em nenhuma estiagem monitorada, valores quantificáveis, já a Região 2C, exibiu valores quantificáveis somente na estiagem/2022. A Região 1A foi a que mais apresentou valores quantificáveis, ao longo do monitoramento, sendo possível observar esses valores desde a estiagem/2020.

A Região Montante exibiu valores quantificáveis a partir da estiagem/2021, com aumento do P75 na estiagem/2022 em relação a 2021, e redução em 2023 em relação a 2022. As concentrações medianas para essa região permaneceram em 0,10 mg/kg (LQ). De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**) observou-se que a Região Montante não apresentou concentrações significativamente superiores a nenhuma das demais regiões. A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostrou que a Região Montante apresentou concentrações significativamente superiores na estiagem/2021 em relação a estiagens de 2019 e 2020, bem como na estiagem/2023 em relação as estiagens de 2019 e 2020.

A Região do Ferro-Carvão apresentou os maiores valores de Cádmio, em relação as demais regiões monitoradas, com redução na estiagem/2023 em comparação com 2022 (**Gráfico 11.4.2.2-8**), com medianas de 0,43 mg/kg (estiagem/2021); 0,51 mg/kg (estiagem/2022) e 0,35 mg/kg (estiagem/2023). Como a região é represada, os sedimentos finos tendem a se dissipar e se acumularem na lagoa de decantação, que favorecem a oscilação das concentrações associadas a estes finos. A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostra que a Região Ferro-Carvão apresentou concentrações significativamente superiores na estiagem/2021 em relação a estiagem/2019 e 2020, na estiagem/2022 em relação as estiagens de 2019 e 2020 e na estiagem/2023 em relação as estiagens de 2019 e 2020. Enquanto na estiagem/2023, exibiu concentrações significativamente inferiores em relação a estiagem/2022.

Já a Região 1A mostrou manutenção das concentrações entre a estiagens de 2021 e 2022 (**Gráfico 11.4.2.2-8**), com medianas baixas e iguais ao LQ (LQ<0,1 mg/kg) até a estiagem/2022, apresentando aumento somente na estiagem/2023. Ressalta-se que na estiagem atual, foram registradas as maiores concentrações, tanto de mediana, quanto de P75 e máxima, entretanto, todas abaixo do VOR 1. De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**) a Região 1A apresentou concentrações de Cádmio significativamente superiores que as regiões Ferro-Carvão (estiagem/2020) e Montante (estiagens de 2019 e 2020). A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostrou que a Região 1A apresentou concentrações significativamente superiores na estiagem/2021 em relação a estiagem/2019, na estiagem/2022 em relação as estiagens de 2019 e 2020, e na estiagem/2023 em relação as anteriores (2019, 2020 e 2021).

Na Região 1B, concentrações de Cd foram detectáveis somente nas estiagens 2021, 2022 e 2023, sendo que dentre essas, a que apresentou as menores concentrações foi a estiagem/2023, por outro lado, a estiagem anterior (2022), exibiu os teores mais elevados. A mediana na estiagem/2022 foi de 0,19 mg/kg. Tais resultados indicam a baixa ocorrência do Cádmio, como já citado, uma vez que além dos poucos resultados detectados, as concentrações observadas estão abaixo do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, que é de 0,6 mg/kg. De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**) a Região 1B apresentou concentrações de Cádmio significativamente superiores as concentrações da Região Montante somente na estiagem/2022, nos demais períodos houve manutenção das concentrações, ou concentrações inferiores. A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostra que a Região 1B apresentou concentrações significativamente superiores na estiagem/2021 em relação as estiagens de 2019 e 2020, na estiagem/2022 em relação as estiagens de 2019, 2020 e 2021, e na estiagem/2023 em relação as estiagens de 2019 e 2020, por outro lado, comparando-se a estiagem/2023 com a estiagem/2022, as concentrações foram significativamente inferiores.

A Região 2A não apresentou em nenhuma estiagem monitorada, concentrações detectáveis, não sendo possível fazer qualquer comparação. De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**), a Região 2A não apresentou concentrações de Cádmio significativamente superiores a nenhuma outra região, apresentando somente diferenças inferiores ou, em alguns períodos, não exibindo diferenças significativas. A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostra que a Região 2A apresentou concentrações significativamente superiores nas

comparações entre as estiagens, exceto na estiagem/2020 em relação a estiagem/2019 e na estiagem/2023 em relação a estiagem/2022, que não apresentaram diferenças significativas.

Na Região 2B as concentrações detectáveis foram observadas a partir da estiagem/2021, sendo que, as medianas da estiagens de 2021 e 2023 ficaram abaixo do LQ. Os valores de P75 desses dois períodos de estiagem (2021 e 2023) foram bastante semelhantes. Por outro lado, a mediana da estiagem/2022 foi de 0,17 mg/kg, e os valores de P75 foram os mais elevados dentre os demais períodos. De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**) a Região 2B apresentou concentrações de Cádmio significativamente superiores as concentrações das regiões Montante (estiagem/2022), Ferro-Carvão (estiagem/2020), 2A (estiagens de 2020 a 2022) e 1B (estiagem/2020) pois uma pequena ocorrência acima do LQ já faz alguma diferença mesmo com concentrações bem pequenas. A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostra que a Região 2B apresentou concentrações significativamente superiores nas comparações entre as estiagens, exceto na estiagem/2020 em relação a estiagem/2019 e na estiagem/2023 em relação a estiagem/2022, a qual apresentou concentrações significativamente inferiores.

A Região 2C mostrou concentrações quantificáveis somente na estiagem/2022, com mediana de 0,16 mg/kg. Todos esses valores foram inferiores ao VOR 1 da Resolução CONAMA 454/12 (**Gráfico 14.4.2.2-8**). De acordo com a estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-7**) a Região 2C apresentou concentrações de Cádmio significativamente superiores as concentrações das regiões Montante, Ferro-Carvão e 1B (estiagem/2020), e 2A (estiagens de 2020 e 2022). A estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**) mostra que a Região 2C apresentou concentrações significativamente superiores na comparação entre a estiagem/2022 e as anteriores (2019, 2020 e 2021), enquanto na estiagem/2023 em relação a estiagem/2022, os valores foram significativamente inferiores.

Gráfico 11.3.2.2-7 Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

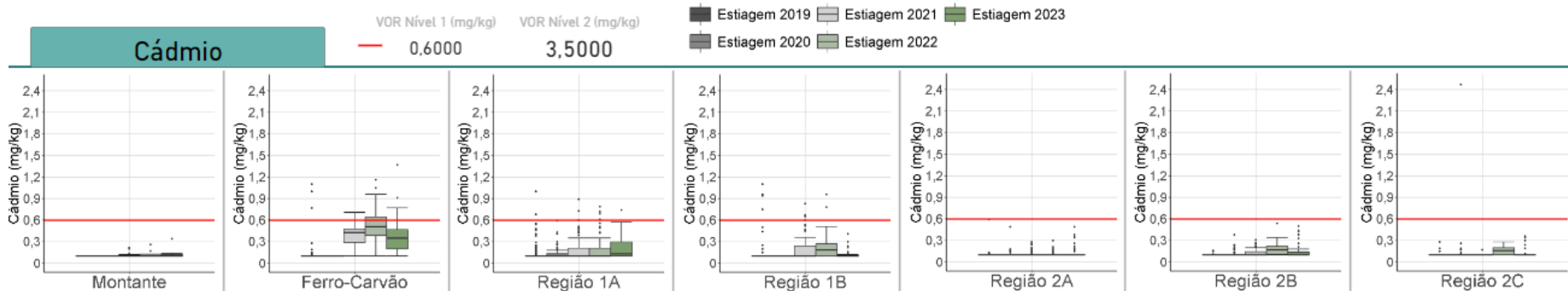


Gráfico 11.3.2.2-8 Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

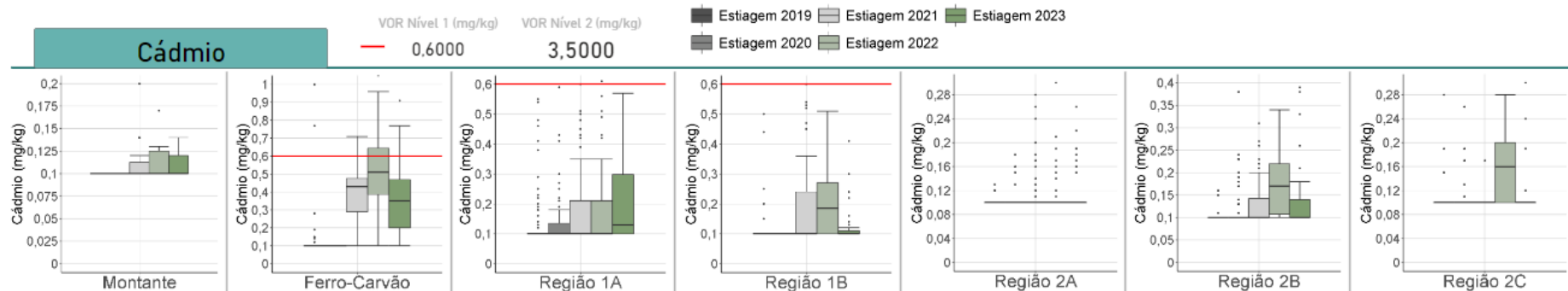


Tabela 11.3.2.2-7 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cádmiu.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	~	~
Região 1A	-	-	-	<	<	<	<
Região 1B	-	-	-	-	~	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	~	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	>	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	~
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	~	~
Região 1A	-	-	-	~	<	~	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	>	~	~	>	>
Montante	-	-	>	~	~	~	>
Região 1A	-	-	-	<	<	<	~
Região 1B	-	-	-	-	~	>	>
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	~	~	<	<	~
Montante	-	-	>	~	~	~	~
Região 1A	-	-	-	<	<	<	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	~
Região 2A	-	-	-	-	-	~	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	~
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-8 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cádmio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	<	~	~	<	~	<	<
Est.23 X Est.21	~	~	>	~	>	~	~
Est.23 X Est.20	>	>	>	>	>	>	~
Est.23 X Est.19	>	>	>	>	>	>	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	>	>	>	>
Est.22 X Est.20	>	~	>	>	>	>	>
Est.22 X Est.19	>	~	>	>	>	>	>
Est.21 X Est.20	>	>	~	>	>	>	~
Est.21 X Est.19	>	>	>	>	>	>	~
Est.20 X Est.19	~	~	~	~	~	~	~

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Arsênio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Arsênio nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10** (*boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.2-9** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-10** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.2-9** mostra a evolução do Arsênio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*, enquanto o **Gráfico 11.3.2.2-10** apresenta todos os resultados analíticos em escala variável.

A bacia do rio Paraopeba mostra ocorrência de Arsênio em toda a sua extensão. Na Região Montante, observando os *boxplots*, nota-se que as concentrações medianas de Arsênio se mantiveram próximas ao longo dos períodos sazonais, entre VOR nível 1 e o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12, fruto da ocorrência deste elemento na área do córrego Casa Branca (Arcadis, 2020b).

Na Região Montante, a estiagem/2019 apresentou mediana para Arsênio no valor de 11,70 mg/kg, seguido de redução na estiagem/2020, com mediana de 7,09 mg/kg, com posterior aumento da mediana na estiagem/2021, sendo de 10,55 mg/kg, na estiagem/2022 a mediana apresentou leve redução, sendo 10,30 mg/kg, por fim, na estiagem/2023 a mediana apresentou nova redução, sendo de 9,21mg/kg. (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**).

De acordo com a **Tabela 11.4.2.2-9**, as concentrações apresentaram diferenças significativamente superiores a Região Ferro-Carvão na estiagem/2019 e nas demais foram predominantemente inferiores. As oscilações de concentrações observadas não apresentaram diferenças significativas entre a estiagem/2023 e as estiagens analisadas de 2020 a 2022 (**Tabela 11.4.2.2-9**).

Na Região Ferro-Carvão, as concentrações de Arsênio apresentaram o mesmo comportamento observado para os demais metais analisados, em que há elevação das concentrações ao longo das estiagens avaliadas (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**). Na estiagem/2019, a mediana foi de 2,40 mg/kg; em 2020, de 8,61 mg/kg; em 2021, de 15,75 mg/kg; em 2022, de 13,90 mg/kg, e em 2023 de 14,60 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**).

A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) mostrou aumento significativo entre os períodos de estiagem de 2020, 2021, 2022 e 2023 em comparação com a estiagem/2019, e nas estiagens de 2021 e 2023 em comparação com a estiagem/2020. Este comportamento, de tendência de elevação, sustenta a hipótese de que as obras de contenção, que alteraram o ambiente lótico para intermediário, na Região do Ferro-Carvão resultaram na elevação das concentrações de metais pontualmente nesta região. No entanto, na comparação entre a estiagem/2023 e a estiagem/2022, não foram observadas diferenças significativas.

Na Região 1A, os *boxplots* exibiram concentrações medianas similares ao longo dos períodos de estiagem monitorados (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**) e similares aos valores da Região 1B. As concentrações medianas foram, em 2019 (7,21 mg/kg), em 2020 (7,28 mg/kg), em 2021 (8,75 mg/kg), em 2022 (8,29 mg/kg), em por fim, em 2023 (8,96 mg/kg). Na

Região 1A. A **Tabela 11.4.2.2-9** mostra a variação espacial entre as regiões. No caso da Região 1A, as concentrações foram significativamente superiores a Região Ferro-Carvão somente na estiagem/2019, enquanto nos demais períodos foram significativamente inferiores e não variaram significativamente quando comparados aos resultados da Região Montante. Na **Tabela 11.4.2.2-9** observa-se que não houve diferenças significativas temporais entre as estiagens monitoradas.

Na Região 1B, as concentrações medianas se mantiveram relativamente próximas ao longo dos períodos sazonais, e apresentaram incremento nas estiagens de 2020, 2021, 2022 e 2023 em comparação a 2019. As concentrações medianas para os diferentes períodos de estiagem foram de 8,90 mg/kg (2019), 10,60 mg/kg (2020), 10,00 mg/kg (2021), 13,55 mg/kg (2022) e 10,80 mg/kg (2023).

Na avaliação estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-9**), observa-se que a Região 1B mostrou diferenças significativamente superiores as regiões Montante (estiagem/2020), 1A (estiagens de 2020, 2022 e 2023), e Ferro-Carvão (estiagem/2019). Enquanto a avaliação estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) apresentou diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2020 e 2022 em relação a estiagem/2019.

É importante destacar que a ocorrência do Arsênio pode estar associada a contribuições de materiais lixiviados de rochas locais do Complexo Belo Horizonte em que predominam os gnaisses e granitoides, bem como de rochas metavulcanossedimentares do Grupo Nova Lima, que contém minerais como arsenopirita, que possuem arsênio em sua composição e que, quando lixiviadas e oxidadas mobilizam esse parâmetro para o sedimento. Além disso, as erosões marginais podem mobilizar solos para o canal fluvial, colaborando para eventual variação de Arsênios, quando presente nesta matriz.

As medianas de Arsênio da Região 2A nos períodos de estiagem analisados, apresentaram semelhança entre si, com pequenas oscilações (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**). As medianas, para os diferentes períodos de estiagem, foram: de 4,60 mg/kg (2019), de 3,93 mg/kg (2020), de 3,81 mg/kg (2021), 2,93 mg/kg (2022), e 3,59 mg/kg (2023). Todas as medianas ficaram abaixo do VOR 1, entretanto, todos os valores de P75 ficaram acima do VOR 1. A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-9**) mostrou que essa região não apresentou diferenças significativamente superiores em relação as demais regiões, do mesmo modo, a análise temporal não apresentou diferenças significativas entre as estiagens monitoradas (**Tabela 11.4.2.2-10**). Ressalta-se que, atividades de exploração de areia ao longo desta região, podem remobilizar sedimentos de fundo e ressuspender o As sedimentado, promovendo dispersão do material e nova deposição, o que pode ajudar a justificar as variações deste elemento nos diferentes períodos monitorados.

Na Região 2B, no reservatório da UHE Retiro Baixo, a avaliação dos *boxplots* mostrou oscilação entre as medianas ao longo dos períodos de estiagens monitorados, com aumento na estiagem/2020, 2021 e 2022 e diminuição na estiagem/2023 em relação a estiagem/2019 (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**). Todas as medianas ficaram acima do VOR nível 1

(5,9 mg/kg) e todas as concentrações máximas ficaram acima do VOR nível 2 (17 mg/kg), (exceto na estiagem/2023).

A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-9**) mostrou que essa região apresentou, diferenças significativamente superiores em relação as regiões Montante (estiagens de 2020, 2022 e 2023), Ferro-Carvão (estiagens de 2019 e 2020), 1A (estiagens de 2019 a 2023), 1B (estiagens de 2019 a 2021), 2A (estiagens de 2019 a 2023). A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) apresenta diferenças significativamente superiores somente na estiagem/2020 em relação a estiagem/2019. As medianas, para os diferentes períodos de estiagem, foram de 13,15 mg/kg (2019), de 15,30 mg/kg (2020), de 13,65 mg/kg (2021), 13,80 mg/kg (2022) e 11,80 mg/kg (2023). Ou seja, o aporte de Arsênio no reservatório se manteve muito semelhante em todos os períodos sazonais, desde o rompimento da barragem, o que sugere que as condições de reservatório/ambiente mais lântico, com acúmulo de sedimentos e metais de regiões a montante ou do escoamento superficial, seja o fator predominante nas concentrações deste analito.

Em relação à Região 2C, os gráficos *boxplots* (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**) mostraram oscilação nas concentrações de As, com tendência de aumento desde a estiagem/2019 e elevação das medianas ao longo das estiagens avaliadas. Os valores medianos registrados nessa região foram: 4,30 mg/kg (2019), 6,08 mg/kg (2020), 5,98 mg/kg (2021), 9,47 mg/kg (2022) e, 6,07 mg/kg (2023). Nota-se que as medianas da estiagem de 2020, 2021, 2022 e 2023 foram superiores ao VOR 1, e a concentração máxima na estiagem/2022 foi superior ao VOR 2.

Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-9**), as concentrações da Região 2C, nota-se que tal região mostrou diferenças significativamente superiores a Região 2A somente na estiagem/2022, enquanto na maioria das comparações os valores de As foram significativamente menores que nas regiões de montante nos períodos de estiagem. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) mostrou elevação significativa das concentrações medianas entre as estiagens de 2020, 2022 e 2023 em relação a estiagem/2019, e na estiagem/2022 em relação a estiagem/2020. Quando se avalia a estiagem/2023 em relação as demais estiagens para este analito teve-se que as concentrações foram significativamente maiores em relação a 2019, não variaram em relação a 2020 até 2021 e reduziram em relação a 2022, o que sugere uma tendência de redução do As nesta localidade.

Gráfico 11.3.2.2-9 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

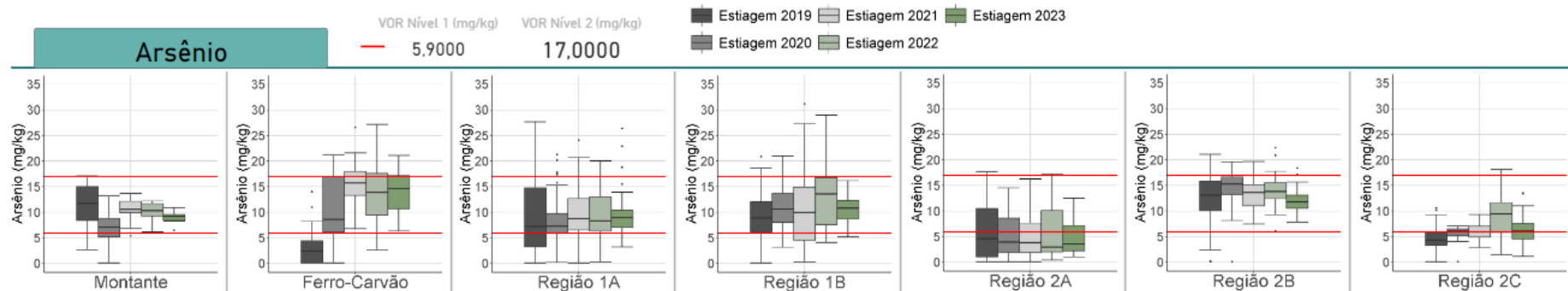


Gráfico 11.3.2.2-10 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

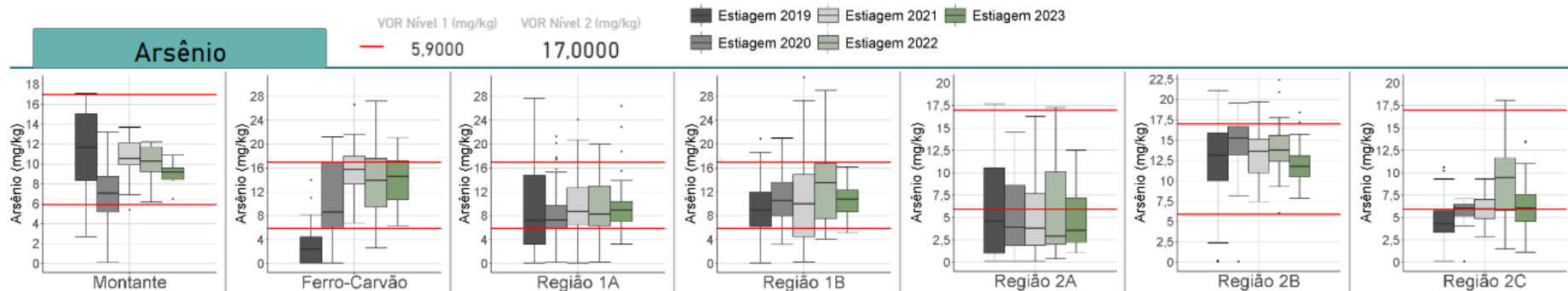


Tabela 11.3.2.2-9 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Arsênio.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	<	>	<
Região 1A	-	-	-	>	<	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	<	~	<	~	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	<	~	<
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	~	<	>	<
Montante	-	-	~	>	~	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	>	~
Montante	-	-	~	~	<	~	<
Região 1A	-	-	-	~	<	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-10 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Arsênio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	<	<
Est.23 X Est.21	~	~	~	~	~	<	~
Est.23 X Est.20	>	~	~	~	~	<	~
Est.23 X Est.19	>	<	~	~	~	~	>
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	~	~	~	~	~	~	>
Est.22 X Est.19	>	~	~	>	~	~	>
Est.21 X Est.20	>	>	~	~	~	<	~
Est.21 X Est.19	>	~	~	~	~	~	~
Est.20 X Est.19	>	<	~	>	~	>	>

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

▪ **Cromo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cromo nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.4.2.2-11** e **Gráfico 11.4.2.2-12** (*boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.2-11** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-12** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.2-11** apresenta a evolução do Cromo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

No **Gráfico 11.4.2.2-11** percebe-se que este analito está presente ao longo de toda a bacia do rio Paraopeba, com maiores concentrações na Região 2B. De acordo com Arcadis (2020a), a ocorrência do Cromo é maior na porção central, sobretudo nas regiões 1B e 2A. No **Gráfico 11.4.2.2-12** pode-se avaliar os resultados de cada região, considerando a variação na escala para facilitar a identificação das concentrações de cromo.

Em comparação com o período sazonal anterior (estiagem/2022), a estiagem/2023 apresentou, de modo geral, aumento dos valores medianos para a maioria das regiões avaliadas. As regiões Montante, 1B, 2B e 2C apresentaram, em 2023, concentrações medianas acima do VOR 1.

Na Região Montante, tem-se que a estiagem/2019 apresentou as maiores concentrações medianas, com 65,40 mg/kg, apresentado posterior redução para 42,30 mg/kg em 2020. Na estiagem/2021 ocorreu aumento, para 52,55 mg/kg, porém em 2022 houve leve redução para 51,70 mg/kg, e em 2023, nova redução para 46,45 mg/kg. Tais valores medianos aproximam-se com os observados pelo mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020b) que indica nessa região variações entre 43 e 86 mg/kg. Na avaliação espacial (**Tabela 11.4.2.2-11**), nota-se que as concentrações da Região Montante apresentaram valores significativamente mais elevados que a Região Ferro-Carvão em todas as estiagens monitoradas. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que em 2023 houve diferenças significativamente inferiores em relação a 2019, enquanto para os demais anos comparado a 2023 não foram registradas diferenças significativas. Na avaliação histórica, o comportamento se repetiu.

A Região Ferro-Carvão, apresentou na estiagem/2019 a menor mediana de todo o monitoramento (11,00 mg/kg). Para estiagem/2020, observa-se o maior valor mediano (30,15 mg/kg). Em 2021 houve leve redução da mediana (29,20 mg/kg), em 2022 observa-se nova redução dos teores (21,20 mg/kg). Por fim, na estiagem/2023, observou-se leve aumento da mediana (23,50 mg/kg). Tais valores também corroboram com os encontrados no mapa geoquímico (Arcadis, 2020b).

A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que entre as estiagens monitoradas houve diferenças significativamente superiores na comparação entre a estiagem de 2020, 2021, 2022 e 2023, todas em relação a estiagem/2019. As demais estiagens apresentaram diferenças significativamente inferiores, ou não apresentaram diferenças significativas.

Na Região 1A, as concentrações apresentam similaridade entre os períodos de estiagem monitorados, com tendência de aumento gradual das medianas, variando entre 23,00 mg/kg e

31,60 mg/kg, com poucas oscilações entre os anos, porém com maior valor observado na estiagem/2023 (31,60 mg/kg). Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-11**), as concentrações da Região 1A apresentam valores significativamente mais elevados que a Região Ferro-Carvão nas estiagens de 2019, 2022 e 2023. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que houve diferenças significativamente superiores na estiagem/2023 em relação a estiagem/2019 e de 2020 e não houve nos anos posteriores em 2021 e 2022.

Já na Região 1B, a faixa de variação das concentrações medianas foi de 41,40 mg/kg a 46,55 mg/kg, um pouco maior que na região imediatamente a montante, porém ainda com valores que corroboram com os encontrados no mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020b). Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-11**), as concentrações da Região 1B apresentaram valores significativamente mais elevados que as regiões Ferro-Carvão (estiagens de 2019, 2020, 2022 e 2023) e 1A (estiagens de 2019 a 2023).

A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que entre as estiagens monitoradas houve diferenças significativamente superiores na estiagem/2023 em relação a estiagem/2021, enquanto nas demais não houve diferença significativa nas concentrações.

Na Região 2A, percebe-se expressiva redução das medianas com o passar dos períodos de estiagem, até 2022, sobretudo entre a estiagem/2019 e 2020. Por outro lado, entre as estiagens de 2021 e 2023, as medianas ficaram mais próximas entre si, bem como os valores de P75, já as concentrações máximas nesse período, apresentaram reduções gradativas. Ainda em relação as medianas, na estiagem/2019 a concentração foi de 60,80 mg/kg, em seguida, observa-se reduções consecutivas, onde na estiagem/2020 apresentou o teor de 37,50 mg/kg, seguida da estiagem/2021 com valor mediano de 21,10 mg/kg, 13,90 mg/kg na estiagem/2022 e, por fim, observou-se aumento dos teores, registrando 18,80 mg/kg na estiagem/2023. Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-11**), as concentrações da Região 2A apresentaram valores significativamente mais elevados que regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B na estiagem/2019, enquanto nas demais avaliações foi significativamente inferior ou não teve variação. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que comparando a estiagem/2023 percebeu-se redução significativa em 2019 e 2020, enquanto em 2021 e 2022 não foram registradas diferenças significativas quando comparadas a 2023.

Na Região 2B foram observadas as maiores concentrações em relação as demais regiões monitoradas. As medianas nessa região apresentaram os seguintes teores: 75,75 mg/kg (2019), 80,30 mg/kg (2020), 77,75 mg/kg (2021), 75,00 mg/kg (2022), e 78,50 mg/kg (2023). Todas essas concentrações medianas ficaram acima do VOR 1, e abaixo do VOR 2. Tanto na Região 2B quanto na 2A, as concentrações são próximas às observadas no mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020b).

Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-11**), as concentrações da Região 2B apresentam valores significativamente mais elevados em relação a todas as demais regiões, exceto a Região Montante nas estiagens de 2021 e 2022, nas quais não foram registradas diferenças significativas. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que em 2023, houve diferenças

significativamente inferiores em 2019 e 2020, enquanto em 2021 e 2022 não houve diferença significativa.

Na Região 2C, observa-se concentrações medianas similares nas estiagens de 2019, 2020, 2021 e 2023. As medianas das estiagens de 2019 e 2020 apresentaram valores inferiores ao VOR nível 1 (37,3 mg/kg), enquanto nas estiagens de 2021 a 2023 as medianas ficaram acima do VOR 1 (**Gráfico 11.4.2.2-12**), são elas: 35,10 mg/kg (2019), 36,30 mg/kg (2020), 39,20 mg/kg (2021), 51,10 mg/kg (2022), e 39,60 mg/kg (2023). O comportamento das medianas em desacordo com o VOR nível 1 da legislação, pode estar associado ao transporte e deposição de sedimentos na localidade, por conta de contribuições locais advindas de erosões marginais dos solos, desmatamentos e exposição do solo. Cabe ressaltar que o cromo foi detectado no sedimento natural e não esteve presente de forma relevante no rejeito, como se observou nos dados de Geoenviron (2019) e nos resultados e estudos de sedimentos acumulados no Ferro-Carvão.

Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-11**), as concentrações da Região 2C apresentaram valores significativamente mais elevados que regiões Ferro-Carvão (estiagens de 2019, 2022 e 2023), 1A (estiagem/2022), e 2A (estiagens de 2022 e 2023). A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-12**) mostrou que entre as estiagens monitoradas não foram registradas diferenças significativas.

Gráfico 11.3.2.2-11 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

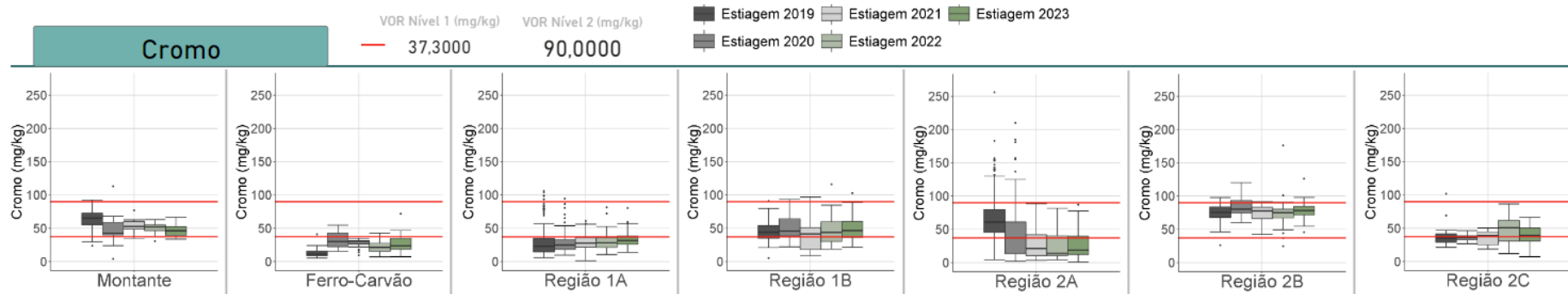


Gráfico 11.3.2.2-12 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

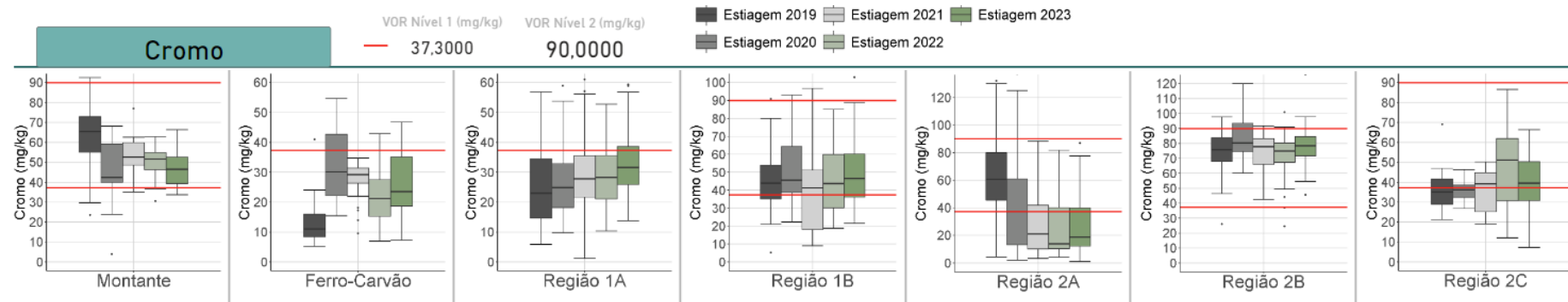


Tabela 11.3.2.2-11 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Cromo.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	~	>	>
Montante	-	-	<	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	~	>	>
Montante	-	-	<	~	<	~	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	>
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	~	~	~	>	~
Montante	-	-	<	<	<	~	~
Região 1A	-	-	-	>	~	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	~	>	~	>	~
Montante	-	-	<	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	>	~	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	>	>	>	>	>	>
Montante	-	-	<	<	~	>	<
Região 1A	-	-	-	>	>	>	~
Região 1B	-	-	-	-	>	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	<
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.2-12 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cromo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	~	~	~	~
Est.23 X Est.21	~	~	~	>	~	~	~
Est.23 X Est.20	<	~	>	~	<	<	~
Est.23 X Est.19	>	<	>	~	<	~	~
Est.22 X Est.21	<	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	<	~	~	~	<	<	~
Est.22 X Est.19	>	<	~	~	<	~	~
Est.21 X Est.20	~	~	~	<	<	<	~
Est.21 X Est.19	>	<	~	~	<	~	~
Est.20 X Est.19	>	<	~	~	<	>	~

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

11.3.2.3. Outros

▪ Fósforo

A distribuição estatística espacial e temporal do Fósforo nos períodos de estiagem encontram-se no **Gráfico 11.3.2.3-1** e **Gráfico 11.3.2.3-2** (*boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.3-1** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.3-2** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.3.2.3-1** mostra a evolução do Fósforo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*, já o **Gráfico 11.3.2.3-2** mostra evolução do Fósforo ao longo dos períodos de estiagem, em escala variável.

De modo geral, notou-se que espacialmente, as concentrações de Fósforo têm maior concentração no trecho entre a Região Ferro-Carvão até a Região 2B. A concentração deste parâmetro nestas regiões pode estar associada a características naturais provenientes da bacia. Características essas, relacionadas a ocorrência natural de P, derivadas do intemperismo de rochas e solos da região, e antrópica, relacionadas ao uso e ocupação do solo, com as áreas urbanas e o uso de fertilizantes em áreas agrícolas. Além de contribuições locais e difusas, que resultam em variações nas concentrações nesta região.

Em comparação com o período de estiagem anterior (estiagem/2022), a estiagem/2023 mostrou, de modo geral, redução das concentrações de Fósforo para as regiões. As regiões Montante e 2C, exibiram concentrações próximas entre os *boxplots* dos dois períodos, bem como dos períodos anteriores (com exceção de 2019), exibindo manutenção das concentrações de P relacionadas principalmente a fontes geogênicas e antropogênicas. As

regiões Ferro-Carvão e 1B exibiram concentrações máximas acima do VOR 1 somente em 2020 e 2019, respectivamente. As regiões Ferro-Carvão e 2B apresentaram durante todo o monitoramento, as maiores concentrações, devido ao reservatório Estaca Prancha e ao contexto do reservatório da UHE Retiro Baixo, respectivamente

De acordo com **Gráfico 11.4.2.3-1**, na Região Montante, o Fósforo apresentou valores significativamente menores que as regiões Ferro-Carvão e 1B. Em relação as medianas, observam-se oscilações durante todo o período avaliado; 493,00 mg/kg (2019), 210,00 mg/kg (2020), 269,00 mg/kg (2021), 276,50 mg/kg (2022), e 204,00 mg/kg (2023). O Fósforo nesta região, pode estar relacionado a intemperismos de rochas da região, erosões marginais de solo e contribuições locais. Avaliando-se especialmente (**Tabela 11.4.2.3-1**), verificou-se que, as concentrações da Região Montante apresentaram diferenças significativamente inferiores do que a Região Ferro-Carvão nas estiagens de 2020 a 2023, enquanto não houve variação significativa em 2019. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**) mostrou que comparando a estiagem/2023 com as anteriores, os resultados indicaram diferenças significativamente inferiores em 2021 e 2019 e não foram registradas diferenças significativas em 2021 e 2022.

A Região Ferro-Carvão foi a que mais apresentou aumentos significativos nas comparações entre as estiagens monitoradas (**Tabela 11.4.2.3-2**). Além disso, observou-se significativa elevação das concentrações após a estiagem/2019. Os valores medianos registrados foram: 368,00 mg/kg (2019), 1035,00 mg/kg (2020), 983,50 mg/kg (2021), 959,00 mg/kg (2022), e 893,00 mg/kg (2023). Destaca-se que, em função das obras de contenção de avanço de rejeitos em setembro/2019 no ribeirão homônimo, foi criado um ambiente represado (lêntico) na região (no PT-12), permitindo maior acúmulo e deposição de sedimentos finos, e de metais ao longo do tempo. Nesse sentido, os teores de P estariam condicionados ao acúmulo de sedimentos finos com assinatura natural e de rejeito, haja vista a presença do P identificado nos rejeitos coletados por Geoenviron (2019). Esta última contribuição decorrente do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A. Além disso, rochas paraderivadas, como as do Grupo Nova Lima, que podem conter minerais que possuem P em sua composição (*i.e.* apatita), podem contribuir com P para o sistema. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**) mostrou que entre as estiagens monitoradas, houve diferenças significativamente superiores nas estiagens de 2020, 2021, 2022 e 2023 em relação a estiagem/2019, o que mostra que o rejeito não tinha elevada concentração de P.

Na Região 1A, as concentrações medianas de P foram, na maioria das estiagens monitoradas (exceto em 2019), menores quando comparadas as da Região Ferro-Carvão. O *boxplot* (**Gráfico 11.3.2.3-1** e **Gráfico 11.3.2.3-2**) mostrou diminuição gradativa das medianas ao longo do tempo na Região 1A, os valores medianos registrados foram: 536,00 mg/kg (2019), 279,00 mg/kg (2020), 240,00 mg/kg (2021), 235,00 mg/kg (2022), e 201,50 mg/kg (2023). As variações de P entre as diferentes estiagens e regiões pode estar relacionada à oscilação entre deposição e acúmulo de sedimentos finos em alguns pontos (principalmente de retenção hidráulica). Ademais, a deposição de sedimentos com assinatura de rejeito misturado a sedimentos com assinatura natural poderia contribuir também para essa diminuição das concentrações ao longo do tempo. Avaliando-se especialmente (**Tabela 11.4.2.3-1**) nota-se que as concentrações da

Região 1A não apresentaram diferenças significativamente superiores em relação as demais regiões. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**) mostrou que, na comparação entre 2023 e as estiagens monitoradas, a maioria delas não mostrou valores significativamente alterados.

Na Região 1B as concentrações medianas foram significativamente maiores que as observadas nas regiões 1A e Montante, e menores que a da Região Ferro-Carvão (**Tabela 11.4.2.3-1**). O *boxplot* (**Gráfico 11.3.2.3-1** e **Gráfico 11.3.2.3-2**). As concentrações medianas registradas para essa região foram: 1220,00 mg/kg (2019), 689,00 mg/kg (2020), 358,00 mg/kg (2021), 407,50 mg/kg (2022), e 332,00 mg/kg (2023). A Região 1B está localizada em ambiente lótico sobre as rochas do Grupo Nova Lima e do Complexo Belo Horizonte (em que há ocorrência natural de Fósforo; CPRM, 2018), e com pontos de acúmulo de materiais finos. As variações nos valores de P tanto entre as regiões, como entre as estiagens, estão possivelmente relacionadas à granulometria e intemperismo de solos e rochas da região e a potencial contribuição do rejeito que alcançou a Região 1B. Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.3-1**), verifica-se que as concentrações da Região 1B apresentaram diferenças significativamente superiores em relação as regiões Montante (nas estiagens de 2019 e 2020), Ferro-Carvão (estiagem/2019) e 1A (estiagens de 2019 a 2021). A análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**) mostrou que, na comparação entre as estiagens monitoradas, nenhuma delas mostrou valores significativamente superiores. Particularmente, comparando-se a estiagem/2023 com os demais períodos notou-se redução em relação a 2019, 2020 e 2022.

A Região 2A registrou as menores concentrações medianas dentre as regiões avaliadas, com redução entre 2019 e 2020 e entre 2021 e 2022 (**Gráfico 11.3.2.3-1** e **Gráfico 11.3.2.3-2**). A mediana do Fósforo para os diferentes períodos de estiagem foi de 167,00 mg/kg (2019), 73,10 mg/kg (2020), 98,90 mg/kg (2021), 62,00 mg/kg (2022), e 85,35 mg/kg (2022/2023). Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.3-1**), verifica-se que as concentrações da Região 2A não apresentaram diferenças significativamente superiores em relação as demais regiões. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**) mostrou que, na comparação entre as estiagens monitoradas, nenhuma delas mostrou valores significativamente superiores. Particularmente, comparando-se a estiagem/2023 com os demais períodos, não houve variação significativa de Fósforo comparando os períodos de estiagem de 2020 até 2022.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, observa-se diminuição das medianas ao longo do tempo, entre 2020 e 2023. As medianas da Região 2B são significativamente maiores que as das demais regiões (**Gráfico 11.3.2.3-1**), exceto da Região Ferro-Carvão. O comportamento do P nesta região mostrou ligeiro aumento dos valores em 2020, em relação ao período anterior 2019. A estiagem/2020 (846,00 mg/kg) mostrou as maiores medianas e a estiagem/2023 (516,00 mg/kg), as menores. Nesse sentido, os teores de P podem estar associados ao acúmulo de sedimentos finos e metais no reservatório da UHE Retiro Baixo, provenientes de regiões a montante, de lixiviação e rochas da região e de contribuições locais e difusas da bacia. Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.3-1**), nota-se que as concentrações da Região 2B apresentam diferenças significativamente superiores em relação as demais regiões, exceto a Região Ferro-Carvão nas estiagens de 2021 e 2023, onde foram registradas diferenças significativamente superiores. A análise temporal (**Tabela**

11.4.2.3-2) mostrou que, na comparação entre a estiagem/2023 e as demais estiagens, todos os valores foram significativamente inferiores.

A Região 2C apresentou na análise espacial (**Tabela 11.4.2.3-2**), diferenças significativamente superiores em relação a Região 2A nas estiagens de 2021 e 2023. O *boxplot* mostrou que as medianas de Fósforo apresentaram incremento ao longo das estiagens monitoradas entre 2019 e 2022, e posteriormente, redução em 2023 (**Gráfico 11.3.2.3-1** e **Gráfico 11.3.2.3-2**). Deste modo, a estiagem/2022 apresentou as maiores medianas (390,00 mg/kg), e a estiagem/2023 apresentou as menores (233,00 mg/kg). De acordo com a análise temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**), as concentrações foram significativamente menores quando comparadas 2023 com 2022 e 2020. Os demais períodos não mostraram concentrações significativos.

O incremento das concentrações (entre 2019 e 2022) relaciona-se possivelmente às condições locais da região, uma vez que o padrão não foi identificado nas demais regiões a montante. Nesse contexto, contribuições difusas com influência de atividades de uso e ocupação do solo, desmatamentos e erosões marginais podem influenciar no aumento das concentrações de P no sedimento.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 301 / 399

Gráfico 11.3.2.3-1 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

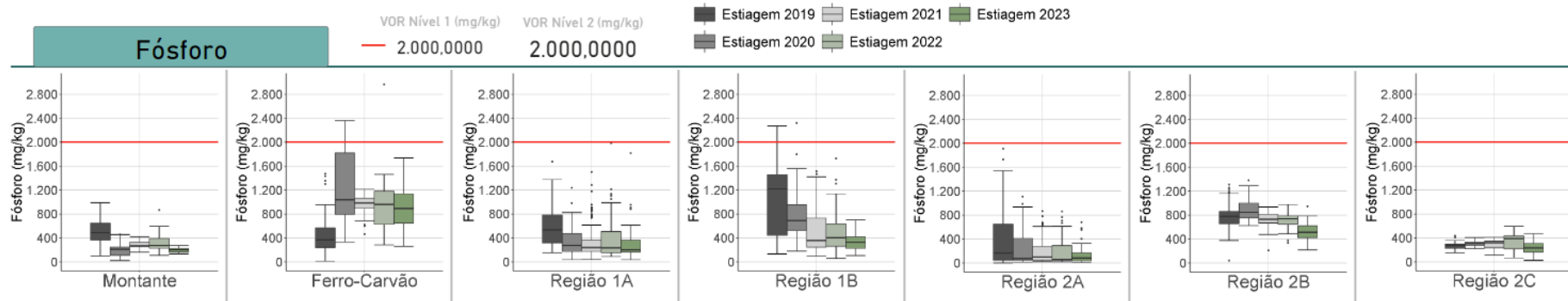


Gráfico 11.3.2.3-2 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2023 com escala variável.

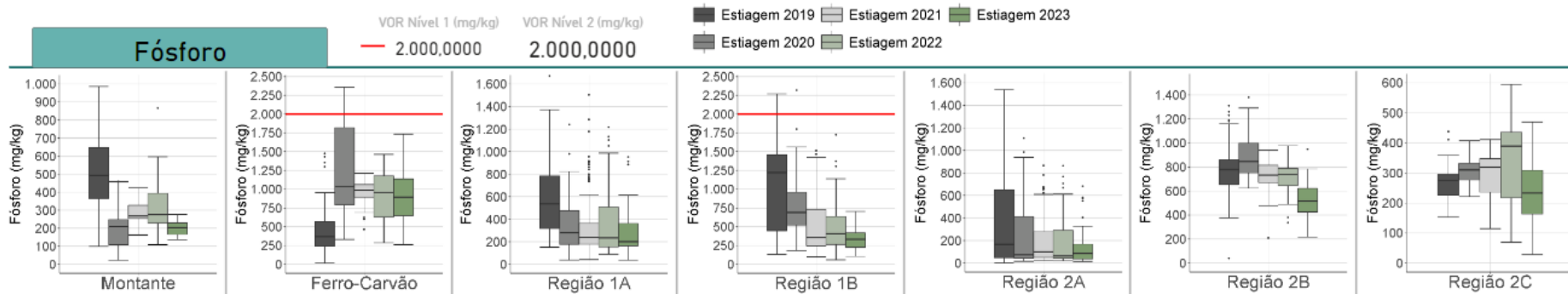


Tabela 11.3.2.3-1 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) para o parâmetro Fósforo.

Estiagem/2023							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	>
Região 2C	-	-	-	-	-	-	<
Estiagem/2022							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	~	~	>	~
Região 1A	-	-	-	~	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2021							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	<	<
Montante	-	-	~	~	<	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	~
Região 2A	-	-	-	-	-	>	>
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2020							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	<	<	<	<	~	<
Montante	-	-	~	>	~	>	~
Região 1A	-	-	-	>	<	>	~
Região 1B	-	-	-	-	<	>	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-
Estiagem/2019							
	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ferro Carvão	-	~	~	>	<	>	<
Montante	-	-	~	>	<	>	<
Região 1A	-	-	-	>	<	>	<
Região 1B	-	-	-	-	<	~	<
Região 2A	-	-	-	-	-	>	~
Região 2B	-	-	-	-	-	-	<
Região 2C	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
- < Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
- > Os valores da região de jusante são significativamente superiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05

Tabela 11.3.2.3-2 Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est.23 X Est.22	~	~	~	<	~	<	<
Est.23 X Est.21	~	<	~	~	~	<	~
Est.23 X Est.20	<	~	~	<	~	<	<
Est.23 X Est.19	>	<	<	<	<	<	~
Est.22 X Est.21	~	~	~	~	~	~	~
Est.22 X Est.20	~	~	~	<	~	<	~
Est.22 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.21 X Est.20	~	>	~	<	~	<	~
Est.21 X Est.19	>	<	<	<	<	~	~
Est.20 X Est.19	>	<	<	~	<	>	>

Legenda:

- ~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
- < Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
- > Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

11.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann-Kendall

Para aplicação do teste de tendência temporal avaliou-se a frequência amostral dos dados. Foram avaliados os dados medianos mensais, visto que desde dezembro/2021, a frequência do monitoramento dos sedimentos tem sido mensal para vários pontos. As lacunas identificadas no histórico de falta de dados estiveram predominantemente associadas a acesso inseguro para a amostragem ou falta de sedimento no ponto de coleta e, desta forma, o dado não existia e, portanto, quando isso ocorreu ele não foi considerado. A análise levou em conta a série completa dos dados.

O teste de Mann-Kendall foi empregado de forma complementar a análise dos *boxplots* e dos testes de comparação espacial e temporal apresentados anteriormente, de forma a verificar se as concentrações da série temporal de sedimentos tendem a se equilibrarem ou a aumentar ou a diminuir com o tempo. O teste Mann-Kendall, comumente utilizado para as análises de dados de água na literatura, foi aplicado nas análises dos dados de sedimentos depositados na calha do rio Paraopeba, visto que esses materiais são lixiviados e transportados ao longo do fluxo de água do rio no tempo e no espaço.

Este teste é complementar, sendo que na avaliação temporal são testadas hipóteses da existência ou não de diferenças significativas entre os períodos avaliados, ou seja, se um determinado período apresenta concentrações maiores, menores ou que não diferem entre si.

Para o teste de tendência Mann-Kendall foram avaliados os resultados em ordem cronológica para identificar ao longo do tempo a existência ou não de tendência na série analisada, determinando se o valor do parâmetro tende a aumentar ou reduzir no decorrer do tempo. Por exemplo, em determinada condição podem ser encontradas maiores concentrações em um dado período se comparado aos períodos anteriores, mas em termos de avaliação da série temporal pode não ser identificada qualquer tendência.

O objetivo dessa aplicação, foi verificar a tendência das variações das concentrações dos metais no tempo e espaço (ponto de monitoramento) de cada região para os seguintes parâmetros: Manganês e Ferro, principais marcadores do avanço do rejeito por arraste ou suspensão proveniente do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, bem como Alumínio, Níquel, Cobre, Chumbo, Cádmio, Zinco, Arsênio, Fósforo e Cromo. Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados na **Tabela 11.3.3-1 e Tabela 11.3.3-2**, que consideram a avaliação da série completa, ou seja, todos os períodos sazonais entre 2019 e 2023 (incluindo setembro/2023) e somente os períodos sazonais de estiagem, respectivamente.

Os limites de quantificação (LQ) foram tratados para todo o estudo estatístico, padronizando-os em caso de múltiplos valores em que foi considerado o valor mais baixo do intervalo e, em seguida, o valor foi dividido pela metade do valor do LQ (1/2 LQ). Os resultados da análise de tendência temporal estão discutidos, a seguir, por cada parâmetro analítico.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 305 / 399

Tabela 11.3.3-1 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade de sedimentos para a série completa de dados (todos os períodos sazonais, desde 25/01/2019 até 30/09/2023) – medianas mensais.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			R. Paraop.	UHE TM	
	Mont.	Ferro Carvão			Região 1A					Região 1B				Região 2A									Região 2B			Rg. 2C	
	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	JRB-02	PT-22	
MAJORITÁRIOS																											
Manganês	ST	T↑	T↑	T↓	T↓	T↓	T↑	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	T↑	ST	T↑	
Ferro	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	
Alumínio	ST	T↑	T↑	T↓	T↓	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	
TRAÇOS																											
Arsênio	ST	T↑	T↑	T↓	T↓	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
Cádmio	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	
Chumbo	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↑	ST	ST	
Cobre	ST	T↑	T↑	T↓	T↓	ST	T↑	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	
Cromo	ST	ST	ST	T↓	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
Níquel	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	
Zinco	T↓	ST	T↑	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	
OUTROS																											
Fósforo	T↓	T↑	ST	T↓	T↓	ST	T↑	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↑	

ST Sem tendência significativa |
T↓ Tendência significativa de redução |
T↑ Tendência significativa de elevação



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 306 / 399

Tabela 11.3.3-2 Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da sedimentos para a série de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023) – medianas mensais.

Parâmetro	Rio Paraopeba																				UHE Retiro Baixo			R. Paraop.	UHE TM			
	Mont.			Ferro Carvão					Região 1A					Região 1B					Região 2A					Região 2B			Rg. 2C	
	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	JRB-02	PT-22		
MAJORITÁRIOS																												
Manganês	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↑	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑		
Ferro	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑		
Alumínio	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST		
TRAÇOS																												
Arsênio	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↑		
Cádmio	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST		
Chumbo	T↓	ST	T↑	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST		
Cobre	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST		
Cromo	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	T↑		
Níquel	T↓	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↑		
Zinco	ST	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST		
OUTROS																												
Fósforo	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST		

ST Sem tendência significativa | T↓ Tendência significativa de redução | T↑ Tendência significativa de elevação

▪ **Manganês**

Tanto a avaliação da tendência temporal ponto a ponto completa (todos os períodos sazonais) quanto a dos períodos de estiagem para o Manganês mostrou que a tendência temporal foi muito parecida com a variação pontual como se observa na comparação com as **Tabelas 11.3.3-1 e 11.3.3-2**.

A avaliação da tendência temporal completa ponto a ponto aplicada com o método Mann-Kendall indicou comportamento predominante de sem tendência nas regiões Montante e 2A. A Região 1A mostrou tendência a redução das concentrações de Manganês, assim como na maioria dos pontos da Região 1B. Já as regiões Ferro-Carvão, 1A (PT-09), 2B (PT-21 e PT-28) e 2C (PT-22) apresentaram tendência de aumento nas concentrações, possivelmente relacionados com retenção hidráulica. Comparando-se a série temporal total com o período anterior não se percebeu variação em relação a Mann-Kendall.

Na avaliação de tendência temporal para os períodos de estiagem, os resultados também foram semelhantes a série completa nas regiões Montante, 1A, 2A, 2C e Ferro-Carvão, enquanto a Região 1B não apresentou tendência para a maioria dos pontos, diferenciando da série completa. Comparando a série da estiagem/2023 com o ciclo de estiagens anteriores, teve-se que neste mais antigo havia tendência de redução pontual nas regiões 1A e 1B, aumento nas regiões 2B e 2C e sem tendência nas demais regiões, ou seja, semelhante ao período atual, com a diferença somente para a Região 1B que atualmente não apresentou tendência.

Os testes de hipóteses apresentados no **item 11.3.2** e os testes de tendência temporal apresentados neste item são complementares. O teste de tendência Mann-Kendall, avaliou os resultados em ordem cronológica para identificar ao longo do tempo a existência ou não de tendência na série analisada, determinando se o valor do parâmetro tende a aumentar ou reduzir ou se manter estável no decorrer do tempo.

Nas avaliações estatísticas de comparação temporal, são testadas hipóteses da existência ou não de diferenças significativas (Kruskal Wallis) entre os períodos avaliados, ou seja, se um determinado período apresenta resultados maiores, menores ou que não diferem entre si.

Avaliando-se os resultados pelos testes de hipótese de Kruskal Wallis no período de estiagem verificou-se que tais resultados se mantiveram predominantemente estáveis até a Região 2B corroborando majoritariamente com o teste de Mann-Kendall, enquanto a Região 2C demonstrou tendência significativa de queda. Estas diferenças pontuais podem ocorrer haja vista que o teste de Kruskal Wallis avalia a mediana mensal por região, enquanto no teste de tendência temporal, a avaliação é a mediana mensal por ponto, e, portanto, não excludentes.

Nas regiões Montante e 2A (com exceção ao PT-19, que apresentou tendência significativa de redução) não se verificou tendência definida, indicando equilíbrio/estabilidade nas concentrações de Manganês. Nas regiões Ferro-Carvão e 2C nota-se tendência de aumento

pontual, enquanto na maior parte das regiões 1A e 1B a tendência foi prioritariamente de redução nas duas análises temporais.

- **Ferro**

A aplicação da análise temporal ponto a ponto completa Mann-Kendall mostrou tendência de redução nas regiões Montante (PT-52), 1A, 1B e localmente em 2A (PT-19), enquanto no Ferro-Carvão não houve tendência, o que corroborou com a tendência avaliada no ciclo anterior. Já para as regiões 2B e 2C, o cenário foi de sem tendência e aumento no PT-22, respectivamente. Esta avaliação corroborou com o ciclo anterior (estiagem/2022) e continuou menor que o ciclo de chuvas 2021/2022.

Ao se avaliar a tendência temporal exclusiva para as campanhas de estiagem, a única diferença de tendência foi no PT-43, que na análise completa apresentou redução enquanto nos ciclos de estiagem não apresentaram tendência. Demais resultados corroboraram, incluindo o ciclo anterior.

Na avaliação de tendência geral de Kruskal Wallis, tais variações não foram estatisticamente significativas não evidenciando tendência quando se avalia o conjunto de dados de estiagem ou a série completa, indicando equilíbrio corroborando com o teste de Mann Kendal e com a avaliação do ciclo anterior de estiagem (2022).

Quando se verificam as amostras coletadas em pontos do ambiente lótico, entende-se que a fase de deposição/sedimentação maior ocorreu durante o rompimento da barragem B1 quando a carga de sedimentos foi maior que a capacidade de transporte do rio. Os materiais mal selecionados (rejeitos do rompimento) e densos foram sendo arrastados e depositados no leito do rio Paraopeba, principalmente até a UTE Igarapé. Com o passar do tempo, o aporte dos sedimentos provenientes da barragem diminuiu e os rejeitos que são densos (aproximadamente 3,1 g/cm³; Arcadis, 2020b) foram se mantendo ou sendo recobertos por outros sedimentos naturais no leito do rio, mesmo sob vazões e níveis de água mais elevados quando comparados aos períodos de estiagem e estão mantendo uma tendência de equilíbrio.

- **Alumínio**

Em relação ao Alumínio, a estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann-Kendall para todos os períodos climáticos indicou situação de equilíbrio, ou seja, sem tendência para a maioria das regiões avaliadas, a saber: Montante, 1B, 2A e 2C, enquanto nas regiões 1A (PT-01, PT-13) e 2B (PT-20 e PT-28) a tendência foi de redução e, no Ferro-Carvão, percebeu-se uma tendência de aumento nos dois locais amostrados (PT-11 e PT-12). Ao se comparar essa tendência com os ciclos anteriores, percebeu-se que a situação de tendência se manteve predominante em todas as regiões.

A estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann-Kendall para o período sazonal de estiagem divergiu somente no PT-52 (Região Montante) e no PT-21 (Região 2B) que indicaram tendência de redução nas concentrações, enquanto nas demais regiões a tendência foi

semelhante com a série completa. Em relação ao ciclo anterior, houve poucas variações como queda nas concentrações no PT-52 e PT-22, que anteriormente estavam sem tendência, além de condição de equilíbrio na Região 2B que antes estava com concentrações com tendência de queda.

Os resultados dos testes de hipóteses indicaram oscilações pouco significativas ou sem tendência nas concentrações ao se avaliar os períodos de estiagem e que corroboraram com o teste de tendência.

- **Arsênio**

A estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann-Kendall para a série completa e para o período de estiagem foi semelhante em termos de tendência, visto que para as regiões Montante 1B, 2A e 2B não houve tendência na maioria dos pontos. As exceções pontuais de variação foram nas regiões 1A (PT-02), 1B (PT-15 e PT-03) e na 2A (PT-16, PT-17 e PT-19). Ferro-Carvão e 2C tiveram tendência de aumento conforme indicado nas tabelas de tendências.

Ao se comparar as tendências sazonais de estiagem/2023 de Mann Kendal com o ciclo anterior de estiagem/2022 constatou-se que foram semelhantes, com o predomínio de equilíbrio (sem tendência) para a maioria das regiões, exceto em Ferro-Carvão e 2C que apresentaram tendência de aumentos locais.

Em relação a avaliação dos resultados do teste Kruskal Wallis na estiagem, as variações identificadas foram sem tendência desde a Região Montante até a Região 2A, corroborando com Mann-Kendall. A variação de tendência foi diferente para as regiões 2B e 2C, que foram de queda significativa no método Kruskal Wallis e sem tendência ou de aumento, para a tendência temporal de Mann-Kendall. Novamente, essas alterações podem ser vistas como relacionadas ao método avaliado por ponto em Mann Kendal e por região nos Kruskal Wallis.

O Arsênio está presente na bacia do Paraopeba desde antes do rompimento das barragens B1 e galgamento de B4 e B4A e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/12 desde a Região Montante, assim como se verificou com a análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020), com os dados de sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2018). Nas demais regiões abrangidas neste documento, as concentrações acima do valor de referência e relacionadas ao pré-rompimento foram pontuais.

- **Cádmio**

O Cádmio tem baixa presença nos sedimentos da bacia do rio Paraopeba e, portanto, não houve variabilidade de resultados ao se avaliar as séries temporais completa e de estiagem. De acordo com teste de Mann-Kendall, a exceção das regiões Ferro-Carvão, 1A e 2B que apresentaram tendência de aumento nas concentrações. As demais regiões não apresentaram

tendência, ou seja, mantiveram condição de equilíbrio, corroborando com os ciclos anteriores seja da série completa ou da série sazonal de estiagem.

O Cádmio tem baixa oscilação e presença na bacia do rio Paraopeba com resultados predominantes abaixo do limite de quantificação, sendo que qualquer pequena variação acima deste limite já indica alguma variação nos resultados.

Avaliando-se os resultados do teste de hipótese Kruskal Wallis realizados por região com o Mann-Kendall realizado por pontos, percebeu-se no primeiro que a variação entre os períodos de estiagem/2022 para 2023 que a concentração foi significativamente menor no Ferro-Carvão, 1B, 2B e 2C, enquanto no Mann-Kendall percebeu-se que em 2B, a tendência foi de aumento e em 2C foi de redução, exatamente por ser avaliação pontual e os resultados foram distintos, o que é inerente aos métodos que se complementam.

Nessas áreas com caráter mais lântico, os sedimentos em suspensão tendem a se depositarem no leito do rio e os sedimentos finos que apresentam uma tensão superficial maior que os grossos efetuam trocas iônicas e adsorvem mais substâncias como os metais e qualquer oscilação variou os resultados.

- **Chumbo**

O Chumbo foi encontrado nos sedimentos de corrente da bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1 e suas concentrações estiveram sempre abaixo do valor da Resolução CONAMA nº 454/12 conforme análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020) com os dados de sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2019).

Na análise de tendência ponto a ponto da série completa de dados, constatou-se tendência de queda nas regiões Montante, 1A, 1B, 2A (PT-49 e PT-19) e 2B (PT-28). As regiões Ferro-Carvão, 2A (exceto os já citados), 2B (PT-20) e 2C indicaram tendência de equilíbrio. Comparando-se esses resultados com o do ciclo anterior, percebeu-se semelhança no número de pontos com tendência de queda nas concentrações de Chumbo, principalmente nas regiões 1A (PT-01, PT-13, PT-09) e 1B (PT-03, PT-14, PT-48) e nas demais houve tendências de equilíbrio, indicando que por esta análise não se verificaram alterações significativas no período de 01 ano.

Em relação ao período sazonal de estiagem, os resultados de tendência foram semelhantes ao ciclo completo, exceto pelos dados dos pontos PT-12, que apresentou tendência de aumento e PT-21 que apresentou tendência de queda entre os ciclos de estiagem.

O teste Mann-Kendall de avaliação ponto a ponto de tendência sazonal no período de estiagem/2023 mostrou predomínio de condições sem tendência sazonal na maior parte das regiões, corroborando com os testes de hipótese. As variações significativas identificadas na Região 2B com tendência de queda também corroborou com o teste de tendência temporal de Mann-Kendall.

Comparando-se os resultados com o período passado, a principal diferença foi que a Região 2C apresentava tendência de aumento nas concentrações, ao contrário do sem tendência neste período. Demais regiões não sofreram alterações em relação ao período passado.

A estatística temporal inferencial não apontou variação significativa nos resultados do período de estiagem, exceto na Região 2B, com redução significativa. Tais diferenças podem ocorrer haja vista que o teste de Kruskal Wallis avalia a mediana mensal por região, enquanto no teste de tendência, a avaliação é a mediana mensal por ponto e os testes são complementares e não excludentes.

▪ Cobre

O Cobre foi encontrado nos sedimentos de corrente da bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/12 na Região 1B como se verificou com a análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020) com os dados de sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2018).

Na análise da série completa constatou-se tendência de aumento nas concentrações de forma pontual na Região Ferro-Carvão, provavelmente por estar em local de ambiente mais lântico condicionado pela instalação da estaca prancha que permite a deposição de sedimentos finos. Nas demais regiões não houve indicação de tendência na maioria dos pontos, exceto em locais pontuais nas regiões 1A (PT-09), 1B e 2A (PT-43, PT-49 e PT-19) que mostraram tendência de queda. Ao se comparar a série completa até 2023 não se constatou diferença na tendência das concentrações dos pontos amostrados.

Para a avaliação sazonal temporal de estiagem/2023, as tendências nas regiões 1B e 2B foi de queda, enquanto as demais regiões não mostraram tendência, ou seja, mantiveram-se na condição de equilíbrio.

Os resultados do teste de hipótese da estatística inferencial de Kruskal Wallis também não evidenciaram variação significativa nas concentrações de Cobre para nenhuma área, corroborando com a tendência de Mann-Kendall.

▪ Níquel

O Níquel foi encontrado nos sedimentos de corrente da bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1 e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/12 nas regiões 1B, início da 2A e na região da UHE de Retiro Baixo, como se verificou com a análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020). Nas demais regiões abrangidas neste documento, as concentrações acima do valor de referência e relacionadas ao pré-rompimento foram pontuais.

Na análise da série completa ponto a ponto, constatou-se tendência de queda para as regiões Montante (PT-52), 1A, onde há atividades de remoção do rejeito na calha do rio Paraopeba, exceto no PT-02; 1B (PT-03 e PT-14) e 2A (PT-53, PT-16, PT-49, PT-19, PT-55). Aumento foi

verificado no PT-22, Região 2C, enquanto nas demais regiões não se observaram tendências. Na comparação com o período completo anterior, somente a Região 2C que se diferenciou mostrando-se em condição de equilíbrio, enquanto nesta série não mostraram tendência de aumento para o Níquel.

Na análise da série temporal de estiagem/2023 e ponto a ponto perceberam-se maiores variações em relação a série completa. Nesta série temporal houve tendência de queda nas concentrações nas regiões Montante e 1B, exceto nos pontos PT-15, PT-48 e PT-03 que não apresentou tendência. Houve tendência de queda na maior parte da Região 2A. Na Região 2C foi a que indicou tendência de aumento. Estas variações divergiram do ciclo anterior para as regiões 2A e 2C que não tinham mostrado tendência naquele período.

Na avaliação entre ciclos de estiagem/2022 e 2023, a Região 2C foi a única que apresentou tendência significativa de aumento, corroborando com Mann-Kendall, enquanto para as demais não se verificaram tendências. A Região 2B também mostrou tendência significativa de aumento e o teste cronológico Mann-Kendall não constatou tal tendência, mantendo resultados em equilíbrio.

▪ Cromo

O Cromo está presente nos sedimentos da bacia do rio Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1 e já figurava com concentrações mais elevadas que o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/12 em toda a sua extensão. O rejeito da barragem B1 apresentou baixa concentração de cromo conforme observado nos resultados das análises realizadas por Geoenviron (2019), de modo que os eventuais aumentos observados estão preferencialmente relacionados a retenção de materiais finos em função de represamento hidráulico e dinâmica dos sedimentos da bacia do que ao próprio rejeito oriundo do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A.

A avaliação da tendência temporal ponto a ponto aplicada com o método Mann-Kendall para a avaliação completa indicou comportamento predominante sem tendência desde a Região Montante até a Região 2C. Neste intervalo, os pontos PT-09 (Região 1A) e PT-22 (Região 2C) apresentaram tendência de aumento, possivelmente por estarem em áreas com retenção hidráulica. Já os pontos PT-19, PT-49 e PT-55 (2A) e PT-28 (2B) apresentaram tendência de queda.

Comparando-se com o ciclo completo, os pontos das regiões 1A, 1B e 2A que apresentavam tendência de queda ficaram sem tendência nesta série. O PT-22 na Região 2C continuou com tendência de aumento. As demais regiões continuaram sem tendência.

Na avaliação de tendência temporal para os períodos de estiagem, os resultados foram predominantemente sem tendência, exceto no PT-22 (2C) e no PT-02 (1A), que tiveram tendência de aumento corroborando com o período climático anterior. Estes resultados foram semelhantes ao ciclo sazonal de chuvas 2021/2022 e de estiagem/2022.

Os resultados do teste de hipótese tipo Kruskal Wallis para os períodos de estiagem não mostraram tendência significativa de variação das concentrações para todas as regiões e foram semelhantes com os testes de tendência sazonal Mann-Kendall para as regiões Montante, 1A, 1B, 2A e 2B. Na Região 2C o teste de Mann-Kendall mostrou tendência de aumento, mas o Kruskal Wallis indicou sem tendência significativa de aumento. Adicionalmente, tais diferenças podem ocorrer haja vista que o teste de Kruskal Wallis avalia a mediana mensal por região, enquanto no teste de tendência, a avaliação é a mediana mensal por ponto.

- **Zinco**

O Zinco é um elemento distribuído ao longo da bacia do rio Paraopeba, majoritariamente em concentrações abaixo de valor orientador de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Os resultados da análise estatística de Mann-Kendall identificaram tendência pontual de redução para o Zinco na análise da série completa nos pontos PT-52 (Montante), PT-01 e PT-13 (1A), PT-03 e PT-14 (1B), PT-19, PT-49 e PT-55 (2A). Aumento pontual no PT-11, na Região Ferro-Carvão, enquanto nos demais pontos dessas regiões não se constataram tendência.

A série sazonal de estiagem/2023 variou em relação a série total somente na Região Montante que nos períodos de estiagem não mostrou tendência e na Região 1A que um local mostrou tendência de redução. Esta variação pode ser resultante das avaliações das medianas mensais que ao se considerar todos os ciclos obteve-se uma variação mais elevada. Os resultados corroboraram com o ciclo de estiagem/2022.

- **Fósforo**

A estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann-Kendall para a série completa de resultados mostrou tendência de queda principalmente nas regiões Montante, 2B, e, pontualmente no PT-01 e PT-13 (Região 1A) e PT-19 (Região 2A). A tendência de aumento também foi pontual no PT-11 (Região Ferro-Carvão), PT-02 (Região 1A) e no PT-22 (Região 2C), enquanto na grande maioria dos locais não se constatou tendência definida para o fósforo, indicando equilíbrio na bacia.

Ao se aplicar a estatística ponto a ponto com o método Mann-Kendall considerando a sazonalidade dos períodos de estiagem verificou-se tendência de queda no PT-52 (Região Montante), PT-09 (Região 1A), PT-14, PT-48 e PT-03 (Região 1B), PT-19 (Região 2A), PT-20 e PT-21 (Região 2B), enquanto nos demais pontos não se evidenciou tendência.

Em termos de similaridade de resultados para as duas análises teve-se que a tendência de equilíbrio foi a que prevaleceu, corroborando com o período anterior.

A estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann-Kendall para a série completa de resultados mostrou tendência de queda principalmente nas regiões 1A, 1B e 2B, e, pontualmente no PT-19 (Região 2A) e na Região Montante (PT-52). A tendência de aumento ocorreu nos pontos PT-11 (Região Ferro-Carvão), PT-02 (Região 1A) e no PT-22 (Região 2C), enquanto na grande maioria dos locais não se constatou tendência definida para o Fósforo.

Ao se aplicar a estatística ponto a ponto com o método Mann-Kendall considerando a sazonalidade dos períodos de estiagem também não se constatou tendência de queda ou aumento de concentrações para a maioria dos pontos monitorados, corroborando com a análise ponto a ponto completa. Pontualmente, verificou-se tendência de queda nos pontos PT-52 (Região Montante), PT-09 (Região 1A), PT-05, PT-03 e PT-14 (Região 1B), PT-19 (Região 2A), PT-20 e PT-28 (Região 2B).

Em termos de similaridade de resultados para as duas análises teve-se que a tendência de equilíbrio foi a que prevaleceu. Os resultados do teste Krukall Wallis indicaram que não houve variabilidade significativa nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A e 2A corroborando com a análise de tendência cronológica Mann Kendal. Nas regiões 1B, 2B e 2C se constatou variações significativas de queda. Os resultados das regiões 1A, 1B, 2A, 2B corroboraram com a estatística Mann-Kendall, enquanto na 2C, houve diferença de tendência de queda para sem tendência.

Tais diferenças podem ocorrer haja vista que o teste de Kruskal Wallis avalia a mediana mensal por região seja por período sazonal, enquanto no teste de tendência avaliação a mediana mensal por ponto de cada região.

11.4. Considerações

As maiores concentrações de metais foram identificadas da Região Ferro-Carvão até a Região 1B e em 2B. As regiões de Ferro-Carvão até a 1B foram as áreas em que houve maior influência do rejeito decorrente do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A. Já na Região 2B, o acúmulo dos sedimentos está associado com a dissipação dos materiais em suspensão que se depositaram no leito do reservatório. Destaca-se que as maiores concentrações de Manganês, Ferro, Arsênio, Cobre e Níquel estão nas áreas citadas. O Arsênio está presente, naturalmente, nos sedimentos da própria bacia, e foi encontrado em menor concentração no rejeito. Os elementos que apresentaram as maiores concentrações no rejeito foram Mn e Fe.

Assim como a posição da coleta da amostra de cada região ao longo do rio Paraopeba, as características do ambiente também interferem nas concentrações observada dos metais. Ambientes lóticos, típicos de rios, tendem a dificultar a deposição de sedimentos finos, ao passo que, ambientes lênticos/intermediários, típicos de reservatórios, tendem a propiciar condições melhores à deposição de sedimentos de diversas granulometrias, incluindo as finas transportadas sob suspensão. Sendo assim, na Região Ferro-Carvão, Região 2B e na UTE Igarapé na Região 1B, que são áreas de ambiente mais lêntico, observou-se que há maior retenção de sedimentos e com isso, observou-se uma granulometria mais fina e de concentrações de metais mais elevados nestas duas regiões nos períodos de estiagem analisados.

Na Região 2B, no reservatório da UHE Retiro Baixo, as concentrações de Alumínio, Arsênio, Cromo, Chumbo, Cobre e Níquel, apresentaram maiores concentrações do que nas demais regiões. Na Região Ferro-Carvão, as elevações das concentrações dos metais aconteceram após a instalação de obras de engenharia, que resultaram na alteração do ambiente, de lótico para mais lântico, acumulando materiais finos, os quais possuem maior superfície específica e permitem trocas catiônicas e adsorção de elementos, com conseqüente, nesta localidade, percebeu-se aumento nas concentrações observadas como de Manganês, Ferro, Cobre, Arsênio e Níquel.

Na avaliação da estatística dos períodos de estiagem no espaço e tempo com o método Kruskal Wallis, percebeu-se que houve equilíbrio nas concentrações de metais ao longo do tempo e, principalmente, nos últimos ciclos de estiagem 2022 e 2023. Na Região Montante, as concentrações de Ferro, Alumínio, Cádmiio, Chumbo indicaram reduções nas concentrações ou aumento (Níquel), porém estas variações não foram significativas quando avaliadas no método de Kruskal Wallis que verifica a variabilidade da substância no tempo. Os metais Cobre, Cromo, Fósforo e Zinco não apresentaram variação em nenhum dos métodos, indicando condição de equilíbrio entre os períodos de estiagem.

Para a Região Ferro-Carvão, observou-se tendência de aumento estatístico, principalmente para Manganês, Alumínio, Arsênio, Cádmiio e Cobre, ao longo do tempo (todo histórico ou entre períodos de estiagem), com elevação das concentrações relacionadas principalmente a aumento de vazão, transporte de materiais e acúmulo de sedimentos com influência dos rejeitos.

As substâncias que não tiveram variações significativas nas concentrações principalmente quando comparados os últimos períodos estiagem/2022 e 2023 foram Mn, Fe, Al, As, Pb, Cd, Cr, Ni, P na Região 1A; Fe, Mn, Al, Cd, Pb, Cr, Ni, P na Região 1B; Fe, Al, Mn, As, Cd, Pb, Cr, Ni, P na Região 2A; Fe, Mn, As, Cd, Pb e P na Região 2B. Estes resultados em todas as regiões e para diversas substâncias é indicativo de baixa variabilidade das concentrações nos dois recentes ciclos sazonais de estiagem. A Região 2C foi a que demonstrou maior variabilidade nos resultados e de forma significativa visto que somente Cd e P não tiveram variação no tempo. As demais substâncias como Mn, Fe, Al, Pb, As, Cu, Cr, Ni e P apresentaram variações significativas positivas, o que sugere contribuições locais associadas a escoamento superficial de áreas desnudas e ou com erosões marginais e outros usos do solo como contribuintes para tais oscilações.

A avaliação de tendência sazonal realizada com o método de Mann-Kendall é complementar a estatística anterior, visto que avalia a tendência mediana mensal ponto a ponto, seja do ciclo de estiagem seja para o ciclo completo (série completa) de forma cronológica.

Estas avaliações indicaram que as regiões 1A e 1B foram as que mais demonstraram oscilação na tendência das concentrações dos parâmetros avaliados (principalmente Mn, Fe, Pb, Cu e Ni). Esse padrão sugere que os transportes de sedimentos que se sucedem no tempo se misturam com aqueles depositados por ocorrência do rompimento e que, com o tempo, tem

indicado redução na concentração, bem como na característica química de rejeito nos trechos mais afetados para uma tendência de característica pré-rompimento nas concentrações. Nas regiões Montante, 2A (exceto os pontos PT-19 e PT-54), 2B (exceto PT-28) e 2C, os locais avaliados majoritariamente não apresentaram tendência sazonal temporal, sugerindo mais equilíbrio nas concentrações das substâncias avaliadas quando avaliados na tendência mediana mensal ponto a ponto.

12. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2023 ao longo do rio Paraopeba

12.1. Objetivo

O objetivo da avaliação foi verificar a qualidade dos metais nos sedimentos do rio Paraopeba em pontos coletados à montante e jusante do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A ao longo dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 em relação a Resolução CONAMA nº 454/12 para os níveis 1 e 2. Cabe destacar que os parâmetros Manganês, Alumínio e Ferro não estão listados nesta Resolução, mas foram comparados de acordo com Vicq (2015).

12.2. Metodologia

Como não há uma classificação para avaliar a qualidade química de sedimentos de corrente, utilizou-se como referência a Resolução CONAMA nº 454/2012 que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. A caracterização química foi realizada de acordo com as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais definidos nesta Resolução. Para disposição em águas doces sob jurisdição nacional, os resultados analíticos foram comparados com os níveis 1 e 2 de classificação do material a ser dragado. Os valores orientadores adotados têm como referência a publicação oficial Environmental Canada. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*, propostos pelo Conselho de Ministérios de Meio Ambiente do Canadá (*Canadian Council of Ministers of the Environment*, CCME, 2002).

A avaliação considerou duas abordagens. A primeira considerou o consolidado dos resultados de estiagem/2023 por ponto de monitoramento, apresentando o quantitativo de amostras avaliadas no período e o percentual acima dos valores de níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA 454/12 ou Vicq (2015). A segunda abordagem envolveu todos os resultados analíticos obtidos nos períodos de estiagem, sendo: abril a setembro/2019, abril a setembro/2020, abril a setembro/2021, abril a setembro/2022 e abril a setembro/2023. Em todas as situações, a avaliação foi para verificar a evolução do percentual de ultrapassagem dos valores adotados e evolução no tempo.

12.3. Resultados e discussão

Nas **Tabelas 12.3-1** e **12.3-2** estão apresentados os percentis que ultrapassaram os valores adotados por ponto no período de estiagem/2023, sendo que na **Tabela 12.3-3** são apresentados os valores que desviam do valor de nível 1 e na **Tabela 12.3-4**, encontram-se os percentuais de concentrações acima do nível 2. As discussões são apresentadas por regiões.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 319 / 399

Tabela 12.3-1 Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 ou dos valores propostos por Vicq (2015) para a estiação/2023.

Parâmetro	Resolução CONAMA 454/12 VR* / VOR 1	Rio Paraopeba																				Reservatório Retiro Baixo	Rio Par.	UHE TM				
		Mont.	F.C.			Região 1A					Região 1B					Região 2A					Região 2B			R.2C				
		PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	JRB-02	PT-22	
MAJORITÁRIOS																												
Manganês	* 3.300 mg/kg	-	100	100	-	33	8	75	-	-	-	42	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ferro	* 281.000 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Alumínio	* 45.200 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	25	64	-	-		
TRAÇOS																												
Arsênio	5,9 mg/kg	100	100	100	92	92	75	100	90	100	100	92	100	83	80	17	20	100	83	-	-	25	100	100	100	44	83	
Cádmio	0,6 mg/kg	-	4	19	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Chumbo	35 mg/kg	-	26	77	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-		
Cobre	35,7 mg/kg	-	96	100	-	25	8	75	-	-	25	25	10	-	-	-	-	-	-	-	-	75	50	80	-	-		
Cromo	37,3 mg/kg	75	-	31	83	25	-	25	10	83	92	67	50	67	80	-	-	83	83	-	-	8	100	100	100	48	100	
Níquel	18 mg/kg	17	96	100	17	50	17	83	-	25	75	58	50	-	40	-	-	17	50	-	-	-	100	92	92	24	50	
OUTROS																												
Fósforo	2000 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N coletas realizadas		12	23	26	12	12	12	12	10	12	12	12	10	6	5	6	5	6	6	12	12	12	12	12	25	25	6	

NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência; *Vicq (2015) utilizado para comparações com ferro, alumínio e manganês.
Elaboração: Arcadis (2023).

Menor % de resultados acima do VOR  Maior % de resultados acima do VOR


	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)		CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1
		Folha 320 / 399

Tabela 12.3-2 Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/12 para a estiagem/2023.

Parâmetro	Resolução CONAMA 454/12 VOR 2	Rio Paraopeba																				Reservatório Retiro Baixo	Rio Par.	UHE TM			
		Mont.	F.C.			Região 1A					Região 1B					Região 2A					Região 2B			R.2C			
		PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	JRB-02	PT-22
TRAÇOS																											
Arsênio	17 mg/kg	-	9	42	-	-	17	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-
Cobre	197 mg/kg	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cromo	90 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	
Níquel	35,9 mg/kg	-	22	85	-	17	-	42	-	-	8	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	4	-	
N coletas realizadas		12	23	26	12	12	12	12	10	12	12	12	10	6	5	6	5	6	6	12	12	12	12	12	25	25	6

NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência.

Elaboração: Arcadis (2023).

Menor % de resultados acima do VOR



Maior % de resultados acima do VOR

De acordo com a **Tabela 12.3-1** constatou-se que, para o período de estiagem/2023 os parâmetros Manganês e Alumínio superaram os valores de Vicq (2015) em pelo menos um local monitorado. As alterações de Manganês foram registradas nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, enquanto o Alumínio apresenta desvios apenas na Região 2B. Os metais traços Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo e Níquel ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1) da Resolução CONAMA 454/12 em pelo menos um ponto de monitoramento. Destes, o Arsênio, Cromo e Níquel foram quantificados acima do nível 1 em todas as regiões monitoradas, incluindo a Região Montante. Estes elementos estão presentes na bacia do rio Paraopeba desde antes do rompimento da barragem e, de acordo com os mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020), a partir dos dados de sedimentos de 2008-2009 coletados pela CPRM e publicados em 2018, estes elementos também estão disponíveis ao longo de toda a bacia. O Cobre também é comum em toda a bacia e não apresentou desvios nas regiões 2B e 2C. Em relação a ocorrências localizadas, as concentrações de Chumbo que ultrapassaram o VOR 1 foram observadas somente na Região Ferro-Carvão e Região 2B (somente no PT-21), enquanto o Cádmio ultrapassou o VOR 1 nas regiões Ferro-Carvão e 1A (somente no PT-02). Não foram registrados desvios para os parâmetros Ferro e Fósforo.

Em relação aos pontos que apresentaram maior ocorrência (3 ou mais parâmetros) de metais que ultrapassaram os valores da Resolução CONAMA 454/12 estão o PT-52, PT-11, PT-12, PT-01, PT-13, PT-09, PT-02, PT-03, PT-14, PT-48, PT-15, PT-54, PT-17, PT-18, PT-20, PT-28, PT-21, JRB-02 e PT-22. Os pontos que apresentaram menor ocorrência de valores acima do VOR 1 (até 2 parâmetros violados) foram: PT-05, PT-53, PT-43, PT-16 e PT-55.

Destaca-se que os pontos localizados entre as regiões Ferro-Carvão e 1B, PT-11 até PT-15, estão nas regiões mais afetadas pelos rejeitos provenientes do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, justificando os maiores percentuais de resultados em desacordo com o valor orientador de Manganês para a estiagem/2023, particularmente, nos pontos PT-11 e PT-12, localizados no ribeirão Ferro-Carvão, e no ponto PT-02, na Região 1A. Esses pontos, coincidentemente, possuem maiores proporções de sedimentos finos (silte e argila), quando comparados aos demais dispostos até a Região 2A. Além desses, os pontos PT-13, PT-09, PT-48 e PT-15 também registram resultados em desacordo com a Resolução CONAMA 454/12 para Manganês, porém, em menores proporções (< 50%) durante a estiagem/2023. Em relação ao PT-14, tendo em vista a posição deste ponto próximo ao barramento da Usina Termoelétrica de Igarapé, houve maior propensão a deposição de sedimentos finos, e, conseqüentemente, aumento das concentrações de elementos químicos. Já no PT-15, o aumento das concentrações na chuva 2022/2023 pode ser relacionado com aporte de material com química de rejeito oriundo da UTE Igarapé transportado durante as chuvas de 2022/2023, bem como contribuições de erosões marginais. O PT-15 apresenta uma ponte que potencializa os processos deposicionais, criando um ambiente de retenção hidráulica, favorecendo o aumento de metais.

Ainda de acordo com a **Tabela 12.3-1**, observou-se que para o período de estiagem/2023 houve concentrações de Al acima do valor proposto por Vicq (2015) somente na região inserida no reservatório da UHE Retiro Baixo (2B), onde é favorável o acúmulo de sedimentos da bacia

dada a baixa energia de transporte. Além disso, há intemperismo natural de materiais provenientes de solos (erosões marginais), rochas intemperizadas da Formação Serra de Santa Helena e de granitoides do Complexo Belo Horizonte, que possuem minerais e argilominerais ricos em Al e que podem ser disponibilizados e acumulados nos sedimentos do rio Paraopeba. O acúmulo de sedimentos transportados de diversas fontes (difusas, geogênicas) para o reservatório da UHE Retiro Baixo também justifica o fato de que o As, Cu, Cr e Ni apresentem percentuais de desacordo aos valores orientadores nessa região.

Destaca-se que, nos pontos das regiões Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) e 2B (PT-20, PT-28 e PT-21) predominam os maiores percentuais (> 80%) de concentrações acima do preconizado pela Resolução CONAMA nº 454/2012 de nível 1 para metais traço As, Cu, Cr e Ni.

A **Tabela 12.3-2** aponta a relação dos resultados em desacordo com o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12 no período de estiagem/2023. Houve desvios para Arsênio nas regiões Ferro-Carvão (PT-11, PT-12), 1A (PT-09, PT-02) e 2B (PT-20). Cobre aponta desvio na Região Ferro-Carvão (PT-12). O Cromo apresentou desvios nas regiões 1B (PT-14, PT-48) e 2B (PT-20). Já o Níquel mostrou desvios nas regiões Ferro-Carvão (PT-11, PT-12), 1A (PT-13, PT-02), 1B (PT-03, PT-14, PT-48, PT-15), 2A (PT-54, PT-17, PT-18), 2B (PT-20, PT-28, PT-21) e 2C (JRB-02, PT-22).

A **Tabela 12.3-3** consolida a evolução das concentrações dos metais ao longo dos ciclos de estiagem ocorridos entre 2019 e 2023. Esta tabela contempla cada região de interesse (Montante até 2C) e apresenta os percentuais de concentração de metais e suas comparações com o ciclo de estiagem seguinte. Esta avaliação também foi efetuada utilizando como referência a Resolução CONAMA 454/12 e o estudo de Vicq (2015). As variações dos percentuais de concentrações estão discutidas por região e apresentadas a seguir.

Tabela 12.3-3 Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/12 e dos valores de Vicq (2015) para os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 entre as regiões de Montante a 2C.

Região	Parâmetro	-			Estiagem - Abril a Setembro/2019				Estiagem - Abril a Setembro/2020				Estiagem - Abril a Setembro/2021				Estiagem - Abril a Setembro/2022				Estiagem - Abril a Setembro/2023								
		VOR N1	VOR N2	Unidade	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2					
Montante	Arsênio	5,9	17	mg/kg	27	24	88,9%	1	3,7%	18	13	↓ 72,2%	0	↓ 0,0%	16	15	↔ 93,8%	0	↓ 0,0%	10	10	↔ 100,0%	0	↓ 0,0%	12	12	↔ 100,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	27	0	0,0%	0	0,0%	18	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Chumbo	35	91,3	mg/kg	27	0	0,0%	0	0,0%	18	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Cobre	35,7	197	mg/kg	27	17	63,0%	0	0,0%	18	1	↓ 5,6%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	1	↔ 10,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Cromo	37,3	90	mg/kg	27	25	92,6%	1	3,7%	18	15	↓ 83,3%	1	↔ 5,6%	16	15	↔ 93,8%	0	↓ 0,0%	10	8	↓ 80,0%	0	↓ 0,0%	12	9	↓ 75,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Fósforo	2000	2000	mg/kg	27	0	0,0%	0	0,0%	18	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	27	5	18,5%	0	0,0%	18	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Montante	Níquel	18	35,9	mg/kg	27	21	77,8%	0	0,0%	18	6	↓ 33,3%	1	↔ 5,6%	16	8	↔ 50,0%	0	↓ 0,0%	10	3	↓ 30,0%	0	↓ 0,0%	12	2	↓ 16,7%	0	↓ 0,0%
Montante	Zinco	123	315	mg/kg	27	0	0,0%	0	0,0%	18	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	16	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	10	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	12	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Arsênio	5,9	17	mg/kg	48	8	16,7%	0	0,0%	52	39	↓ 75,0%	13	↔ 25,0%	36	36	↔ 100,0%	13	↔ 36,1%	52	49	↓ 94,2%	15	↓ 28,8%	49	49	↔ 100,0%	13	↓ 26,5%
Ferro-Carvão	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	48	3	6,3%	0	0,0%	52	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	36	3	↔ 8,3%	0	↓ 0,0%	52	15	↔ 28,8%	0	↓ 0,0%	49	6	↓ 12,2%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Chumbo	35	91,3	mg/kg	48	3	6,3%	0	0,0%	52	19	↔ 36,5%	0	↓ 0,0%	36	13	↓ 36,1%	0	↓ 0,0%	52	17	↓ 32,7%	0	↓ 0,0%	49	26	↔ 53,1%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Cobre	35,7	197	mg/kg	48	23	47,9%	0	0,0%	52	31	↔ 59,6%	0	↓ 0,0%	36	36	↔ 100,0%	0	↓ 0,0%	52	48	↔ 92,3%	0	↓ 0,0%	49	48	↔ 98,0%	1	↔ 2,0%
Ferro-Carvão	Cromo	37,3	90	mg/kg	48	1	2,1%	0	0,0%	52	19	↔ 36,5%	0	↓ 0,0%	36	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	52	3	↔ 5,8%	0	↓ 0,0%	49	8	↔ 16,3%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Fósforo	2000	2000	mg/kg	48	0	0,0%	0	0,0%	52	6	↔ 11,5%	6	↔ 11,5%	36	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	52	1	↔ 1,9%	1	↔ 1,9%	49	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	49	2	4,1%	0	0,0%	52	21	↔ 40,4%	0	↓ 0,0%	36	3	↔ 8,3%	0	↓ 0,0%	52	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	49	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Ferro-Carvão	Níquel	18	35,9	mg/kg	48	17	35,4%	5	10,4%	52	51	↔ 98,1%	21	↔ 40,4%	36	35	↓ 97,2%	20	↔ 55,6%	52	45	↔ 86,5%	23	↓ 44,2%	49	48	↔ 98,0%	27	↔ 55,1%
Ferro-Carvão	Zinco	123	315	mg/kg	48	1	2,1%	0	0,0%	52	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	36	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	52	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	49	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	123	73	59,3%	20	16,3%	76	56	↔ 73,7%	5	↓ 6,6%	113	91	↔ 80,5%	6	↓ 5,3%	57	46	↔ 80,7%	5	↔ 8,8%	58	52	↔ 89,7%	3	↓ 5,2%
Região 1A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	116	2	1,7%	0	0,0%	75	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	113	2	↔ 1,8%	0	↓ 0,0%	57	5	↔ 8,8%	0	↓ 0,0%	58	1	↓ 1,7%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	123	62	50,4%	47	38,2%	76	9	↓ 11,8%	3	↓ 3,9%	113	5	↓ 4,4%	1	↓ 0,9%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	58	2	↔ 3,4%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Cobre	35,7	197	mg/kg	123	54	43,9%	0	0,0%	76	7	↓ 9,2%	0	↓ 0,0%	113	21	↔ 18,6%	0	↓ 0,0%	57	15	↔ 26,3%	0	↓ 0,0%	58	13	↓ 22,4%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Cromo	37,3	90	mg/kg	123	28	22,8%	6	4,9%	76	14	↓ 18,4%	1	↓ 1,3%	113	24	↔ 21,2%	0	↓ 0,0%	57	14	↔ 24,6%	0	↓ 0,0%	58	17	↔ 29,3%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Fósforo	2000	2000	mg/kg	123	0	0,0%	0	0,0%	76	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	113	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	58	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	110	1	0,9%	0	0,0%	76	1	↔ 1,3%	0	↓ 0,0%	113	6	↔ 5,3%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	58	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1A	Níquel	18	35,9	mg/kg	123	86	69,9%	25	20,3%	76	30	↔ 39,5%	5	↓ 6,6%	113	28	↓ 24,8%	7	↓ 6,2%	57	18	↔ 31,6%	7	↔ 12,3%	58	20	↔ 34,5%	7	↓ 12,1%
Região 1A	Zinco	123	315	mg/kg	123	1	0,8%	0	0,0%	76	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	113	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	58	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Arsênio	5,9	17	mg/kg	105	82	78,1%	7	6,7%	59	54	↔ 91,5%	4	↔ 6,8%	53	39	↓ 73,6%	11	↔ 20,8%	44	39	↔ 88,6%	10	↔ 22,7%	46	45	↔ 97,8%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	105	4	3,8%	0	0,0%	59	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	53	4	↔ 7,5%	0	↓ 0,0%	44	2	↔ 4,5%	0	↓ 0,0%	46	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Chumbo	35	91,3	mg/kg	105	47	44,8%	0	0,0%	58	4	↓ 6,9%	0	↓ 0,0%	53	10	↔ 18,9%	0	↓ 0,0%	44	1	↓ 2,3%	0	↓ 0,0%	46	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Cobre	35,7	197	mg/kg	105	76	72,4%	0	0,0%	59	27	↓ 45,8%	0	↓ 0,0%	53	18	↓ 34,0%	0	↓ 0,0%	44	15	↔ 34,1%	0	↓ 0,0%	46	7	↓ 15,2%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Cromo	37,3	90	mg/kg	105	71	67,6%	1	1,0%	59	46	↔ 78,0%	2	↔ 3,4%	53	28	↓ 52,8%	1	↓ 1,9%	44	30	↔ 68,2%	1	↔ 2,3%	46	34	↔ 73,9%	2	↔ 4,3%
Região 1B	Fósforo	2000	2000	mg/kg	105	3	2,9%	3	2,9%	59	1	↓ 1,7%	1	↔ 1,7%	53	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	44	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	46	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	105	32	30,5%	4	3,8%	59	5	↓ 8,5%	0	↓ 0,0%	53	5	↔ 9,4%	0	↓ 0,0%	44	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	46	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 1B	Níquel	18	35,9	mg/kg	105	79	75,2%	54	51,4%	59	47	↔ 79,7%	7	↓ 11,9%	53	24	↓ 45,3%	13	↔ 24,5%	44	20	↔ 45,5%	4	↓ 9,1%	46	24	↔ 52,2%	2	↓ 4,3%
Região 1B	Zinco	123	315	mg/kg	105	1	1,0%	0	0,0%	59	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	53	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	44	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	46	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	243	103	42,4%	4	1,6%	162	65	↓ 40,1%	0	↓ 0,0%	157	55	↓ 35,0%	0	↓ 0,0%	57	18	↓ 31,6%	1	↔ 1,8%	70	25	↔ 35,7%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	243	0	0,0%	0	0,0%	161	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	157	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	70	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	243	29	11,9%	2	0,8%	162	1	↓ 0,6%	0	↓ 0,0%	157	2	↔ 1,3%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	70	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Cobre	35,7	197	mg/kg	243	74	30,5%	0	0,0%	162	6	↓ 3,7%	0	↓ 0,0%	157	2	↔ 1,3%	0	↓ 0,0%	57	3	↔ 5,3%	0	↓ 0,0%	69	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Cromo	37,3	90	mg/kg	243	216	88,9%	46	18,9%	162	81	↓ 50,0%	15	↓ 9,3%	157	42	↓ 26,8%	0	↓ 0,0%	57	16	↔ 28,1%	0	↓ 0,0%	70	19	↓ 27,1%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Fósforo	2000	2000	mg/kg	243	0	0,0%	0	0,0%	162	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	157	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	70	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	240	15	6,3%	1	0,4%	165	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	157	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	57	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%	70	0	↓ 0,0%	0	↓ 0,0%
Região 2A	Níquel	18	35,9	mg/kg	243	130	53,5%	26																					

▪ Região Montante

Essa região está localizada a montante das barragens B1, B4, B4A e da confluência do ribeirão Piedade e rio Paraopeba, onde se localiza o ponto PT-52. A variação da intensidade das chuvas, a variação da elevação do nível de água e da vazão regulam a quantidade e o arraste de material transportado provenientes de áreas a montante da região afetada pelo rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A e tendenciam a depositar sedimentos em áreas suscetíveis como margens de rio, áreas de remanso e na sua própria calha. Além disso, os corpos d'água contribuem com o transporte de sedimentos provenientes de rochas intemperizadas do Grupo Nova Lima, Granito Nochese e Complexo Belo Horizonte e solos presentes na região.

No período correspondente ao primeiro período de estiagem (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 foram o As, Cu, Cr, Hg e Ni, sendo que o As e Cr ultrapassou o nível 2. Esses desvios na Região Montante podem indicar a possibilidade de que tais parâmetros sejam característicos da bacia, de modo a contribuir nas concentrações das demais regiões.

No segundo período de estiagem (abril/2020 a setembro/2020), constatou-se que o As, Cu, Cr e Ni ultrapassaram o nível 1, sendo que, houve redução no percentual ultrapassado em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 no período anterior para esses metais, e ocorreu aumento em relação ao nível 2 para o Cr e Ni. Desta forma, além do intemperismo de solos e rochas que disponibilizam minerais para o rio Paraopeba, considerou-se também que as chuvas intensas de 2019/2020 podem ter mobilizado ainda mais sedimentos, seja em suspensão, por arraste ou até erosão de margens com minerais ou argilominerais contendo esses elementos e que puderam ser acumulados na calha do rio.

No período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021), observou-se que na Região Montante houve elevação no percentual de desvios de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 para As, Cr e Ni, sendo que, para o nível 2, não houve desvios. Com o período de estiagem, houve redução dos percentuais de desvio, o que pode ser verificado para o nível 2 dos parâmetros Cr e Ni. Notou-se ainda, que uma menor quantidade de parâmetros ultrapassou os valores Resolução CONAMA 454/12 nesse período de estiagem.

Para o período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022), tendo em vista os valores da Resolução CONAMA 454/12, observou-se que na região houve aumento no percentual de desvios de nível 1 para As e Cu, somente. Os parâmetros Cr e Ni apresentaram redução de desvios em relação ao período de estiagem anterior, enquanto os demais parâmetros não ultrapassaram os valores orientadores. Nesse período não houve desvios em relação ao nível 2.

Para o período de estiagem/2023 (abril/2023 a setembro/2023), notou-se que os desvios de As continuaram em 100%, enquanto houve redução dos desvios de Cr (9 desvios – 75%) e de Ni

(2 desvios – 16,7%) em relação aos valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Assim como o período de estiagem anterior, não houve desvios dos valores de nível 2.

Considerando todos os períodos de estiagem, apesar da oscilação entre os períodos, os parâmetros As, Cr e Ni foram observados acima dos valores da Resolução CONAMA nº 454/12 em todos os períodos de estiagem analisados para a Região Montante. O parâmetro Hg esteve acima do valor somente no período de estiagem/2019. Ademais, as concentrações dos metais As, Cu, Cr e Ni podem sugerir a possibilidade da característica de contribuições difusas provenientes da própria bacia em sua porção montante, de modo a contribuir nas concentrações das demais regiões.

▪ Região Ferro-Carvão

A região do ribeirão Ferro-Carvão é caracterizada pela presença dos rejeitos oriundos das barragens B1, B4 e B4A. Para evitar que a água e sedimentos deste ribeirão continuassem a fluir diretamente para o rio Paraopeba, a Vale instalou uma cortina metálica (Estaca Prancha) nesse ribeirão e escavou uma área para acúmulo de água e sedimentos, os quais foram limitados pela cortina metálica. A água represada proveniente do ribeirão Ferro-Carvão é vertida para as estações de tratamento de água ETAF 1 e, depois de tratada, a água é lançada no ribeirão Casa Branca. Nesta região também ocorrem obras e operações que podem influenciar na concentração dos elementos nos sedimentos.

Com o represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão, estabeleceu-se uma condição que se assemelha a lântica de movimentação da água, e isso possibilita maior deposição de sedimentos de granulação fina que estavam transportados em suspensão e até os sedimentos mais grossos transportados por arraste, que se acumulam na área represada.

No primeiro período de estiagem (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn apresentaram desvios em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, e somente o Ni apresentou concentrações acima do nível 2.

No segundo período de estiagem (abril/2020 a outubro/2020), com a redução das vazões do ribeirão Ferro-Carvão, percebeu-se aumento gradativo das concentrações de metais nessa localidade em relação aos valores da Resolução CONAMA 454/12 ou Vicq (2015), à medida que a estiagem avançou. Com exceção do Cd e Zn, todos os outros elementos (As, Pb, Cu, Cr, P, Hg e Ni) ficaram acima do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 e apresentaram elevação no percentual de desvios. Apenas As, P e Ni indicaram desvios do nível 2, e foram os elementos que apresentaram aumento em comparação com a estiagem/2019. Esse aumento pode ser atribuído ao acúmulo de sedimentos da bacia do rio Paraopeba e rejeitos da Mina Córrego do Feijão, em consequência das ações de engenharia para contenção de rejeitos e tratamento da água na bacia do rio Paraopeba, haja vista o represamento da água e consequente decantação de sedimentos no leito que pudessem estar em suspensão.

No período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021), os principais comportamentos dos percentuais de desvio da legislação na Região Ferro-Carvão foram as elevações para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 dos parâmetros As, Cd e Cu. Já os parâmetros Pb, Cr, P, Hg e Ni apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior. O metal Zn seguiu comportamento semelhante ao período de estiagem/2020, não apresentando concentrações em desacordo com a Resolução. Para o nível 2, somente As e Ni apresentaram desvios, comportamento similar à estiagem/2020, enquanto o Fósforo diminuiu a porcentagem de violações do nível 2.

Em relação ao período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022) foi observado aumento dos desvios em relação ao período de estiagem anterior para Cd, Cr e P. Já os parâmetros que apresentaram redução, foram: As, Pb, Cu, Hg e Ni. Para o parâmetro Zn não houve desvios na estiagem/2022. Para o nível 2, houve desvios para As, P e Ni, sendo que As e P aumentaram e Ni reduziu a porcentagem de violações. A persistência desses metais acima desses valores pode ser justificada pelo represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão, que estabeleceu uma condição mais lântica de movimentação da água.

Para o período de estiagem/2023, tendo em vista os valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, observa-se que na Região Ferro-Carvão houve redução dos percentuais de desvios para Cd (6 desvios – 12,2%) e P (0 desvio – 0%), à medida em que houve elevação nos percentuais de desvio para As (49 desvios – 100%), Pb (26 desvios – 53,1%), Cu (48 desvios – 98%), Cr (8 desvios – 16,3%) e Ni (48 desvios – 98%). Para o nível 2, foi registrada elevação no percentual de desvios para Cu (1 desvio – 2%) e redução para As (13 desvios – 26,5%) e P (0 desvio – 0%).

Ao comparar os períodos de estiagem de todos os anos considerados, foi possível verificar menores percentuais de resultados acima dos valores orientadores na estiagem/2019, visto que a condição do ribeirão era livre, sem área represada. Nas estiagens seguintes, notou-se variação na porcentagem de desvios dos valores da Resolução CONAMA 454/12, entretanto, os parâmetros As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni foram persistentes e ultrapassaram a Resolução em quase todos os períodos. Como observado nos mapas geoquímicos (Arcadis, 2020), o Arsênio, Cromo, Cobre, Níquel, Zinco são elementos presentes em rochas de composição máfica/ultramáfica presentes na bacia do Paraopeba, bem como do rejeito que se acumularam na bacia de decantação.

▪ **Região 1A**

A Região 1A foi a mais afetada pelo rompimento da barragem no rio Paraopeba e nela se depositaram sedimentos com característica química de rejeitos, conforme pode ser verificado no relatório de Fechamento de Ciclo de abril/2021 e no Capítulo 13 deste relatório, elaborados pela Arcadis. Portanto, os resultados analíticos estão associados tanto com os sedimentos que apresentam características químicas de rejeito quanto dos sedimentos naturais da própria bacia.

Adicionalmente, a Região 1A está disposta sobre rochas metavulcanossedimentares do Grupo Itabira (Formação Cauê), Grupo Sabará e rochas gnáissicas do Complexo Bonfim. Os primeiros dois grupos podem conter minerais ricos em As, Cu, Ni e ainda, o próprio solo resultante do intemperismo dessas rochas pode conter minerais/argilominerais com esses mesmos elementos. A disposição desses elementos no leito do rio Paraopeba pode, inclusive, ser decorrente do transporte de materiais intemperizados transportados pelos tributários da sub-bacia como no ribeirão Casa Branca e Ferro-Carvão, entre outros que atravessam essas rochas dos Grupos Itabira e Sabará (VICQ *et al.*, 2018), bem como de sedimentos com característica química de rejeitos provenientes das barragens B1, B4, B4A.

No primeiro período de estiagem/2019 (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn ultrapassaram os valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Desses, As, Pb, Cr e Ni ultrapassaram o nível 2.

No período de estiagem/2020 (abril/2020 a setembro/2020), foi possível observar que apenas os parâmetros As e Hg apresentaram elevação dos percentuais de desvios em relação ao nível 1. Dos parâmetros que apresentaram redução, Cd e Zn não apresentaram resultados em desacordo para a estiagem/2020, assim como o parâmetro P. Em relação ao nível 2 da Resolução, As, Pb, Cr, Ni apresentaram redução do percentual de desvios em relação à estiagem/2019.

No período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021), foi observado aumento dos percentuais de resultados acima dos valores da Resolução CONAMA 454/12 para o nível 1 dos parâmetros: As, Cd, Cu, Cr e Hg. Para o nível 2, apresentaram redução dos percentuais em relação ao período de estiagem/2020 o As, Pb, Cr e Ni, sendo que desses, apenas o Cr não apresentou desvios do nível 2 em 2021.

Para a Região 1A, no período de estiagem/2022, os parâmetros que apresentaram elevação do percentual de desvios para nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 foram: As, Cd, Cu, Cr e Ni. Os parâmetros Pb e Hg apontaram redução em relação ao período de estiagem/2021. Quanto ao nível 2, apenas As e Ni ultrapassaram o nível 2, indicando aumento em relação a 2022.

O último período de estiagem, entre abril/2023 e setembro/2023, tendo em vista os valores da Resolução CONAMA 454/2012 para o nível 1, apontou aumento dos desvios para As (52 desvios – 89,7%), Pb (2 desvios – 3,4%), Cr (17 desvios – 29,3%) e Ni (20 desvios – 34,5%), enquanto Cd (1 desvio – 1,7%) e Cu (13 desvios – 22,4%) apontam reduções nos percentuais em relação ao período anterior. Para o nível 2 estipulado pela Resolução de referência, observa-se desvios para As (3 desvios – 5,2%) e Ni (7 desvios – 12,1%), ambos apontando redução no número de desvios.

Ao realizar a comparação entre os períodos de estiagem de todos os anos considerados, nota-se, em geral, que os mesmos parâmetros, As, Cu, Cr e Ni, apresentaram concentrações acima do nível 1 e com percentuais relativamente próximos, principalmente a partir de 2020.

Região 1B

No período de estiagem/2019 (abril/2019 a setembro/2019), todos os parâmetros (As, Cd, Pb, Cu, Cr, P, Hg, Ni e Zn) apresentaram concentrações acima do nível 1 e os parâmetros As, Cr, P, Hg e Ni para o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12.

Na estiagem/2020 (abril/2020 a setembro/2020), com a redução das vazões e intensidade das chuvas, houve maior deposição de sedimentos no rio Paraopeba. Em relação aos metais, houve aumento das percentagens de desvio para As, Cr e Ni considerando o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 e em relação ao período de estiagem/2019, enquanto os demais apresentaram redução nos resultados que ultrapassaram esta Resolução. Para o nível 2, apenas As e Cr apresentaram aumento na percentagem de desvios. Os metais P, Hg e Ni reduziram os números de desvios, sendo que desses, apenas o Hg não ultrapassa o valor de nível 2 em 2020.

No período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021), foi observado elevação do percentual de desvios da Resolução CONAMA 454/12 em seu nível 1 para o Cd, Pb e Hg, em comparativo com o ciclo de estiagem/2020. Em contrapartida, a maioria dos parâmetros apresentaram redução na percentagem de desvios (As, Cu, Cr, P e Ni). Para o nível 2, As, Cr e Ni apresentaram desvios, com redução para os dois últimos metais e aumento para o As.

Para o período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022), os parâmetros que ultrapassaram os valores da Resolução CONAMA 454/12 de nível 1 e apresentaram elevação de percentual foram: As, Cu, Cr e Ni. Os parâmetros Cd, Pb e Hg apresentaram redução da porcentagem de desvios. Para o nível 2, As, Cr e Ni apresentaram desvios, sendo que houve aumento do número de desvios para os dois primeiros e redução para o Ni.

Para o período de estiagem/2023 (abril/2023 e setembro/2023), tendo em vista os valores estipulados pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para o nível 1, constatou-se elevação nos percentuais de desvio para As (45 desvios – 97,8%), Cr (34 desvios – 73,9%) e Ni (24 desvios – 52,2%), enquanto Cd, Pb e Cu reduziram o número de desvios, sendo que apenas o Cu ultrapassa o nível 1 (7 desvios – 5,2%). Para o nível 2, constatou-se desvios de Cr e Ni com elevação para Cr (2 desvios – 4,3%) e redução para o Ni (2 desvios – 4,3%).

A Região 1B está posicionada em área afetada pelo rejeito do rompimento da barragem B1, além de estar geologicamente disposta sobre rochas metavulcânicas do Grupo Itabira/Sabará, os quais são caracterizados por unidades de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima e por granitoides e gnaisses do Complexo Bonfim e Belo Horizonte. A presença de Ni, Cu, As e Cr nos sedimentos de corrente observada ao longo do período de monitoramento sugere diversas contribuições, seja da própria bacia, através dos produtos do intemperismo de rochas, erosões no solo, escoamento superficial, seja de contribuição de sedimentos provenientes da rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A.

▪ **Região 2A**

A Região 2A está entre as regiões pouco afetadas pelo rejeito da rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A. Nessa região, há uma variedade de unidades litológicas quando se observa o mapa geológico regional da bacia do rio Paraopeba (base geológica CPRM), encontrando-se rochas ígneas e metamórficas do Complexo Belo Horizonte que se distribui ao longo do rio até o limite com as rochas metassedimentares do Grupo Bambuí, que se identifica na transição do PT-17 para o PT-18, entre Fortuna de Minas e Pequi, nas margens direita e esquerda do rio Paraopeba, respectivamente.

No período de estiagem/2019 (abril/2019 a setembro/2019), os metais que ultrapassaram os valores do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 foram As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, e desses, apenas o Cu não ultrapassou o valor de nível 2.

Na estiagem/2020 (abril/2020 a setembro/2020) os metais que apresentaram desvios de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 foram As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, sendo que, em relação a estiagem/2019, todos apresentaram redução na percentagem de desvios. Os parâmetros As, Pb, Cr e Ni apresentaram redução do número de desvios do nível 2 no período, visto que apenas Cr e Ni apontam ultrapassagem dos valores orientadores.

Para o período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021) ocorreu elevação do percentual de desvios da Resolução CONAMA 454/12 em seu nível 1 somente para o Pb. Apresentaram redução do número de desvios os metais As, Cu, Cr e Ni, sendo que nenhum metal apresentou desvio para o nível 2. O parâmetro Hg não apresentou desvio para as duas últimas estiagens (2020 e 2021) e os parâmetros Cd, P e Zn apresentaram comportamento similar e não ultrapassaram os valores da Resolução. Em geral, foi possível observar atenuação das concentrações em relação aos períodos pretéritos.

No período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022) foi verificado comportamento de elevação do percentual de desvios da Resolução nível 1 para Cu, Cr e Ni, enquanto os parâmetros As e Pb apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior. Para o nível 2, somente o As apresentou uma amostra acima do valor CONAMA 454/12 com aumento em relação a 2019.

Para o último período de estiagem, entre abril/2023 e setembro/2023, tendo em vista os valores da Resolução CONAMA 454/12, constatou-se desvios para o nível 1 para Cu (0 desvio – 0%), Cr (19 desvios – 27,1%) e Ni (6 desvios – 8,7%), ambos registrando reduções nos percentuais de desvio e, para As (25 desvios – 35,7%), com aumento no percentual em relação a 2022. Para o nível 2, o As registrou redução no percentual de desvio, com isso, nenhum parâmetro registra desvios de nível 2 em 2023. Neste período, não foram registrados desvios, novamente, para os parâmetros Cd, Pb, P, Hg e Zn, comportamento similar ao observado para o período de estiagem/2021 e 2022.

Ao avaliar os períodos de estiagem/2019 a 2023, foi possível verificar que os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 em

nenhum período de estiagem na Região 2A. Já o Hg apresentou concentração em desacordo somente em 2019. Para os demais parâmetros, notou-se uma redução dos percentuais de desvios para os níveis 1 e 2 em relação aos períodos anteriores.

▪ **Região 2B**

As concentrações dos elementos na Região 2B possuem relação com os sedimentos naturais da bacia provenientes de intemperismos de rochas da Formação Serra de Santa Helena, composta por minerais e argilominerais ricos em Alumínio. Ademais, os pontos da Região 2B estão inseridos no reservatório da UHE de Retiro Baixo, em ambiente intermediário e propício à dissipação e deposição de materiais carregados de montante, servindo como área de acúmulo de materiais sedimentáveis provenientes da bacia.

No período de estiagem/2019 (abril/2019 a setembro/2019) os metais As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni apresentaram desvios para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Destes, apenas As, Pb, Cr e Ni desviaram do nível 2 da resolução.

Na estiagem/2020 (abril/2020 a setembro/2020), houve aumento de percentual de desvios para o nível 1 dos parâmetros As, Pb, Cu, Cr e Ni, todos com aumento do número de desvios em relação a 2019. O Hg apresentou redução e não ultrapassou os valores CONAMA 454/12 no período, comportamento similar ao dos parâmetros Cd, P e Zn, que também não apresentaram desvio em relação a Resolução CONAMA 454/12. Os metais As, Cr e Ni também apresentaram desvios para o nível 2 com aumento dos desvios em relação a estiagem anterior.

Para o período de estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021), foi possível observar que apenas os metais As e Hg apresentaram aumento nos percentuais de desvios da CONAMA 454/12 em seu nível 1, em relação ao período de estiagem anterior. Os parâmetros Pb, Cu e Ni apresentaram redução na percentagem de desvios; Cr manteve o comportamento observado na estiagem/2020, ultrapassando o nível 1 em 100% das amostras, enquanto Cd, P e Zn não apresentaram desvios. Para o nível 2, somente As e Cr apresentaram desvios em relação a legislação, porém, apresentaram redução na percentagem de desvios.

Na Região 2B, ao longo do período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022), foi verificado que para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 apenas os metais Cu e Ni apresentaram incremento das porcentagens de desvio em relação ao período de estiagem anterior. O parâmetro As ultrapassou o nível 1 mantendo a percentagem da estiagem anterior, enquanto Cu aumenta e Pb, Cr e Hg reduziram as porcentagens de desvio. Para o nível 2, As, Cr e Ni apresentaram elevação na percentagem de desvios. Os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram desvios em nenhum período de estiagem analisado nesta região.

No período de estiagem/2023 (abril/2023 a setembro/2023), foi possível observar que os parâmetros Cr (49 desvios – 100%) e Ni (46 desvios – 93,9%) apresentaram elevação nos percentuais de desvios em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12; Arsênio manteve o desvio de 100% das amostras, enquanto Pb (2 desvios – 4,1%) e Cu (35 desvios – 71,4%)

apresentaram redução dos desvios. Em relação ao nível 2 da Resolução CONAMA 454/12, As (2 desvios – 4,1%) e Cr (2 desvios – 4,1%) diminuíram a quantidade de desvios, enquanto o Ni manteve apenas uma amostra acima do nível 2 (2%). Os demais parâmetros não apresentaram desvios.

O reservatório da UHE Retiro Baixo tem operado como um decantador e acumulador de sedimentos da bacia do rio Paraopeba e, na estiagem, com a redução da velocidade e vazão do rio, os metais presentes na bacia tendem a se dissipar e/ou depositar no leito do reservatório. Ao se comparar os períodos de estiagem de todos os anos considerados (2019 a 2023), observou-se que ao longo do monitoramento os mesmos parâmetros permanecem ultrapassando os valores CONAMA 454/12, e que estes parâmetros (As, Pb, Cu, Cr e Ni) apresentaram redução nas percentagens de desvio ou percentagens próximas.

▪ Região 2C

A Região 2C está localizada a jusante da UHE Retiro Baixo e, também, é envolvida por contribuições de rochas intemperizadas do Grupo Bambuí, além de sedimentos quaternários e terciários.

No período de estiagem/2019 (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros em desacordo com o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 foram As, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn. Apenas o Cr ultrapassou o nível 2 da Resolução.

No período de estiagem/2020 (abril/2020 a setembro/2020), os metais As, Cd, Cr e Zn apresentaram aumento na porcentagem de desvios em relação ao nível 1, enquanto Pb, Cu e Ni apresentaram redução nos desvios e não ultrapassaram os valores da CONAMA 454/12 em nenhum nível, assim como o Fósforo. Em relação ao nível 2, nenhum parâmetro apresentou desvio em 2020.

Para a estiagem/2021 (abril/2021 a setembro/2021) apenas os metais As e Cr ultrapassam o valor de nível 1, bem como a elevação nas percentagens de desvio deles. Os metais Cd e Zn apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior, e não apresentaram desvios. Os parâmetros Pb, Cu, P, Hg e Ni não ultrapassaram nenhum dos valores da Resolução CONAMA 454/12, assim como observado na estiagem/2020.

No período de estiagem/2022 (abril/2022 a setembro/2022) foi possível observar que os parâmetros As, Cu, Cr e Ni apresentaram elevação nos percentuais de desvios em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Destes, apenas o As apresentou desvio do nível 2. Os demais parâmetros não apresentaram desvios para o período analisado.

No período de estiagem/2023 (abril/2023 a setembro/2023) observou-se que os parâmetros As (16 desvios – 51,6%), Cu (0 desvio – 0%) e Cr (18 desvios – 58,1%) reduziram as percentagens de desvios em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, sendo que apenas o Ni (9 desvios – 29%) aumentou. Destes, apenas o Ni (1 desvio – 3,2%) apresentou

uma amostra em desacordo com o nível 2. Os demais parâmetros não apresentaram desvios no período.

Comparando-se os períodos de estiagem pretéritos (2019 a 2022) com o período de estiagem/2023, foi possível observar que os parâmetros As e Cr permanecem acima dos valores de nível 1 em todos os períodos apresentados neste relatório e, em geral, apresentando aumento. O parâmetro Cd apresentou desvio pontualmente na estiagem/2020, enquanto os demais, apresentaram redução ou não ficaram acima dos valores CONAMA 454/12 ao se comparar as estiagens de 2019 a 2022.

12.3.1. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos

Os mapas temáticos presentes no **Anexo XI** permitem visualizar a evolução espacial dos metais, mês a mês ao longo da bacia do rio Paraopeba durante todo o período de janeiro/2019 a setembro/2023, enquanto os mapas apresentados ao longo deste texto mostram o consolidado da evolução dos metais ao longo dos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023. A análise foi baseada no comportamento da concentração máxima dos sedimentos agregados por região e comparados em relação ao valor de referência de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Para Ferro, Manganês e Alumínio utilizou-se a referência de Vicq (2015) adotada pelo IGAM, visto que não há valores de comparação na Resolução CONAMA 454/12.

- **Manganês**

Na **Figura 12.3.1-1** são apresentadas as variações de Manganês nos sedimentos ao longo dos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

Verificou-se que, após o rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, o Manganês, identificado como marcador do avanço do rejeito foi transportado tanto por arraste quanto por suspensão, em concentrações mais elevadas das que se constatavam ao longo da bacia do rio Paraopeba entre 2008 e 2009 (CPRM, 2018). As regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, mais próximas à barragem (fonte dos rejeitos), acumularam mais sedimentos com característica de rejeitos, enquanto a Região 2A, mais afastada em relação à fonte, também mostrou acúmulo, porém, em menores concentrações. Nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, na estiagem/2019, as concentrações máximas foram mais que 5 vezes superiores ao valor de Vicq (2015) que é de 3300 mg/kg, reflexo de sedimentos transportados por arraste/suspensão e sedimentação em áreas de retenção hidráulica. Na Região 2A, as concentrações máximas ficaram, na maior parte do trecho, entre 2 e 5 vezes maiores que o valor de referência de Vicq (2015) e, em alguns trechos mais lênticos (próximo a Região 2B), as concentrações foram menores que a região a montante, entre 1,2 e 2 vezes o valor orientador. Nas regiões 2B e 2C não foram identificadas concentrações de Manganês acima do valor orientador de Vicq (2015) nos sedimentos, sendo as concentrações identificadas como de sedimentos com características químicas naturais (vide capítulo 13), enquanto na maioria

dos tributários, as concentrações se mantiveram com característica de sedimentos naturais. Em relação aos Tributários, observa-se que, na estiagem/2019 o Rio Pardo (TT-08) apresentou concentrações máximas que foram mais que 5 vezes superiores ao valor de Vicq (2015).

Na estiagem/2020, de forma geral, as concentrações se atenuaram em relação à estiagem/2019, apresentando redução das concentrações em relação a referência de Vicq (2015) em pelo menos alguma parte de todas as regiões avaliadas. No entanto, as regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B ainda apresentavam trechos com concentrações elevadas (mais que 5 vezes superiores ao valor de referência). Percebe-se na Região 2A, melhoria mais evidente das condições em relação ao período de estiagem anterior, com concentrações máximas variando entre 1,2 e 2 vezes maiores, além disso, verifica-se nessa mesma região, alguns trechos com concentrações máximas menores que o valor de Vicq (2015). Acúmulos pontuais foram observados na Região 2B, nas proximidades do PT-20, na entrada do reservatório da UHE Retiro Baixo, onde o ambiente muda de lóxico para intermediário, a velocidade da água é reduzida e os materiais transportados se dissipam e depositam nessas localidades, ainda que em concentrações até 1,2 vezes o valor de Vicq (2015). Em relação aos Tributários, também foi observada redução das concentrações em relação a estiagem anterior, sobretudo no rio Pardo (TT-08), que, na estiagem/2019 apresentava concentrações máximas 5 vezes maiores que o valor de Vicq (2015), e na estiagem/2020 mostrou concentrações máximas menores ou iguais ao valor de referência. Do mesmo modo, o ribeirão Serra também exibiu redução das concentrações máximas, apresentando na estiagem/2020, valores máximos menores ou iguais ao valor de referência.

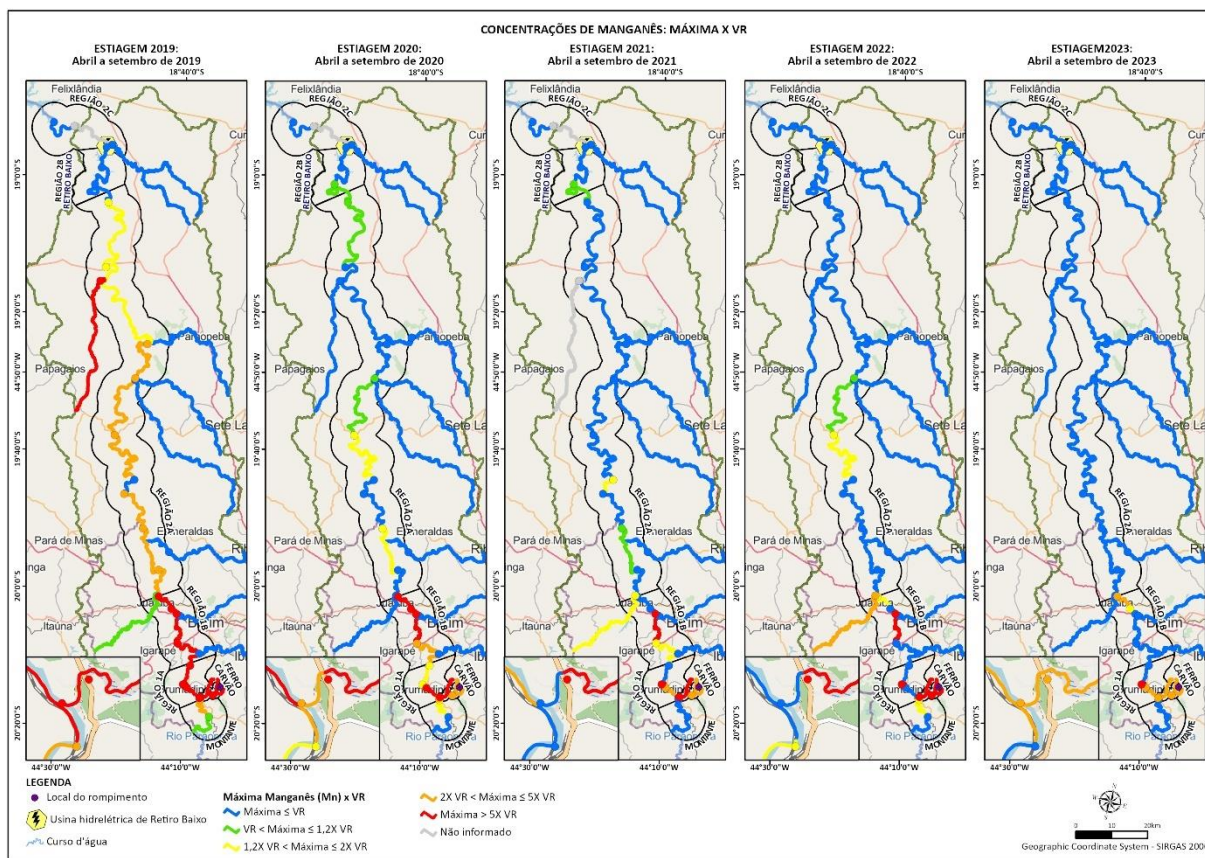
No período de estiagem/2021, as concentrações de Manganês no rio Paraopeba permaneceram mais que 5 vezes acima do valor de Vicq (2015) na região fonte (ribeirão Ferro-Carvão) e, pontualmente, na Região 1A e 1B. Entretanto, observou-se redução das concentrações máximas em relação a estiagem anterior (2020), o que pode ser verificado pela maior quantidade de trechos com concentrações máximas menores ou iguais ao valor de referência, principalmente na Região 2A. A Região 2B (PT-20), exibiu o mesmo comportamento observado na estiagem anterior, com concentrações máximas até 1,2 vezes o valor de referência. Por outro lado, o ribeirão Serra Azul (TT-04) mostrou aumento nas concentrações máximas em relação a estiagem anterior, apresentando teores entre 1,2 e 2 vezes maiores que o valor de referência. Destaca-se que, este Tributário (TT-04), pode apresentar contribuições difusas locais, por conta da proximidade a uma via férrea e condições de relevo, com potencial influência de eventos de cheia do rio, além de aspectos naturais, haja vista sua inserção sob rochas do Grupo Nova Lima.

No período de estiagem/2022, verificou-se persistência de concentrações 5 vezes maiores que a referência Vicq (2015) nas mesmas localidades do período anterior; Região Ferro Carvão e pontualmente na Região 1A e 1B. Para as regiões à jusante dessas, notou-se um comportamento semelhante ao observado na estiagem anterior (2021), com concentrações máximas variando entre 1,2 e 2 vezes o valor de Vicq (2015). O Tributário ribeirão Serra Azul (TT-04) exibiu aumento das concentrações máximas de Manganês em relação a estiagem anterior, exibindo teores entre 2 e 5 vezes mais elevados que o valor de Vicq (2015).

No período de estiagem atual (2023), de modo geral, verificou-se redução das concentrações máximas em relação a estiagem anterior, a Região Ferro-Carvão apresentou concentrações máximas entre 2 e 5 vezes o valor de Vicq (2015), enquanto na estiagem anterior as concentrações superavam em 5 vezes o valor de Vicq (2015). A Região 1A continuou exibindo pontualmente, teores elevados (até 5 vezes o valor de referência). A Região 1B (entre o PT-48 e PT-15) mostrou concentrações máximas entre 1,2 e 5 vezes maiores que o valor de referência, comportamento observado desde a estiagem anterior. As regiões 2A, 2B e 2C apresentaram concentrações máximas menores ou iguais ao valor de referência. Redução das concentrações também foi identificada no ribeirão Serra Azul (TT-04), o qual mostrou concentrações máximas menores ou iguais ao valor de referência de Vicq (2015).

Ao se avaliar a distribuição do Manganês, compreendendo os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023 (**Figura 12.3.1-1**), constatou-se, de modo geral, atenuação ao longo do tempo e espaço, com persistência de concentrações mais elevadas predominantemente na região do Ferro-Carvão, 1A e 1B, regiões mais afetada pelo rejeito das barragem, sendo que as demais localidades tiveram redução desse metal. Ademais, percebeu-se que dentre os tributários houve concentrações 5 vezes acima de Vicq (2015) no rio Pardo (TT-08) na estiagem/2019, o qual, posteriormente, não registou concentrações acima do valor de referência. Além disso, o ribeirão Serra Azul (TT-04) na Região 1B, exibiu variações nas concentrações de Manganês, sendo que, apenas na estiagem/2020 e na atual (2023), não houve registros de concentrações máximas superiores ao valor de referência. Os demais tributários mantiveram as concentrações dentro dos valores de sedimentos naturais e menores que a referência de Vicq (2015) durante todos os períodos de estiagem monitorados.

Figura 12.3-1 Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.



▪ **Ferro**

Na **Figura 12.3.1-2** são apresentadas as variações de Ferro nos sedimentos ao longo dos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

O Ferro, principal constituinte do rejeito, tem distribuição em concentrações elevadas em toda a bacia do rio Paraopeba. O IGAM adota a referência de Ferro de 281.000 mg/kg proposta por Vicq (2015). No período de estiagem/2019, constatou-se que concentrações acima dessa referência foram registradas, predominantemente desde a Região Montante até a Região 1B, e essas concentrações permaneceram entre 1,2 e 2 vezes maiores que o valor proposto por Vicq (2015), enquanto nas demais regiões, os valores das concentrações permaneceram abaixo da referência adotada.

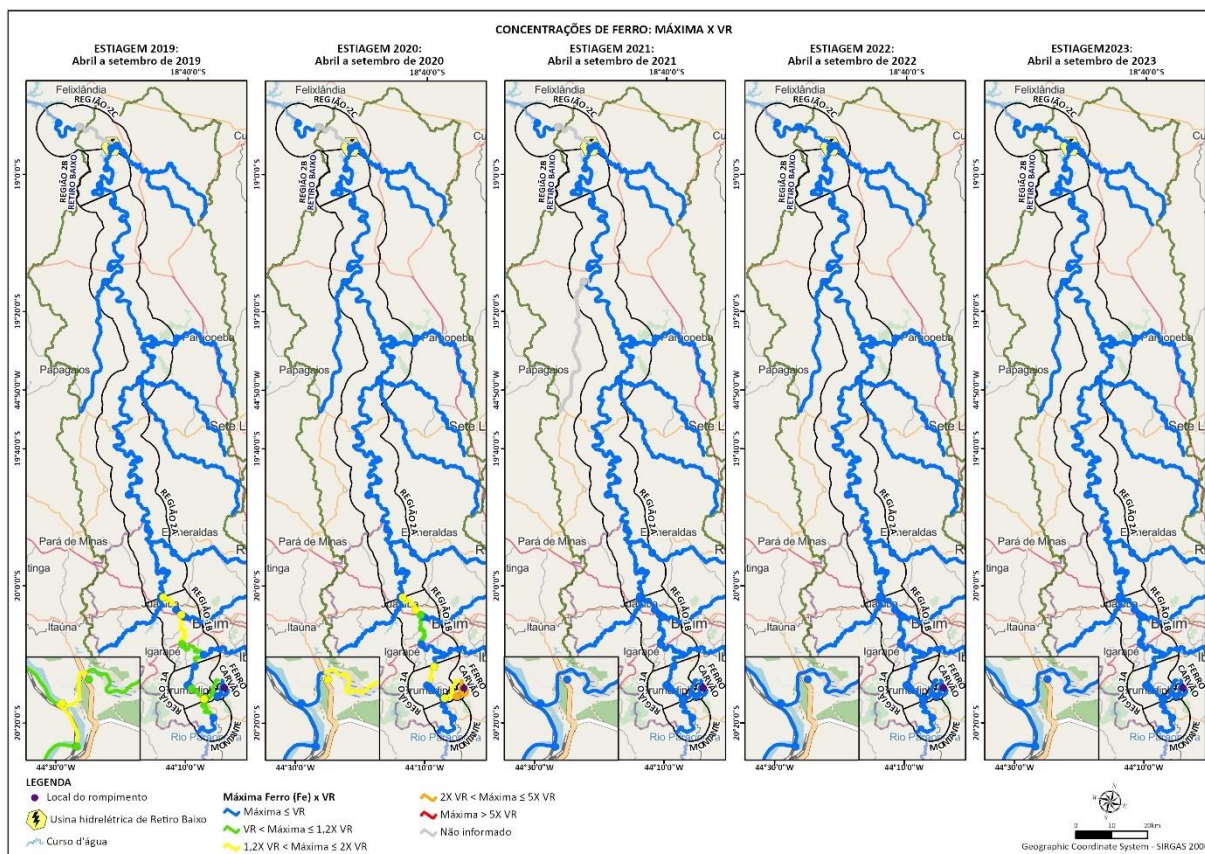
No período de estiagem/2020, as concentrações ora identificadas no período anterior apresentaram aumento, em alguns trechos, e redução em outros, entretanto, as regiões que apresentaram desvios foram as mesmas (Ferro-Carvão, 1A e 1B). Na Região Ferro-Carvão observa-se aumento das concentrações máximas em relação a estiagem/2019, apresentando

na estiagem/2020 concentrações entre 1,2 e 5 vezes o valor de referência. As regiões 1A e 1B exibiram concentrações entre 1,2 e 2 vezes o valor proposto por Vicq (2015).

A partir do período de estiagem/2021 foi observado o mesmo comportamento para as estiagens de 2022 e 2023, que foi de redução das concentrações máximas, nos trechos que, anteriormente, havia registros de concentrações mais elevadas. Observa-se que todas as regiões avaliadas apresentaram concentrações máximas menores ou iguais ao valor proposto por Vicq (2015).

Ao se avaliar a distribuição do Ferro, compreendendo os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 (**Figura 12.3.1-2**), as concentrações demonstraram redução ao longo da do tempo e espaço. Observou-se que de 2019 a 2020 havia disposição espacial localizada nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A e 1B, e, na estiagem/2021, bem como nas posteriores (estiagem/2022 e estiagem/2023) não foram identificadas concentrações acima do valor de Vicq (2015) para Ferro, ao longo de nenhuma região, incluindo os tributários.

Figura 12.3-2 Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem /2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Alumínio**

Na **Figura 12.3.1-3** são apresentadas as variações de Alumínio nos sedimentos ao longo dos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

O Alumínio, que é um elemento abundante na bacia do rio Paraopeba. Ao se avaliar a distribuição desse metal ao longo do rio, no período de estiagem/2019, constatou-se que, a Região 2B e apresentou as maiores concentrações, exibindo teores de 2 a 5 vezes maiores que o valor de 45.300 mg/kg proposto por (2015) e adotado pelo IGAM, indicando incremento de Al nessa localidade. Parte da Região 2B e parte da Região 2A mostraram concentrações máximas entre 1,2 e 2 vezes o valor de Vicq (2015), enquanto em alguns trechos da Região 2A, pontualmente na Região 1A e na Região Montante, as concentrações foram até 1,2 vezes o valor de Vicq (2015). Ressalta-se que a Região Ferro Carvão, bem como a Região 1B não apresentaram nenhuma ocorrência de concentrações acima da referência de Vicq (2015). Em relação aos Tributários, o ribeirão do Cedro (TT-07) exibiu concentrações de 1,2 a 2 vezes este valor.

No período de estiagem/2020, a Região Montante continuou a apresentar concentrações até 1,2 maiores que a referência, já a Região Ferro-Carvão exibiu um leve aumento se comparado ao período anterior, apresentando concentrações entre 1,2 e 2 vezes maiores que a referência de Vicq (2015). A ocorrência de Alumínio nessas regiões pode ter sido resultante de processo de erosão marginal ocorrido nas intensas chuvas de 2019/2020, lixiviação de minerais e deposição de argilominerais provenientes de intemperismos de granitoides do Complexo Belo Horizonte, Granito Noschese e contribuições difusas nesta região do rio Paraopeba.

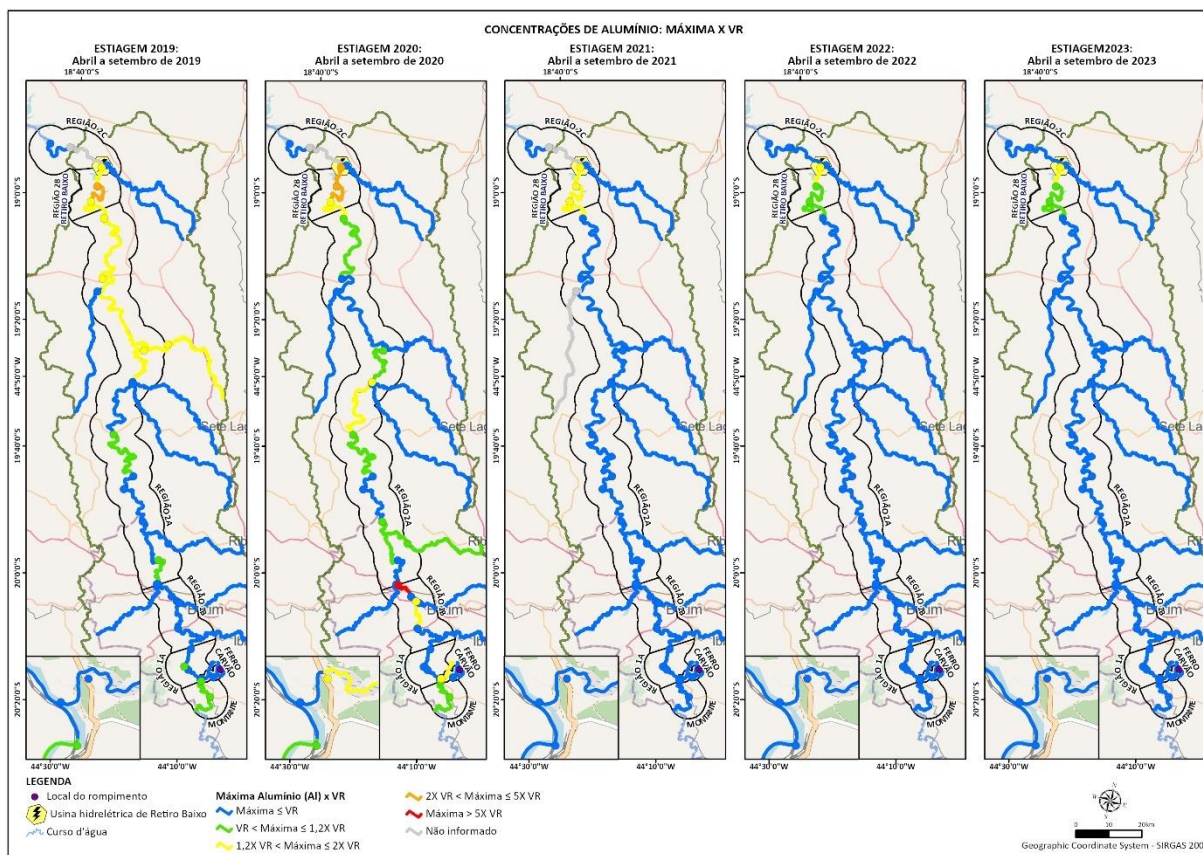
A Região 1A, que na estiagem anterior havia registrado ocorrência pontual de concentrações acima da referência, na estiagem/2020, mostra redução. Comportamento inverso foi verificado na Região 1B, onde na estiagem anterior não foram identificadas concentrações acima da referência, no entanto, na estiagem/2020 houve registros de concentrações máximas 5 vezes superiores ao valor de referência de Vicq (2015). A Região 2 A apresentou os mesmos teores de concentrações máximas registradas na estiagem anterior (2019), variando entre 1,2 e 2 vezes o valor de referência. A Região 2B também exibiu os mesmos teores de concentrações máximas registrados na estiagem anterior, mostrando teores máximos entre 2 e 5 vezes o valor de referência. Relacionado aos Tributários, na estiagem/2020 observa-se que o ribeirão Grande (TT-05) apresentou concentrações máximas até 1,2 vezes o valor de proposto por Vicq (2015). Já o tributário ribeirão do Cedro (TT-07) que na estiagem anterior (2019) apresentou concentrações de Alumínio mais elevados, na estiagem/2020, as concentrações foram reduzidas, inferiores ao valor de referência.

Na estiagem/2021, de modo geral, foi observada redução das concentrações máximas em todas as regiões, onde, somente na Região 2B foram identificados teores acima da referência de Vicq (2015), entre 1,2 e 2 vezes esse valor. Nos períodos de estiagem posteriores (estiagem/2022 e estiagem/2023) nota-se semelhança no comportamento do Alumínio,

exibindo, na maior parte da bacia, concentrações menores que o valor proposto por Vicq (2015) de 45.300 mg/kg, e, na Região 2B, concentrações entre 1,2 a 2 vezes este valor de referência.

Ao se avaliar o Alumínio nos mapas temáticos nas estiagens de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 (**Figura 12.3.1-3**) verificou-se a redução das concentrações temporal e espacialmente. Os valores que permaneceram mais elevados estão associados à condição intermediária do reservatório da UHE Retiro Baixo, que permite deposição e sedimentação de materiais provenientes de litologias contendo minerais com Alumínio, como a Formação Serra de Santa Helena (Grupo Bambuí), granitoides (Complexo Belo Horizonte), solos erodidos nas margens dos rios, além de outros materiais que são transportados e acumulados neste reservatório. Observou-se que de 2019 a 2020, havia disposição espacial de Al acima do proposto por Vicq (2015) em todas as regiões, com exceção da Região 2C, e, a partir da estiagem/2021 essa disposição espacial se reduziu, se concentrando na Região 2B, que é um ambiente mais lântico (intermediário) e atua como um reservatório possibilitando a dissipação e deposição de sedimentos, estes predominantemente mais finos e com maior capacidade de retenção de metais da bacia do Paraopeba.

Figura 12.3-3 Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Níquel**

Na **Figura 12.3.1-4**, as concentrações de Níquel nos sedimentos estão apresentadas por períodos sazonais de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

Notadamente, com o rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de níquel em termos de variação de concentração até o PT-17 (Região 2A), porém a de se considerar que a própria bacia já indicava concentrações de Níquel acima do valor da CONAMA 454/12, haja vista o deslocamento da pluma de Turbidez até Retiro Baixo e as concentrações acima da referência mesmo sem a presença dessa turbidez nas regiões a jusante como 2C.

Na estiagem/2019, as concentrações de Níquel tiveram ampla distribuição por toda a bacia, apresentando concentrações que foram maiores que 5 vezes o valor de nível 1 (VOR 1) da Resolução CONAMA 454/12, pontualmente na Região 1A. Grande parte das regiões apresentaram concentrações máximas entre 2 e 5 vezes acima do VOR 1. A Região 2C exibiu concentrações mais amenas (1,2 a 2 vezes acima do VOR 1). Em relação aos tributários, o ribeirão Serra Azul (TT-04) e o rio Pardo (TT-08) apresentaram concentrações máximas maiores que 5 vezes o valor do VOR 1, enquanto o rio Betim (TT-01) exibiu concentrações máximas entre 2 e 5 vezes o valor do VOR 1. Os tributários ribeirão Sarzedo (TT-02), ribeirão Grande (TT-05), ribeirão São João (TT-06), mostraram concentrações máximas mais amenas, entre 1,2 e 2 vezes acima do VOR 1. Somente o tributário ribeirão do Cedro (TT-07) exibiu concentrações inferiores ao VOR 1.

Na estiagem/2020, as concentrações de Níquel permaneceram acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 em toda a bacia, exceto na Região 2C. As maiores concentrações foram observadas em um trecho da Região Montante, onde foram registrados teores maiores que 5 vezes o VOR 1. Nas demais regiões foram registradas concentrações que variaram entre 1,2 e 5 vezes o valor do VOR 1. A Região 2C foi a única que apresentou concentrações inferiores ao VOR 1. Foram observadas reduções nas concentrações dos tributários, sendo que, o ribeirão Serra Azul (TT-04) apresentou as maiores concentrações (entre 2 e 5 vezes o valor de VOR 1), enquanto o ribeirão Sarzedo (TT-02), ribeirão Grande (TT-05), ribeirão São João (TT-06) e ribeirão do Cedro (TT-07) exibiram concentrações entre 1,2 e 2 vezes o VOR 1.

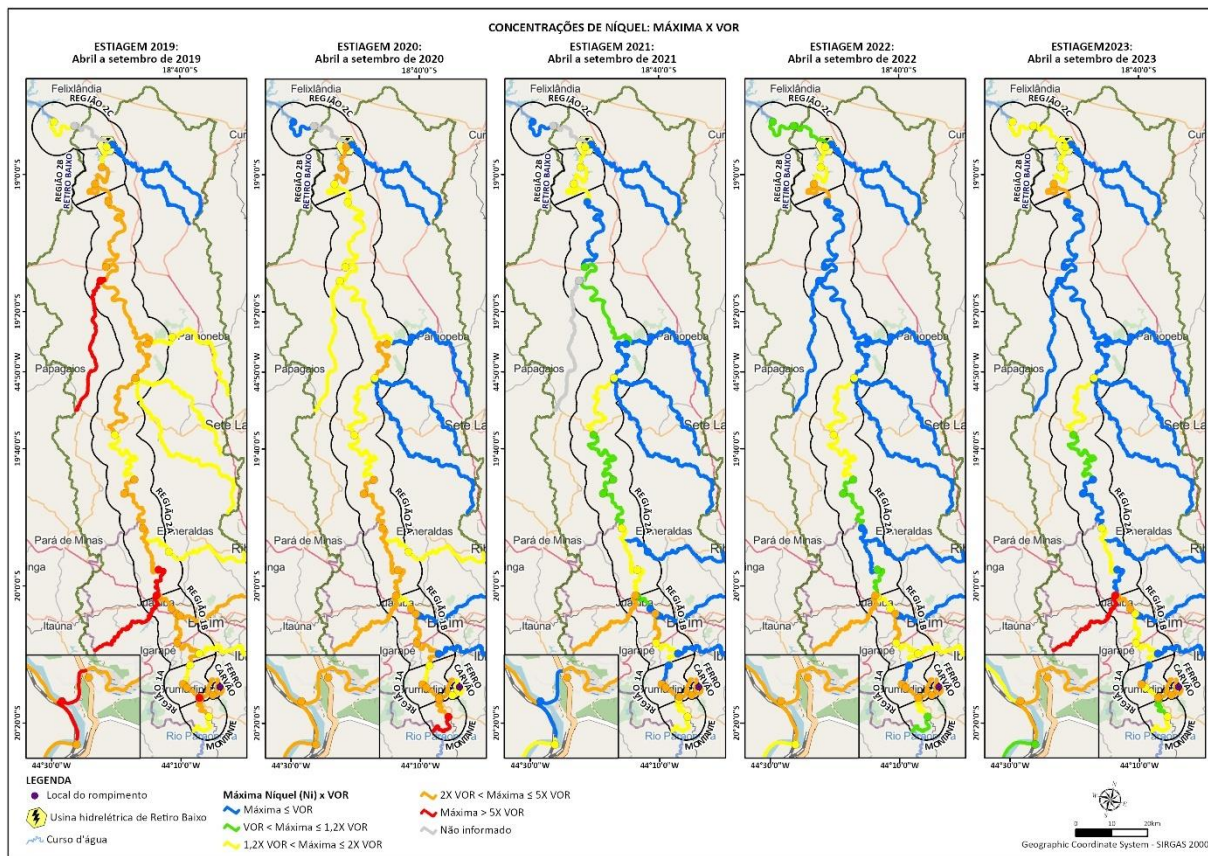
No período de estiagem/2021, as concentrações de Níquel apresentaram reduções em diversos trechos avaliados, em comparação com a estiagem/2020 (**Figura 12.3.1-4**). Observa-se que a Região Montante apresentou concentrações entre 1,2 e 2 vezes o valor do VOR 1, enquanto na Região 1A as concentrações ficaram entre 2 e 5 vezes o valor de VOR 1. Já na Região 1B, os teores variaram entre 1,2 a 5 vezes o valor de nível 1, e na Região 2A as concentrações registradas oscilaram entre 1,2 a 2 vezes o valor do VOR 1. A Região 2B mostrou concentrações entre 1,2 a 2 vezes o valor de VOR 1, enquanto a Região 2C, assim como no período de estiagem anterior, mostrou concentrações inferiores ao VOR 1. Em contrapartida, parte da Região Ferro-Carvão exibiu aumento das concentrações, em relação a estiagem anterior, mostrando teores entre 2 e 5 vezes o valor de VOR 1. Em relação aos

tributários, nota-se que somente o ribeirão Serra Azul (TT-04) exibiu concentrações acima do VOR 1, sendo estas entre 2 e 5 vezes o valor de referência.

O período de estiagem/2022 apresentou similaridade na distribuição espacial do Níquel comparando-se com a estiagem anterior (2021). Redução das concentrações foram observadas em parte da Região Montante e 2A, por outro lado, alguns trechos das regiões 1B, 2A, 2B e 2C mostraram elevação nos teores. Em relação aos tributários, o ribeirão Serra Azul (TT-04), mostrou concentrações acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 (entre 2 e 5 vezes), além deste, o tributário ribeirão Sarzedo (TT-02) mostrou concentrações entre 1,2 e 2 vezes o valor do VOR 1. Os demais tributários mostraram concentrações inferiores ao VOR nível 1.

Comparando o período atual de estiagem/2023 com o anterior (2022), notou-se redução das concentrações máximas em parte da Região 1A, e em alguns trechos da Região 2A. A Região 2B mostrou o mesmo comportamento observado na estiagem anterior, já a Região 2C exibiu aumento nas concentrações, com teores entre 1,2 e 2 vezes o valor do VOR 1. Estas variações estão, possivelmente, associadas ao reflexo do transporte e acúmulo de sedimentos provenientes do intemperismo de rochas, uso do solo, e erosões marginais da bacia do rio Paraopeba. Neste período, observa-se que somente o tributário ribeirão Serra Azul (TT-04) exibiu concentrações acima do valor de referência de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, apresentando concentrações maiores que 5 vezes o VOR 1.

Figura 12.3-4 Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



■ **Cobre**

Na **Figura 12.3.1-5**, as concentrações de Cobre estão apresentadas por períodos sazonais de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

Com o rompimento da barragem, houve um incremento de Cobre no rio Paraopeba na estiagem/2019, seja por causa das contribuições provenientes do rejeito do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A em que as concentrações na Região Ferro-Carvão, maior parte da 1A e 1B, foram cerca 2 a 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, seja por causa de contribuições naturais provenientes da bacia como na Região 1B devido a presença de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima. Na Região Ferro-Carvão, houve pontualmente, presença de concentrações máximas maiores em 5 vezes o valor do VOR 1. O tributário rio Pardo (TT-08) mostrou as maiores concentrações entre os tributários, com teores maiores que 5 vezes o valor de VOR 1. Somente os tributários ribeirão Sarzedo (TT-02), rio Betim (TT-01) e rio Grande (TT-05) apresentaram concentrações máximas inferiores ao valor de VOR 1.

Na estiagem/2020, as concentrações mais elevadas foram registradas nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, que foram de 2 até 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, enquanto as regiões Montante, 2A, 2B e 2C exibiram concentrações que variaram entre 1,2 e 2 vezes o valor do VOR 1. No tocante dos tributários, somente o ribeirão Serra Azul (TT-04) exibiu concentrações superiores ao VOR 1 (até 1,2 vezes o valor do VOR 1).

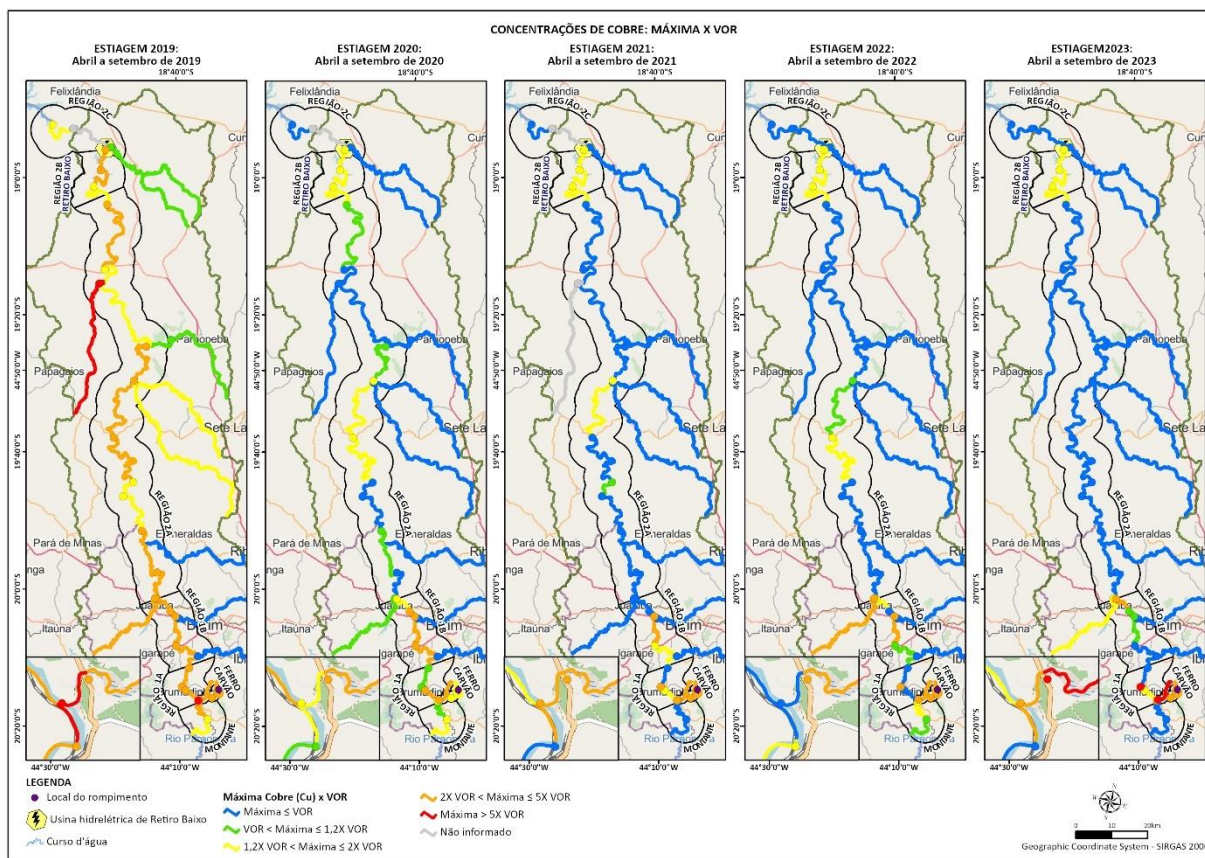
No período de estiagem/2021, observou-se que, em relação ao período anterior (estiagem/2020), houve redução das concentrações máximas de Cobre na Região Montante, que apresentou concentrações inferiores ao VOR 1, parte das regiões 1A, 1B e 2A, exibindo na maior parte das vezes, concentrações inferiores ao VOR 1. As regiões 2B e 2C mostraram o mesmo comportamento observado na estiagem anterior. Neste período, diferente do observado na estiagem anterior, nenhum tributário exibiu concentrações acima do VOR 1.

A estiagem/2022 mostrou concentrações máximas semelhantes as observadas na estiagem/2021. Os teores mais elevados foram identificados nas regiões Ferro-Carvão, pontualmente na 1A, e 1B, onde os teores máximos encontrados ficaram entre 2 e 5 vezes o valor do VOR 1. O tributário ribeirão Serra Azul, mostrou comportamento semelhante ao observado na estiagem/2019, exibindo teores entre 2 e 5 o valor do VOR 1.

Por fim, na estiagem/2023, observa-se redução das concentrações máximas na Região Montante, que não apresentou concentrações acima do VOR 1, além disso, toda a Região 2A também mostrou concentrações inferiores ao VOR 1. Por outro lado, a Região Ferro-Carvão e 1A (pontualmente) exibiram aumento dos teores, com concentrações 5 vezes maiores que o VOR 1. As regiões 2B e 2C mostraram o mesmo comportamento exibido na estiagem anterior. Em relação aos tributários, somente o ribeirão Serra Azul exibiu concentrações máximas superiores ao VOR 1 (entre 1,2 e 2 vezes o VOR 1).

Ao se avaliar a distribuição do Cobre, compreendendo os períodos de estiagem entre 2019 e 2023 (**Figura 12.3.1-5**), verificou-se que as concentrações demonstraram redução ao longo da evolução temporal e espacial, principalmente na Região 2A. Por outro lado, observou-se aumento do Cobre na Região Ferro-Carvão e pontualmente na 1A. Isso se deve provavelmente ao fato da ocorrência das intensas obras na Região Ferro-Carvão, acúmulo e sedimentação de materiais na Estaca Prancha.

Figura 12.3-5 Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



■ **Chumbo**

Na **Figura 12.3.1-6** são apresentadas as variações de Chumbo nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

No período de estiagem/2019, as concentrações de Chumbo ficaram maiores que o valor da Resolução CONAMA nº 454/2012 em trechos desde a Região Montante até a Região 2C. As regiões Montante e 1A apresentam as maiores concentrações de todo o período analisado, chegando a valores 5 vezes maiores que o valor de nível 1 (35 mg/kg), apesar de apresentarem valores máximo abaixo desse limite. Parte da Região Ferro-Carvão também possui registros máximos acima de 5 vezes o VOR 1, entretanto, predominam valores de até 1,2 vezes o VOR 1. A Região 1B registra máximas entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1. A Região 2A é a que mais apresenta variações, indo de trechos com concentrações máximas abaixo do VOR 1 até áreas que registram valores de 5 vezes o VOR 1. Na Região 2B predominam máximas abaixo do VOR 1, entretanto, há um trecho com valores entre 2 a 5 vezes o VOR 1. Já na Região 2C, predominam máximas de 2 a 5 vezes o valor de referência nível 1. O ribeirão Sarzedo (TT-02) registrou máximas maiores que 5 vezes o VOR 1. O rio Betim (TT-01) registrou máximas de até 1,2 vezes o VOR 1. Os ribeirões Serra Azul (TT-04) e Cedro (TT-07 e o rio Pardo (TT-08)

tiveram máximas entre 2 a 5 vezes o VOR 1, enquanto o rio Grande (TT-05) e ribeirão São João (TT-06) registraram máximas entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1.

As maiores concentrações identificadas na Região 1A neste período, mais que 5 vezes acima do VOR 1, possivelmente resultantes de alguma contribuição anômala local associada com a mistura de materiais com rejeito além da própria contribuição difusa de uso de solo na localidade.

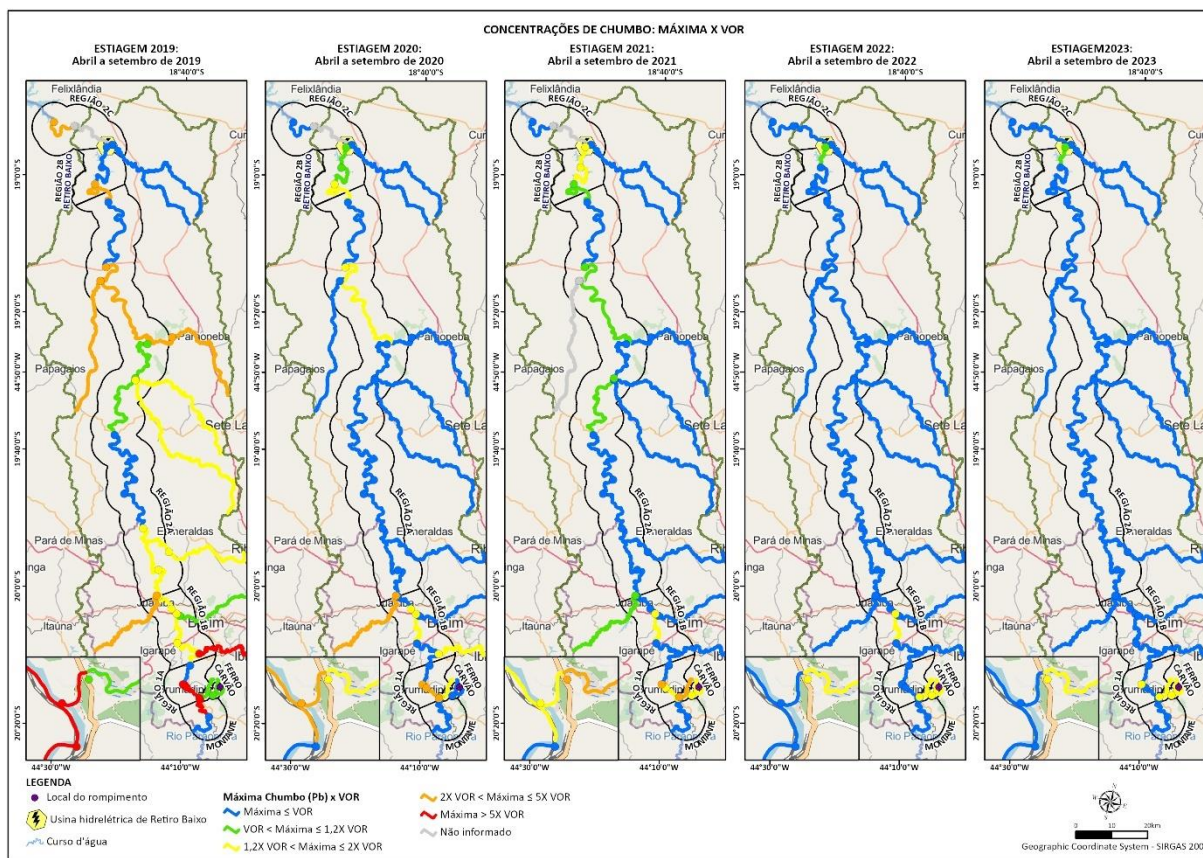
Na estiagem/2020, observou-se redução das concentrações de Chumbo em praticamente todas as regiões. As regiões Montante e 1A exibem teores até 5 vezes o valor de VOR nível 1. Na Região 2A predominam máximas abaixo do VOR 1. Na Região 2B predominam máximas entre 2 e 5 vezes o VOR 1, entretanto, há um trecho com valores abaixo do VOR 1. Por outro lado, a Região 2C mostrou redução das concentrações. Nesse período, os tributários ribeirão Sarzedo (TT-02) e Ribeirão Serra Azul (TT-04) apresentaram concentrações acima do VOR 1, indicando contribuições de chumbo provenientes da própria bacia.

Na estiagem/2022, não houve grandes variações nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. Na Região 2A, o trecho que na estiagem anterior estava com máximas de até 2 vezes o VOR 1, neste ciclo sazonal apresentou redução para concentrações máximas de até 1,2 vezes o valor de referência, incluindo um trecho a jusante desse com o mesmo intervalo de concentrações. Já na Região 2B, as concentrações máximas variam de valores desde o VOR 1 até concentrações 2 vezes maiores que valor de referência. Quanto aos tributários do rio Paraopeba, nesse ciclo sazonal, apenas o ribeirão Serra Azul (TT-04) indicou concentrações 1,2 vezes maiores que o VOR 1.

Os períodos de estiagem de 2022 e 2023 foram muito semelhantes. Em ambos, a Região Ferro-Carvão apresentou concentrações de Chumbo entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1 e valores entre o VOR 1 e 1,2 vezes o valor de referência na Região 2B. Na estiagem/2022 a Região 1B apontou máximas de até 2 vezes o VOR 1, diminuindo na estiagem/2023 até valores abaixo do limite de referência. Esse acúmulo de Chumbo pode estar associado com a granulometria do sedimento, visto que as áreas de maior retenção hidráulica, como no caso do barramento Estaca Prancha na Região Ferro-Carvão e na UTE Igarapé na Região 1B, são ambientes mais lânticos os quais contribuem para a dissipação e sedimentação de materiais finos, com consequente aumento de metais no sedimento. Em nenhum desses ciclos, os tributários do rio Paraopeba indicaram concentrações acima do VOR 1.

Adicionalmente, o Chumbo está presente no rejeito e está disseminado ao longo de toda a bacia conforme previamente observado no mapa geoquímico do Chumbo, elaborado com dados sedimentos de corrente da CPRM de 2008 e 2009 (2019). As ocorrências eventuais do Chumbo, devem ser observadas em razão das contribuições da bacia do rio Paraopeba que apresentaram concentrações associadas às características geogênicas ou antrópicas.

Figura 12.3-6 Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Arsênio**

Na **Figura 12.3.1-7** são apresentadas as variações de Arsênio nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.

As concentrações de Arsênio na estiagem/2019, sobretudo na calha do rio Paraopeba, predominaram os valores de máximas entre 2 a 5 vezes o VOR 1 da Resolução CONAMA 454/12 (5,9 mg/kg). Concentrações menores foram registradas nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 2C, as quais apresentaram valores entre 1,2 a 2 vezes maiores que os valores de nível 1. Os tributários do rio Paraopeba também apresentaram concentrações entre o VOR 1 e 1,2 vezes o VOR 1 (rio Grande, TT-05; ribeirão dos Gomes, CE-01), 1,2 até 2 vezes o VOR 1 (ribeirão do Cedro, TT-07) e de 2 a 5 vezes o VOR 1 (ribeirão Sarzedo, TT-02; ribeirão Azul, TT-04; rio Pardo, TT-08).

Na estiagem/2020, o Arsênio apresentou concentrações máximas com comportamento semelhante ao da estiagem/2019 em todas as regiões. Variações significativas ocorreram na Região 2A, em que trechos entre o rio Grande e o ribeirão do Cedro variam as concentrações máximas de valores entre 1,2 a maiores que 5 vezes o VOR 1. Em relação aos tributários, os

ribeirões Sarzedo (TT-02), Serra Azul (TT-04), São João (TT-06) e Cedro (TT-07) apresentam máximas de 1,2 a 2 vezes o VOR 1, enquanto o rio Pardo (TT-08) indica valores maiores, entre 2 a 5 vezes maiores que o valor de referência.

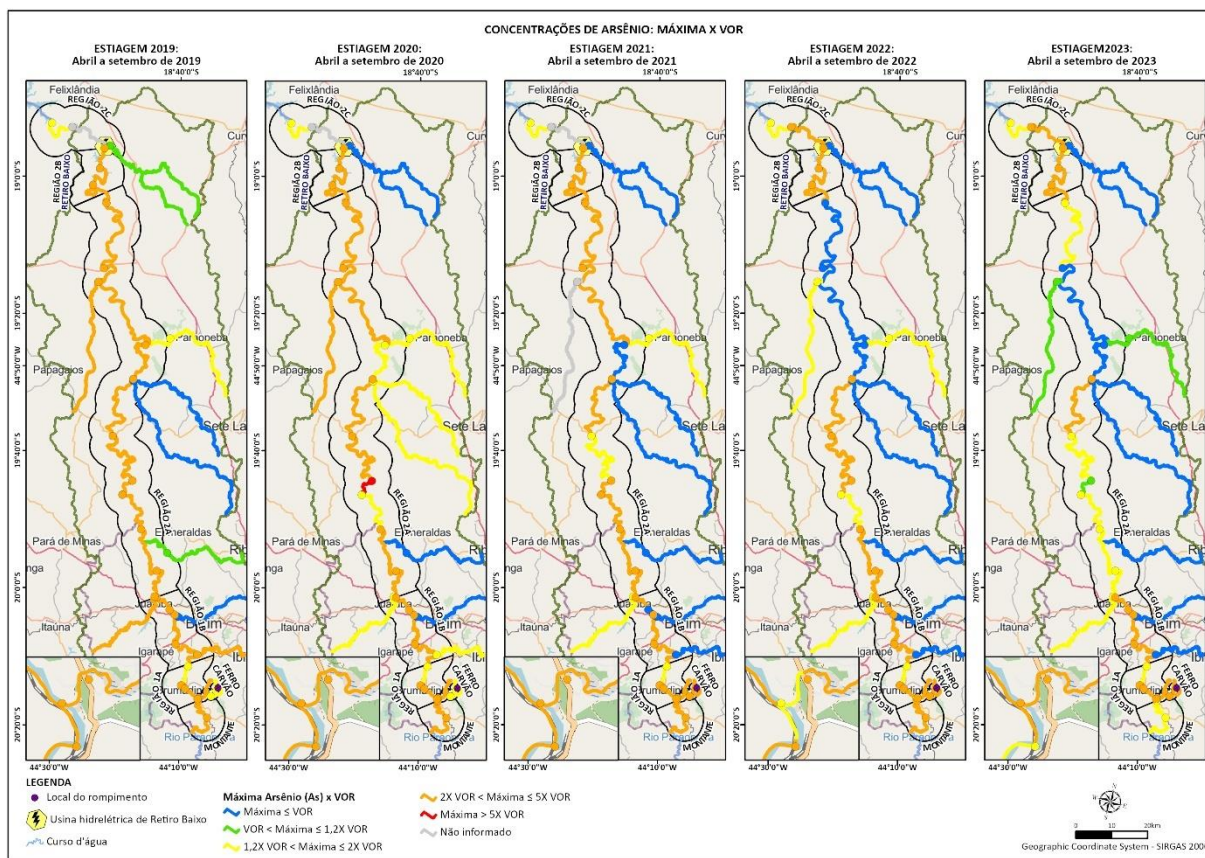
Durante a estiagem/2021, o comportamento do Arsênio foi semelhante ao da estiagem anterior (2020), exceto pela Região 2A e os tributários. Na Região 2A, predominam as concentrações máximas com valor entre 2 a 5 vezes o VOR 1, apresentando trechos com valores entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1 e também trechos com valores abaixo da CONAMA 454/12. Os tributários ribeirão Serra Azul (TT-04) e ribeirão do Cedro (TT-07) indicam máximas entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1, sendo que nos demais tributários, as concentrações são mais baixas que o VOR 1.

No período de estiagem/2022, observa-se redução das concentrações de Arsênio em alguns trechos da Região 2A, sobretudo após a confluência com o ribeirão São João até o início da Região 2B, apresentando valores abaixo do indicado pela legislação. Em relação aos tributários, observa-se redução ou manutenção das concentrações, em relação ao período anterior, exceto o rio Pardo que indica máximas de 1,2 a 2 vezes o valor do nível de referência 1.

Na estiagem/2023, nota-se que variação nos teores de Arsênio na Região Montante apontou redução. A Região 2A segue com alguns trechos apresentando redução, e outros, aumento, em relação ao período anterior. As demais regiões apresentam comportamento semelhante ao da estiagem/2022, incluindo o ribeirão Serra Azul (TT-04). Já o ribeirão do Cedro (TT-07) e rio Pardo (TT-08) apontam redução para valores desde o VOR 1 até 11,2 vezes o valor de referência.

Este comportamento do Arsênio com concentrações semelhantes ao longo dos períodos sazonais, sugere que o elemento é característico da bacia, haja vista sua disponibilidade e persistência em concentrações semelhantes no tempo e no espaço, podendo estar associado ao transporte de sedimentos do Supergrupo Rio das Velhas (Grupo Nova Lima) e Supergrupo Minas (Formação Cauê), além de contribuições antrópicas como associada a extração de areia no rio Paraopeba, minerações e outros uso e ocupação do solo. Na região do ribeirão Ferro-Carvão, o aumento do Arsênio (em relação a 2019) foi consequência das ações de engenharia para contenção de rejeitos e represamento da água do ribeirão que permitiu a decantação e acúmulo de sedimentos finos na lagoa de contenção e, por consequência ocasionou o enriquecimento do Arsênio nos sedimentos finos acumulados nesta área, sedimentos estes provenientes de intemperismos de rochas e solos do Grupo Nova Lima.

Figura 12.3-7 Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Cromo**

Os mapas de distribuição espacial do Cromo por períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 estão na **Figura 12.3.1-8**. De modo geral, observou-se semelhança na distribuição espacial do Cromo na bacia do rio Paraopeba entre os períodos de estiagem analisados, com a maioria das regiões apontando máximas acima do VOR 1 (37,3 mg/kg).

Na estiagem/2019, as concentrações de Cromo acima do valor da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram registradas ao longo de toda a bacia, tanto no curso do rio Paraopeba quanto em seus tributários. Na Região Montante, em toda sua extensão, as máximas se concentram no intervalo de 2 a 5 vezes o VOR 1. Na Região Ferro-Carvão, as máximas atingem valores até 1,2 vezes o VOR 1 e depois aumentam em até 2 vezes o valor de referência nível 1. O início da Região 1A até a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão apresenta concentrações no intervalo de 1,2 a 2 vezes o VOR, após a confluência, as máximas vão do VOR até valores 1,2 vezes maior que este. Pontualmente, a Região 1A indica concentrações 2 a 5 vezes o VOR 1, enquanto no final da região até parte da Região 1B, as máximas são menos elevadas, de 1,2 a 2 vezes o VOR. No final da Região 1B as máximas voltam a aumentar de 2 a 5 vezes o VOR. O início da Região 2A indica concentrações máximas mais elevadas que 5 vezes o VOR,

porém nessa região, predominam concentrações de 2 a 5 vezes o VOR, condições semelhantes a Região 2B. Na Região 2C as concentrações diminuem para o intervalo de 1,2 a 2 vezes o VOR.

Quanto aos tributários do rio Paraopeba na estiagem/2019, o ribeirão Sarzedo (TT-02), ribeirão Serra Azul (TT-04), rio Grande (TT-05), ribeirão São João (TT-06) e ribeirão do Cedro (TT-07) apresentaram concentrações máximas oscilando de 2 a 5 vezes o VOR 1. Enquanto o rio Pardo (TT-08) indicou as maiores concentrações máximas, atingindo valores maiores que 5 vezes o VOR 1.

Comparando-se a estiagem/2020 com a anterior (2019), percebe-se que as concentrações da Região Montante se mantiveram. A Região Ferro-Carvão apresentou elevação das máximas no trecho inicial com concentrações entre 1,2 a 2 vezes acima da Resolução CONAMA 454/12. Tal aumento pode ser reflexo da contenção hidráulica (Estaca Prancha) na Região Ferro-Carvão finalizada em setembro/2019 que permitiu a retenção de sedimentos na bacia de contenção instalada. O início da Região 1A, a partir da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, também indicou aumento das concentrações máximas, com valores de 1,2 a 2 vezes o VOR 1, seguido por redução até o início da Região 1B. Na Região 1B, predominam as concentrações máximas com valores de 1,2 a 2 vezes o VOR 1. Na parte central, de Igarapé até a confluência com o rio Betim, as concentrações aumentam para 2 a 5 vezes o VOR 1, provavelmente relacionados aos pontos de contenção existentes na área que favorecem o acúmulo de sedimentos. A Região 2A apresenta concentrações que oscilam desde 1,2 vezes o VOR 1 até valores maiores que 5 vezes o VOR 1. Em geral, essas concentrações parecem estar relacionadas a influência dos tributários dessa região. A parte que alcança máximas acima de 5 vezes o VOR 1 pode estar relacionada a sedimentos advindos da lixiviação de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima, presente na margem esquerda do rio Paraopeba ou até mesmo consequência de erosão marginal. Na Região 2A, ainda o uso e ocupação do solo aliado ao transporte de materiais provenientes de regiões a montante dela, erosões marginais como reflexo do aumento das vazões dos rios e escoamento direto de locais mais desmatados contribuíram para o aumento dessas substâncias. As regiões 2B e 2C mantiveram concentrações maiores que a referência da Resolução CONAMA 454/12, como no período anterior.

Quanto aos tributários do rio Paraopeba na estiagem/2020, o ribeirão Sarzedo (TT-02) e o ribeirão São João (TT-06) diminuíram as máximas até valores abaixo do valor de referência de nível 1. O ribeirão Serra Azul (TT-04) e o rio Grande (TT-05) mantiveram as concentrações em relação a 2019. O ribeirão do Cedro (TT-07) e o rio Pardo (TT-08) apresentaram reduções das concentrações máximas, entretanto, ainda acima da referência da Resolução CONAMA 454/12. O ribeirão dos Gomes (CE-01) indicou aumento das máximas com valores até 1,2 vezes o VOR 1.

Na estiagem/2021, em geral, há manutenção ou redução das concentrações máximas ao longo da bacia. Houve manutenção das máximas no início da Região Montante e diminuição do meio até o encontro com a Região 1A para concentrações entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1. A Região

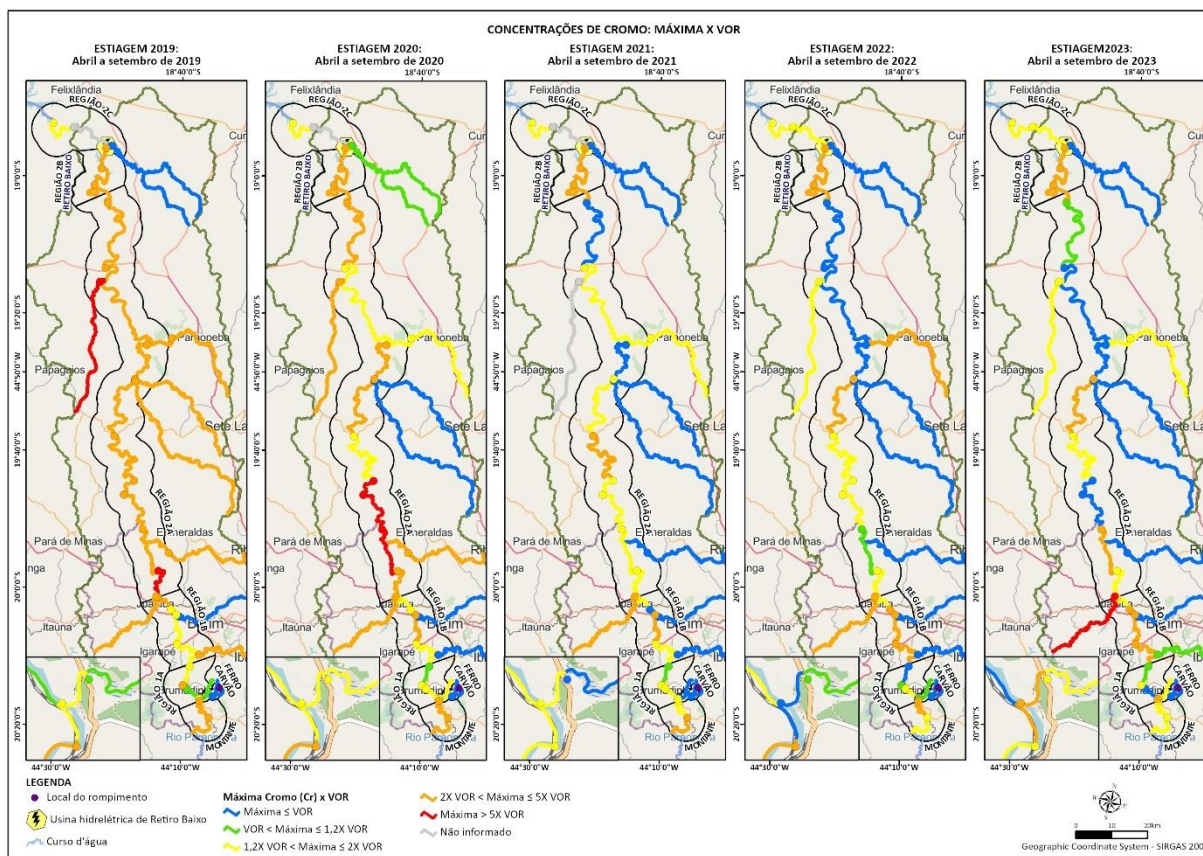
Ferro-Carvão diminuiu as máximas, não obtendo registros de concentrações acima do VOR 1. As regiões 1A e 1B não mudaram os intervalos de máximas quando comparadas a estiagem/2020. A Região 2A foi a que apresentou maiores variações. No trecho em que anteriormente havia concentrações acima de 5 vezes o VOR 1, nesse ciclo as concentrações estão entre 1,2 e 2 vezes o VOR 1. Em outros trechos, as concentrações máximas são menores que o limite da Resolução CONAMA 454/12. As regiões 2B e 2C mantiveram o intervalo da estiagem anterior. Quanto aos tributários do rio Paraopeba na estiagem/2021, o ribeirão Serra Azul (TT-04) e o ribeirão do Cedro (TT-07) indicam, respectivamente, valores de máximas entre 2 a 5 vezes o VOR 1 e 1,2 a 2 vezes o VOR 1. Os demais tributários possuem concentrações abaixo do valor de referência.

Em geral, na estiagem/2022 a tendência é de diminuição das máximas ao longo do rio Paraopeba. Na Região Montante, as concentrações oscilam de 1,2 a 5 vezes o VOR 1. Há aumento das máximas na Região Ferro-Carvão com concentrações máximas indo de 37,3 mg/kg até 1,2 vezes esse valor. Na Região 1A as concentrações oscilam entre menores que o VOR 1 até 2 vezes ele. A Região 1B apresenta elevação desse o encontro com a região anterior até a confluência com o ribeirão Sarzedo. Parte da Região 2A apresenta concentrações máximas que oscilam entre o VOR 1 até 5 vezes o valor de referência, sendo que a partir da confluência com o ribeirão São João, as concentrações estão abaixo do VOR 1 até o início da Região 2B, a qual mantém as máximas do ciclo anterior. Na Região 2C as máximas estão no intervalo entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1. O ribeirão Serra Azul (TT-04) e o ribeirão do Cedro (TT-07) registram valores máximos entre 2 e 5 vezes o VOR 1, enquanto o rio Pardo (TT-08) apresenta máximas menores, de 1,2 a 2 vezes o valor de referência.

Na estiagem/2023, nas regiões Montante e Ferro-Carvão predominam as concentrações máximas entre 1,2 e 2 vezes o VOR 1. Na Região 1A, as máximas oscilam entre valores abaixo do VOR 1 até 2 vezes o valor da CONAMA 454/12. Na Região 1 B há manutenção dos valores da estiagem anterior (2022). A Região 2A mostram trechos com variadas concentrações máximas, indo desde valores abaixo do VOR até valores 5 vezes maior que o valor de CONAMA 454/12. As regiões 2B e 2C mantiveram a concentração da estiagem anterior. O ribeirão Sarzedo (TT-02) indica concentrações variando entre o VOR 1 até 1,2 o VOR. As maiores concentrações da estiagem/2023 foram registradas no ribeirão Serra Azul, atingindo valores de até 5 vezes mais elevados que o VOR 1. Já o ribeirão do Cedro (TT-07) e o rio Pardo (TT-08) apresentam máximas no intervalo entre 1,2 a 2 vezes o valor de referência.

A distribuição espacial do Cromo nos períodos de estiagem analisados, também corrobora com o comportamento observado e que demonstra características da própria bacia, uma vez que as concentrações, mesmo atenuadas, permanecem acima da Resolução CONAMA nº 454/2012 em toda bacia, incluindo nos tributários.

Figura 12.3-8 Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Cádmio**

O Cádmio foi constatado em concentrações abaixo do limite de quantificação em 99% das amostras de sedimentos avaliadas no rio Paraopeba no período de chuva de 2019 (considerando os meses de janeiro a março), quando houve o rompimento da barragem. A única ocorrência constatada acima dessa métrica, neste período, foi de uma amostra no PT-55 localizada em Curvelo, estando cerca de 250 km a jusante da barragem B1. No rejeito, as concentrações medianas foram de 0,2 mg/kg e algumas poucas amostras apresentaram valores acima de 1 mg/kg até 1,8 mg/kg (GEOENVIRON, 2019), indicando baixas concentrações no rejeito.

A Arcadis realizou uma avaliação técnica de todos os resultados de Cádmio em sedimentos de corrente, validados pela SGS Geosol, do período de 25/01/2019 a 16/03/2021. Para o programa PME foram reprocessadas 1951 amostras, que foram lidas no comprimento de onda 228 nm no espectrômetro ICP-OES. Os resultados desse reprocessamento mostraram que 84,7% dos resultados avaliados no PME, ficaram abaixo do valor orientador da Resolução CONAMA nº 454/2012 nível 1 (0,6 mg/kg), 14,2 % ficaram acima desta referência, sendo esses estão concentrados em pontos próximos ou jusante de Três Marias (PT-22, PT-25, PT-30 a PT-39,

PT-44 a PT-46) e 1,1 % em outros pontos, mas sem persistência. Dessas amostras que apresentaram valores acima da Resolução CONAMA 454/12, 18 foram apresentadas com resultado impreciso, pois não puderam ser reprocessadas pela SGS devido ao fato dos arquivos estarem corrompidos, e se mantiveram com concentrações acima desta referência, além de outras situações específicas (Arcadis, 2022b).

Em síntese, na avaliação dos resultados de Cádmio para os períodos sazonais desde o início do monitoramento, constatou-se que sua ocorrência foi predominantemente abaixo do valor de referência de nível 1, da Resolução CONAMA 454 (0,6 mg/kg) em todas as regiões (Arcadis, 2022b). Isso posto, constatou-se que os rejeitos das barragens B1, B4, B4A não impactaram a qualidade dos sedimentos com respeito ao Cádmio ao longo do rio Paraopeba, visto que a maioria dos resultados reprocessados indicaram valores menores que a referência adotada. Resultados persistentes foram confirmados a jusante da UHE Três Marias, porém, sua ocorrência pode estar associada com outros fatores não associados ao rompimento da barragem B1.

Os mapas de distribuição espacial do Cádmio por períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 estão na **Figura 12.3.1-9**.

Na estiagem/2019 foram constatados valores acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 em todas as regiões, com exceção da Região 2B. Na calha do rio Paraopeba, as concentrações oscilam, no geral, em até 2 vezes acima da referência, sendo que na Região Montante, os valores são menores, porém ainda com desvios de até 1,2 vezes o VOR 1. Tais valores elevados são, provavelmente, associados ao uso do solo local e obras próximas a área do rompimento. Quanto aos tributários, o ribeirão Sarzedo (TT-02) foi o que apresentou as concentrações mais elevadas de Cádmio ao longo de todo histórico, alcançando valores maiores que 5 vezes o VOR 1. No ribeirão Serra Azul (TT-04), as concentrações de Cádmio ficam entre 2 e 5 vezes o valor de referência, enquanto no rio Betim (TT-01), rio Grande (TT-05), ribeirão São João (TT-06), ribeirão do Cedro (TT-07) e no rio Pardo (TT-08), as concentrações oscilam de 1,2 a 2 vezes o VOR 1.

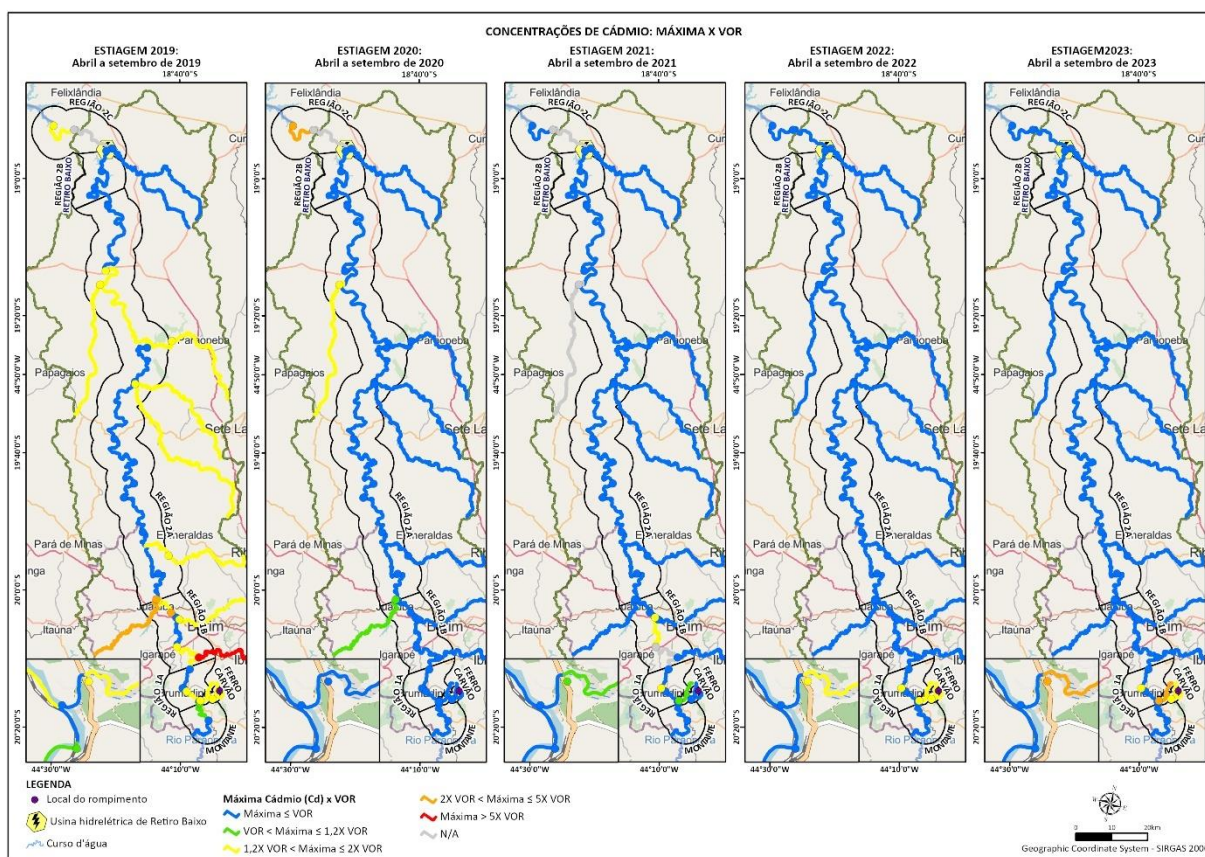
Na estiagem/2020, observa-se redução de Cádmio ao longo de toda a extensão do rio Paraopeba, exceto pelo final da Região 2C que apresentou aumento das concentrações para valores entre 2 e 5 vezes mais elevadas que o VOR 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012, provavelmente ocasionado por contribuições locais e difusas da área. O ribeirão Serra Azul (TT-04) apresentou valores mais baixos quando comparados a estiagem anterior, entretanto, ainda com valores acima do valor de referência de nível 1 até valores 1,2 vezes maiores. Já o rio Pardo (TT-08) manteve o intervalo de máxima em relação a estiagem/2019.

Na estiagem/2021, as concentrações de Cádmio apresentam aumento na Região Ferro-Carvão, com valores de até 1,2 vezes o VOR 1. Além disso, pontualmente na Região 1A e ao longo da Região 1B, as concentrações máximas atingiram o intervalo de 1,2 e 2 vezes o valor de referência nível 1.

Na estiagem/2022, assim como na estiagem/2023, observa-se aumento das concentrações na Região Ferro-Carvão apresentando concentrações acima do VOR 1, de 1,2 a 2 vezes acima do valor da referência em 2019 e de 2 a 5 vezes em 2023. Em ambos os períodos sazonais a Região 1A apresentou desvio pontual em relação ao VOR 1, com máxima entre 1,2 a 2 vezes o VOR 1.

Em relação a consistência das concentrações máximas elevadas de Cádmio na Região Ferro-Carvão, tal ocorrência pode estar associada ao acúmulo de sedimentos finos na área os quais retêm os metais, bem como contribuições de processos antrópicos e da lixiviação do solo.

Figura 12.3-9 Evolução do Cádmio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023



▪ **Fósforo**

Os mapas de distribuição espacial do Fósforo por períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 estão na **Figura 12.3.1-10**. Durante todos os períodos de estiagem analisados, observou-se semelhança na distribuição deste parâmetro ao longo da bacia do rio Paraopeba e que esteve predominantemente com valores abaixo da Resolução CONAMA 454/12. Percebeu-se com isso que o rompimento da barragem não contribuiu para aumentar as concentrações de Fósforo no rio Paraopeba.

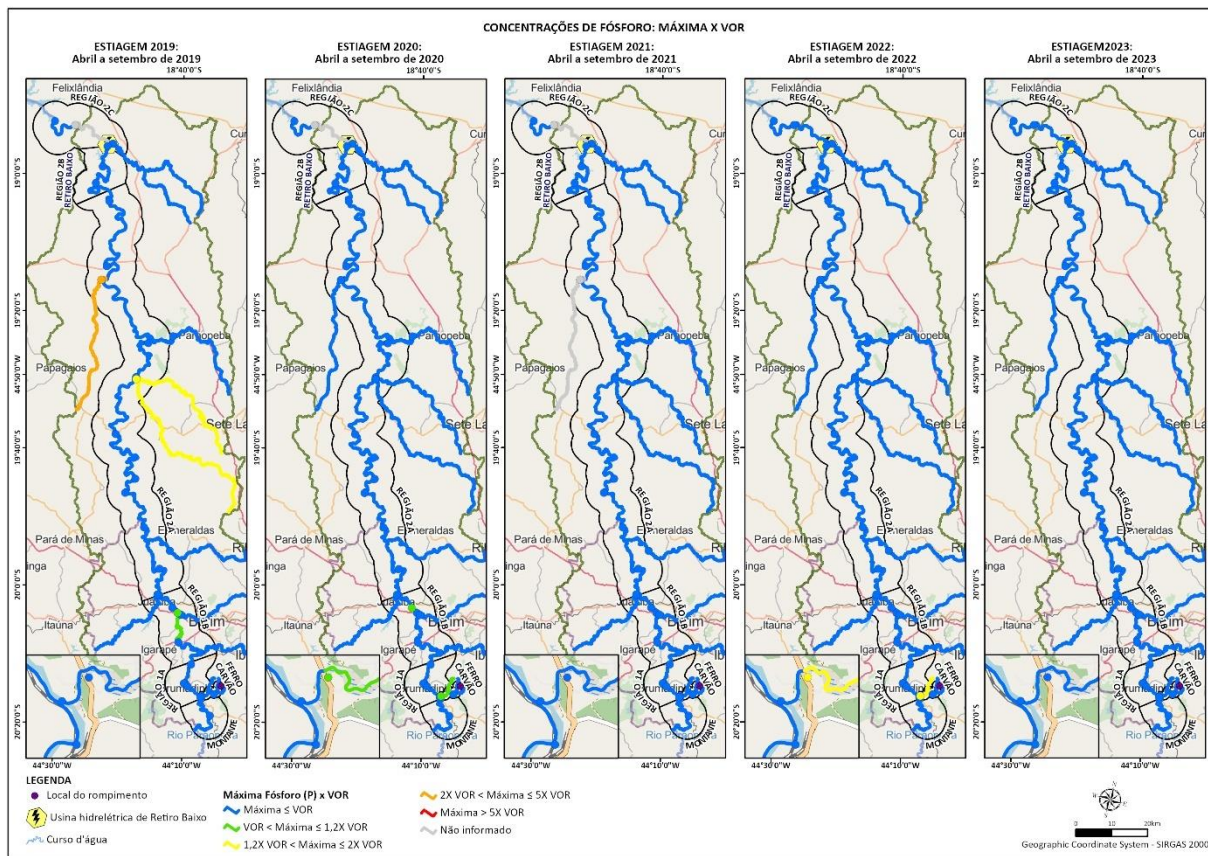
Ao longo da estiagem/2019, concentrações acima do VOR (2000 mg/kg) foram observadas na Região 1B, atingindo valores de até 1,2 vezes acima do valor de CONAMA 454/12.

Já no Ribeirão São João (TT-06), as concentrações registradas foram de 1,2 a 2 vezes o VOR, enquanto no Rio Pardo (TT-08), as concentrações máximas ficaram no intervalo de 2 a 5 vezes maiores que o VOR. Tais valores se dissiparam não sendo identificados em outros trechos do rio Paraopeba e nem em eventos posteriores, indicando que, o Fósforo, quando presente no sedimento, está associado a uso e ocupações locais antrópicos e apesar de sua presença em minerais como apatita, sua contribuição é limitada.

Durante a estiagem/2020, a Região Ferro-Carvão apresentou concentrações de Fósforo elevadas, com registros acima do VOR até 1,2 vezes maior que ele. As concentrações máximas na Região 1B diminuíram para valores pontuais de desvios, predominando teores abaixo do VOR. Já em relação aos tributários, nenhum apresentou concentrações acima do VOR.

Ao longo das estiagens de 2021, 2022 e 2023 não houve concentrações acima do VOR em nenhuma região do rio Paraopeba e nem nos tributários. Exceção se dá para a estiagem/2022 na Região Ferro-Carvão, em que os valores de Fósforo são elevados com teores entre 1,2 a 2 vezes o VOR.

Figura 12.312.3-10 Evolução do Fósforo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.



▪ **Zinco**

Os mapas de distribuição espacial do Zinco por períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023 estão na **Figura 12.3.1-11**. Observou-se semelhança na distribuição deste parâmetro ao longo da bacia do rio Paraopeba, exceto pela estiagem/2019 em que indica valores elevados nos rios tributários e no ribeirão Ferro-Carvão.

Notou-se que, na estiagem/2019, apenas as regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2C apresentaram concentrações máximas acima do VOR 1 (123 mg/kg) de Vicq (2015), alcançando máximas de até 2 vezes o valor da CONAMA 454/12. Notou-se que o desvio registrado na Região 1B foi pontual. Em relação aos tributários, os ribeirões Sarzedo (TT-02), Serra Azul (TT-04) e São João (TT-06) indicaram concentrações de Zinco de 2 a 5 vezes o VOR 1. Já os rios Betim (TT-01) e Grande (TT-05) apresentam concentrações elevadas de 1,2 a 2 vezes o VOR. O rio Pardo indicou a maior concentração de Zinco em todo o histórico analisado, atingindo concentrações máximas maiores que 5 vezes o valor de referência para esse analito.

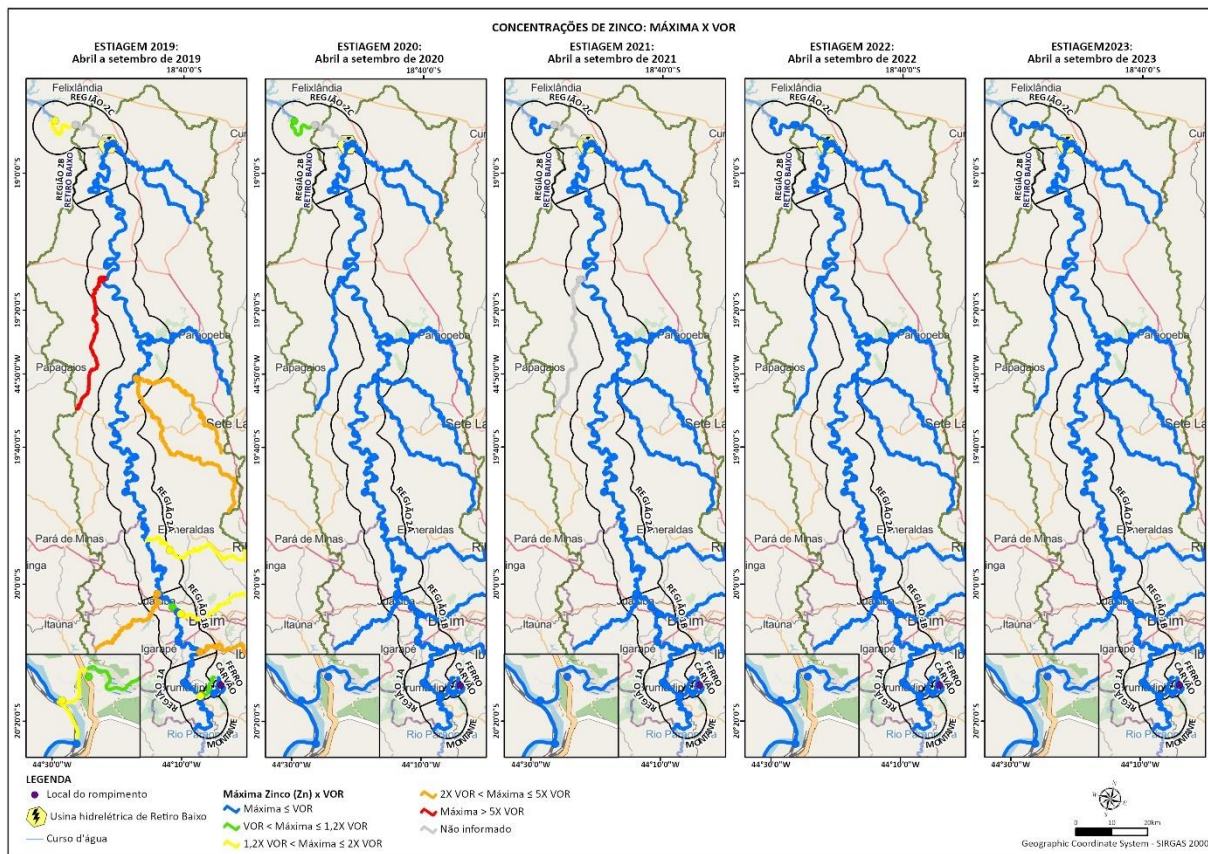
Durante a estiagem/2020, as concentrações máximas nessas regiões diminuíram para valores abaixo do VOR 1. Entretanto, na Região 2C, apesar da diminuição das concentrações

máximas, os valores ainda se encontram acima do VOR, com valores até 1,2 vezes acima da referência. É notável a diminuição das concentrações ao longo de todos os tributários quando comparados à estiagem/2019, não havendo desvios do VOR em nenhum deles.

Ao longo das estiagens de 2021, 2022 e 2023 não há concentrações acima do VOR 1 em nenhuma região do rio Paraopeba e nem nos tributários.

As concentrações de Zinco estão associadas diretamente com o uso do solo e à sua disposição na bacia do rio Paraopeba. Com exceção da Região Ferro-Carvão na estiagem/2019, os locais em que o metal apareceu nos sedimentos com desvios no valor de referência foram distantes da área fonte do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, não possuindo associação direta com os rejeitos delas.

Figura 12.312.3-11 Evolução do Zinco nos sedimentos nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021, estiagem/2022 e estiagem/2023.



12.4. Considerações

Para a comparação dos percentuais de desvios em relação aos valores orientadores, no período de estiagem/2023, constatou-se que as regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2B são as regiões que apresentaram as maiores persistências de elementos em concentrações acima dos valores de referência utilizados neste documento. No período de estiagem em análise, manganês e alumínio ultrapassaram os valores de Vicq (2015) e Arsênio, Cádmiio, Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel e Zinco ultrapassaram os valores de nível 1 (VOR 1) da Resolução CONAMA nº 454/2012. Em relação ao valor do nível 2 da mesma Resolução, ocorreram desvios para Arsênio nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B, Cádmiio na Região 3, cromo nas regiões 1B e 2B, Cobre na Região Ferro-Carvão, Níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C, e Zinco na Região 3.

Os pontos localizados entre PT-11 (Ferro-Carvão) e Região 1B estão localizados nas regiões mais afetadas pelos rejeitos provenientes do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A sendo que é neste intervalo que ocorreram os maiores aumentos de Manganês no período de 2019 e ainda até o período atual. Destaca-se que, dentre esses pontos, o PT-11, PT-12, PT-13, PT-02 e PT-48 foram os que apresentaram maiores percentuais de concentrações acima do valor de Vicq (2015).

As amostras coletadas nos pontos da Região 2B (Reservatório da UHE Retiro Baixo) possuem predomínio das frações finas (silte e argila), no entanto, há ausência de concentrações de Ferro e Manganês acima do valor proposto por Vicq (2015). Por outro lado, observou-se que nesses locais ocorreram concentrações de Alumínio (Al) acima do valor proposto por Vicq (2015). Neste caso, é coerente interpretar que essas concentrações mais elevadas de Al possuem relação com os sedimentos naturais da bacia provenientes de intemperismos de rochas da Formação Serra de Santa Helena, composta por minerais e argilominerais ricos em Al, além do uso do solo na bacia e outros litotipos. Ademais, esses pontos, no reservatório da UHE Retiro Baixo, estão em ambiente propício à deposição de materiais carregados de montante, servindo como área de acúmulo de materiais sedimentáveis provenientes da bacia. Isto justifica o fato de que o As, Cr, Ni também apresentem percentuais em desacordo aos valores aplicados para comparação nessa região.

No comparativo entre as estiagens de 2019, 2020, 2021, 2022, e 2023, foi observado que os parâmetros que apresentaram elevação nos percentuais em relação ao nível 1 para a estiagem atual (2023) foram: Arsênio (regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B), Chumbo (Região Ferro-Carvão), Cobre (regiões Ferro-Carvão e 2D), Cromo (regiões 1A, 1B, 2B, 2C e 3) e Níquel (regiões Ferro-Carvão e 2C). Para o nível 2, o Níquel apresentou elevação entre as estiagens monitoradas (Região Ferro-Carvão). Os demais parâmetros apresentaram manutenção dos percentuais, com pequenas oscilações.

Ao se avaliar a evolução dos sedimentos no tempo e no espaço constatou-se que as concentrações da maioria dos metais prioritários e traço vem reduzindo na maior parte das regiões monitoradas, condição que se manteve na estiagem/2023. As concentrações mais elevadas dos metais majoritários (Fe, Al e Mn) e dos elementos traço, apresentam nas regiões,

comportamentos que ao longo do monitoramento, tendem a serem característicos de cada uma das regiões, mas nas regiões afetadas pelo rejeito (Ferro-Carvão, 1A, 1B), ainda se observa a interferência deste, principalmente, para Manganês.

13. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Índices químicos composicionais, classificação proposta por Geoenviron (2023)

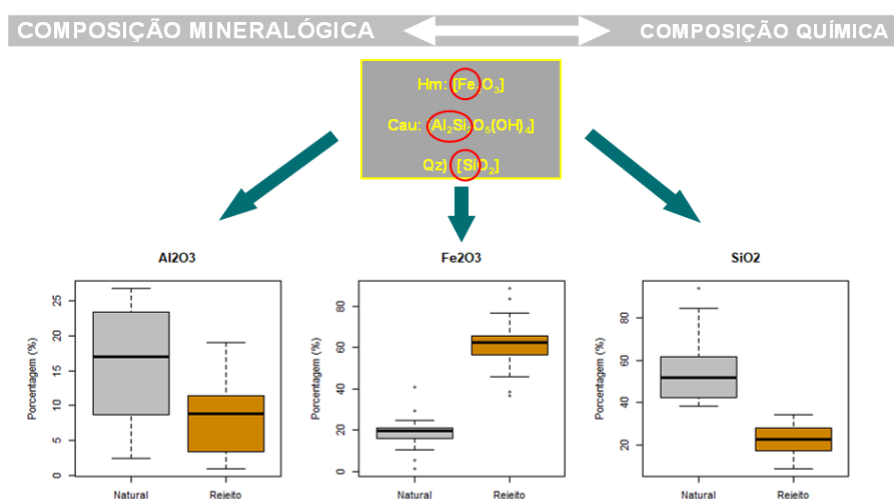
13.1. Objetivo

O objetivo da avaliação da evolução da composição química dos sedimentos ao longo do período de estiagem/2023 foi verificar se houve mudanças na distribuição dos sedimentos com características químicas de rejeitos ao longo do rio Paraopeba ao se comparar com os ciclos sazonais anteriores, embasado no novo critério de enquadramento das amostras a partir dos índices composicionais propostos por Geoenviron (2023).

13.2. Metodologia

Com base na análise dos testemunhos de sondagens dos sedimentos do rio Paraopeba realizados por Arcadis (2020c; 2021b) foi realizada a caracterização mineralógica e química dos rejeitos e sua separação dos sedimentos naturais. A mineralogia dos rejeitos das barragens B1, B4 e B4A é constituída essencialmente por hematita e quartzo e, secundariamente, por caulinita e gibbsita. Neste contexto, a composição química desses minerais é representada, respectivamente, por óxidos de ferro, sílica e alumínio (**Figura 13.2-1**).

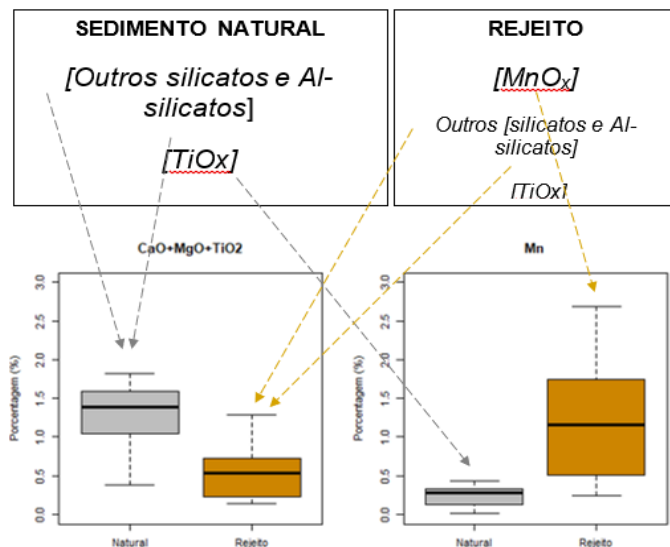
Figura 13.2-1 Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, contendo as porcentagens de ocorrência de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 nos rejeitos e sedimentos naturais



Fonte: Arcadis (2020a).

O Manganês é um constituinte minoritário em relação a composição química principal do rejeito, mas é relativamente elevado em relação aos elementos minoritários básicos como Ca, K, Mg, Ti (**Figura 13.2-2**).

Figura 13.2-2 Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis (2020a)



Fonte: Arcadis, 2020a.

A análise com os testemunhos de sondagem (ARCADIS, 2020c; 2021b) diferenciou os locais com presença de rejeitos dos locais com presença de sedimentos naturais avaliados com o método de Fluorescência de raios X (XRF). Com base nos resultados das características químicas de rejeitos e sedimentos desses pontos, efetuou-se a análise dos sedimentos de corrente com o uso do XRF para verificar as características composicionais químicas dos sedimentos através dos índices químicos composicionais IRS 1 e IRS 2 (ARCADIS, 2020a), a saber:

- $IRS1 = [Fe] / \{ [Fe] + [Al] + [Si] \}$
- $IRS2 = [Mn] / \{ [Mn] + [Ti] + [Ca] + [Mg] + [Na] + [K] \}$

A aplicação dos balizadores utilizou dados do período de estiagem/2019, onde foram separados os locais com predominância de rejeitos dos materiais com predominância de sedimentos naturais ao longo da bacia do Paraopeba, desde a Região Montante, avançando até o ponto PT-23, na Região 2D, inserido no reservatório de Três Marias.

A Região Montante, não afetada pelos rejeitos das barragens, apresentou índices maiores que as regiões 2B e 2C, porém tanto a Região Montante como as regiões 2B e 2C apresentaram valores dos índices composicionais químicos muito baixos e foram interpretados com características químicas de sedimentos naturais, não afetados por rejeito. Com isso, os

resultados dos balizadores corresponderam a 0,10 e 0,14, respectivamente, para IRS1 e IRS2, limitando a característica composicional de sedimento com característica química natural no quadrante inferior esquerdo. Detalhes dessa análise podem ser encontrados nos relatórios de Fechamento de Ciclo do período de janeiro/2019 a setembro/2020 (ARCADIS, 2020a) e Fechamento de Ciclo do período de janeiro/2019 a março/2021 (ARCADIS, 2021c).

O relatório técnico “Revisão do *fingerprint* geoquímico de rejeitos (IRS1 e IRS2) considerando misturas de rejeitos e sedimentos” (GEOENVIRON, 2023) apresenta os resultados da revisão do *Fingerprint* Geoquímico de Rejeitos (IRS1 e IRS2), considerando misturas de rejeitos e, visando avaliar as respostas químicas/físicas da mistura entre rejeitos e sedimentos naturais do rio Paraopeba, considerando diversos graus de mistura entre essas matrizes. Esse estudo visou avaliar também como as misturas, considerando diferentes percentuais de rejeitos conhecidos, se comportariam em relação ao diagrama dos índices composicionais (IRS1 e IRS2) que vem sendo utilizado nas distinções entre rejeitos e sedimentos naturais e, assim, propor ajustes na proposição gráfica utilizada nos estudos Arcadis.

Esse estudo realizou a mistura de amostras de rejeitos coletadas dentro da barragem B1 com amostras de sedimentos naturais coletadas a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. As amostras de sedimentos com características químicas naturais foram misturadas com uma amostra composta de rejeitos originais da barragem B1, resultando em amostras com diferentes proporções de rejeitos (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90 e 100%). A partir dessas amostras, buscou-se identificar o percentual de mistura de rejeito possível de ser diferenciado de amostras de matrizes ambientais não afetadas, avaliando, em conjunto, a utilização dos índices composicionais criados para auxiliar na distinção destas matrizes.

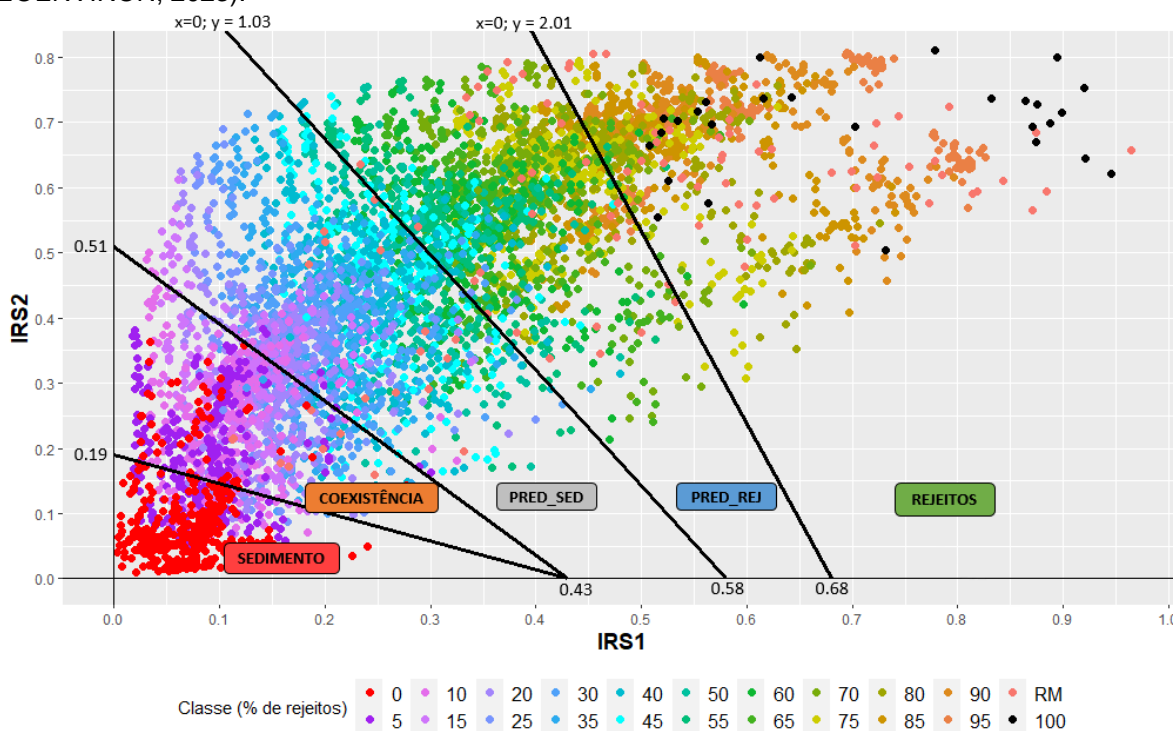
Visando delimitar os campos de domínios de rejeitos e ou sedimentos no diagrama de IRS, foi realizada modelagem computacional no estudo, contendo simulação de outras classes de mistura. Nessa avaliação, foram considerados novos conjuntos de amostras com características químicas de sedimentos naturais, e que foram misturadas computacionalmente àquelas amostras de rejeito do estudo de mistura (6 amostras individuais e o *blend* delas) via MATLAB.

A proposta adota quatro linhas divisórias diagonais, que dividem o gráfico de dispersão em cinco áreas (**Figura 13.2-3**). Essa divisão foi baseada no modelo da Análise Discriminante. A descrição dos grupos é realizada a seguir:

- Área de sedimentos naturais (**Grupo 1**): abrange amostras de sedimentos naturais, separando o máximo possível essas amostras das amostras com algum percentual de mistura com rejeito;
- Área de coexistência (**Grupo 2**): área onde coabitam amostras de sedimentos naturalmente enriquecidos em Fe (ou Mn) e amostras com baixa proporção de rejeitos;

- Área de misturas com predomínio de sedimentos (**Grupo 3**): abrange uma região onde basicamente estão amostras misturadas com predomínio composicional de sedimentos em sua composição (50% ou mais);
- Área de misturas com predomínio de rejeitos (**Grupo 4**): abrange amostras com 50% ou mais de rejeitos em sua composição;
- Área de rejeitos originais (**Grupo 5**): abrange amostras de rejeitos basicamente com características originais ou com pequeno grau de mistura com sedimentos.

Figura 13.2-3 Proposta de separação dos campos composicionais por meio de linhas diagonais (GEOENVIRON, 2023).



Fonte: Geoenviron (2023).

A proposta de classificação de sedimentos de corrente a partir dos índices químicos composicionais antecessora separava, de forma conservadora, os sedimentos com características químicas naturais dos com característica química de rejeitos. Os campos que não se adequavam a estes dois grupos foram interpretados como transitórios a partir das variações de um dos dois índices IRS. A aplicação da proposta da Geoenviron (2023), apresenta a classificação em cinco classes distintas, foi empregada para o monitoramento histórico dos sedimentos de corrente com o intuito de verificar o comportamento destas classes intermediárias com diferentes graus de mistura.

13.3. Análise dos resultados

13.3.1. Avaliação por período sazonal

A avaliação desse item contempla o histórico de todos os períodos sazonais de chuva e estiagem até o ciclo de estiagem/2023, a partir do enquadramento das amostras com os índices composicionais IRS1 e IRS2 propostos por Geoenviron (2023). Desta forma é possível estabelecer uma evolução dos resultados de IRS1 e IRS2 ao longo do tempo. De modo a verificar a evolução dos resultados, por período sazonal, aplicou-se os índices químicos composicionais em relação ao P95, onde avaliam-se as características dos sedimentos nos pontos analisados das regiões Montante, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C, tributários do rio Paraopeba e pontos localizados na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Os tributários do rio Paraopeba são rio manso (TT-03); ribeirão Sarzedo (TT-02); rio Betim (TT-01); rio Grande (TT-05); ribeirão Serra Azul (TT-04); ribeirão São João (TT-06); ribeirão do Cedro (TT-07); rio Pardo (TT-08); ribeirão dos Gomes (CE-01), ribeirão Casa Branca (PASU-07 e PT-07) e ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), sendo este que recebeu a maior carga dos rejeitos da barragem. Os tributários da bacia do Ferro-Carvão são o córrego Samambaia (PT-10); ribeirão Ferro-Carvão (PT-59); córrego Olaria (PT-60); córrego Laranjeira (PT-61) e córrego Tijuco (PT-62).

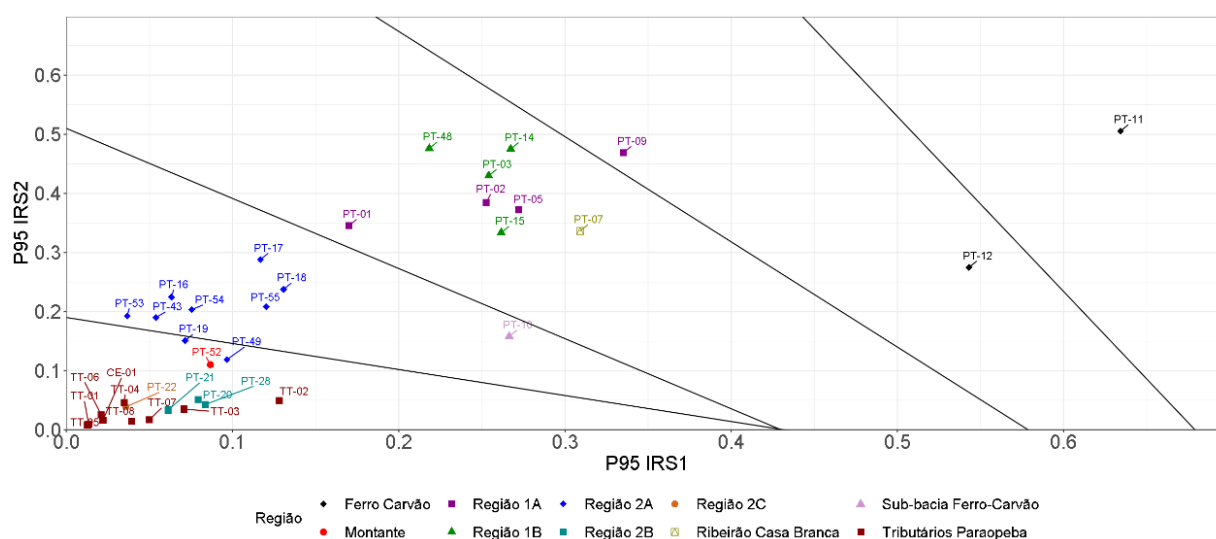
Em relação ao período de chuva de 2019 (**Figura 13.3.1-1**), constatou-se que o ponto de monitoramento na Região Montante (PT-52) apresentou característica química de sedimento natural, enquanto no ribeirão Ferro-Carvão, que recebeu a maior carga dos rejeitos da barragem, apresentou índices químicos composicionais maiores, haja vista a ocorrência de Fe e Mn no rejeito, estando inseridos no campo dos grupos 4 (misturas com predomínio de rejeitos) e 5 (rejeitos).

Os dados analíticos das regiões 1A e 1B apresentaram altos valores dos índices químicos composicionais, enquadrados no Grupo 3 (misturas com predominância de sedimentos naturais) e Grupo 4 (misturas com predominância de rejeitos), seguido pelos pontos da Região 2A, até o PT-55, último ponto fora do Grupo 1 (sedimentos naturais), localizado no município de Curvelo (km 281). Percebe-se que os maiores índices da relação de Mn e Fe ocorreram nas regiões mais afetadas pelo rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, regiões estas que evidenciaram a presença de rejeitos densos (densidade maior que 3,05 g/cm³; ARCADIS, 2021b) e que foram arrastados e acumulados até o ponto de monitoramento PT-15, como apresentado nos estudos com os testemunhos de sondagem e sedimentos de corrente (ARCADIS, 2020c; 2021b) ao longo do rio Paraopeba.

Na Região 2A, apesar da característica química composicional classificada como Grupo 2 (coexistência), os pontos monitorados apresentaram valores menores dos índices, corroborando com a hipótese de que, à medida que se afasta da fonte, os sedimentos finos em suspensão, além de transportar minerais enriquecidos em Ferro e Manganês, também transportavam materiais mais enriquecidos em sílica e alumina e mostravam menor influência de rejeitos nessa localidade. Neste período, as características químicas composicionais classificadas fora do Grupo 1 se estenderam até o PT-55, inserido na Região 2A, em Curvelo.

O ponto localizado no ribeirão Casa Branca (PT-07) e o córrego Samambaia (PT-10), inserido na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão, foram classificados como grupos 3 e 2, respectivamente, indicando contribuição de materiais com química de rejeito nesse período. Os dados analíticos dos pontos das regiões Montante, 2B, 2C e Tributários (Rio Manso (TT-03), Ribeirão Sarzedo (TT-02), Rio Betim (TT-01), Rio Grande (TT-05), Rio Serra Azul (TT-04), Ribeirão São João (TT-06), Ribeirão do Cedro (TT-07), Rio Pardo (TT-08) e Ribeirão dos Gomes (CE-01)) se mantiveram integralmente como pontos com características de sedimentos naturais, inseridos no Grupo 1.

Figura 13.3.1-1 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019.



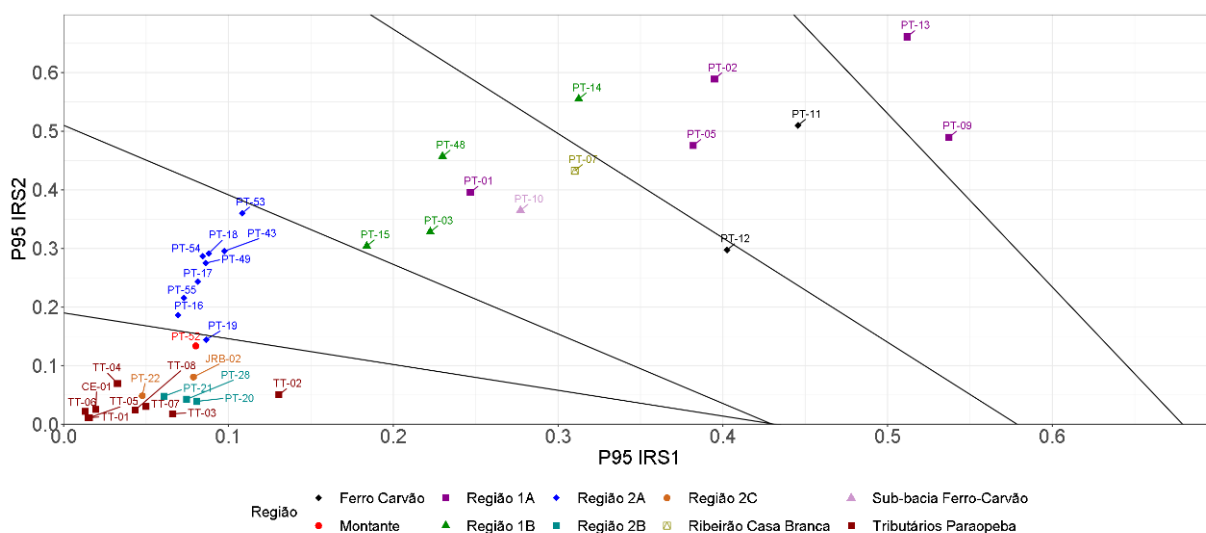
Em relação ao período de estiagem/2019 (**Figura 13.3.1-2**), constatou-se que, o ponto PT-52 (Montante) se manteve com característica química de sedimentos naturais, enquanto no ribeirão Ferro-Carvão, os sedimentos apresentaram característica química classificada como grupos 3 (PT-12) e 4 (PT-11). Os pontos inseridos na Região 1A apresentaram característica química envolvendo misturas com predomínio de sedimentos naturais (PT-01), misturas com predomínio de rejeitos (PT-02 e PT-05) e rejeitos (PT-13). A Região 1B apresentou pontos inseridos no Grupo 4 (PT-14) e Grupo 3 (PT-03, PT-48 e PT-15), indicando importante contribuição de rejeitos nesse segmento. Na Região 1A, constatou-se maior distribuição dos valores dos índices químicos IRS1 (Fe) e IRS2 (Mn), enquanto na Região 1B, os maiores valores ficaram com o IRS2 e houve menor espalhamento para o IRS1.

Os pontos da Região 2A, com exceção ao PT-19, que se manteve no Grupo 1 (sedimentos naturais), foram classificados no Grupo 2 (coexistência), assim como no período sazonal anterior. A única mudança foi identificada no PT-49, que migrou do Grupo 1 para o Grupo 2. Destaca-se o comportamento químico mais elevado do PT-53 nesse trecho, primeiro ponto da Região 2A. Essas características sugerem que, apesar do avanço dos sedimentos em suspensão, com característica composicional de rejeito, as deposições foram menores e se dissiparam com o transporte e deposição de sedimentos característicos da bacia.

Em relação aos pontos das regiões 2B, 2C e Tributários do rio Paraopeba (TT), todos permaneceram com característica química de sedimento natural (Grupo 1). Destaca-se o TT-02, inserido no ribeirão Sarzedo, ponto que pode apresentar aporte de sedimentos de áreas mais escarpadas, através do transporte e arraste de materiais erodidos/intemperizados, de minério exposto no terminal de carregamento localizado a montante desta localidade, ou de eventuais contribuições de transbordos na planície de inundação do rio.

O ponto localizado no ribeirão Casa Branca (PT-07) e o córrego Samambaia (PT-10), inserido na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão, foram classificados no Grupo 3, indicando manutenção da característica química com contribuição de rejeitos, para o período. Destaca-se a migração do PT-10 para o grupo de predomínio de rejeitos, em relação ao ciclo sazonal anterior.

Figura 13.3.1-2 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2019.



No ciclo de chuvas de 2019/2020 (**Figura 13.3.1-3**), constatou-se manutenção do ponto PT-52 (Montante) como característica química de sedimentos naturais (Grupo 1) e os pontos PT-11 e PT-12 indicando misturas com predomínio de rejeitos, classificados no Grupo 4. O PT-12, que estava inserido no Grupo 3 (misturas com predomínio de sedimentos naturais), migrou para o Grupo 4, indicando enriquecimento de materiais com química de rejeito nesse ponto, podendo estar associado ao material represado pela cortina metálica (Estaca Prancha), instalada nessa localidade.

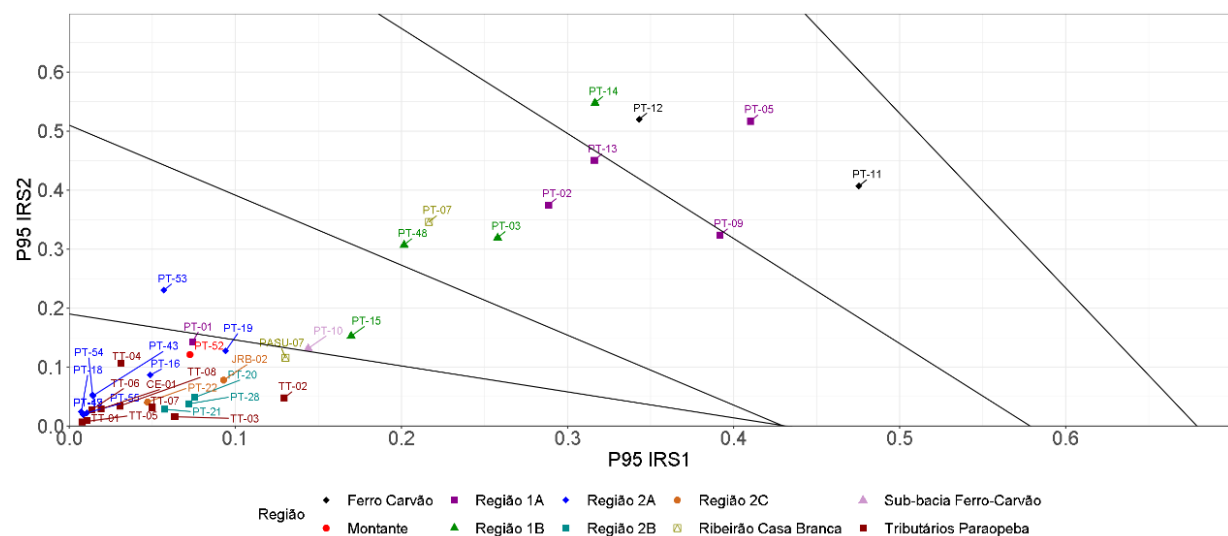
Os sedimentos coletados na Região 1A apresentaram tendência de redução dos índices químicos composicionais, em relação ao período sazonal anterior. O ponto PT-05 foi o único que permaneceu com a mesma classificação (Grupo 4). Os demais pontos migraram para os grupos 3 (PT-02, PT-09 e PT-13) e 1 (PT-01). Os pontos da Região 1B, com exceção do PT-15 (migrando do Grupo 3 ao Grupo 2), mantiveram suas classificações, sendo o PT-14 inserido no Grupo 4 e os pontos PT-03 e PT-48 no Grupo 3. Esse comportamento do PT-14 corrobora com a hipótese de acumulação de sedimentos de fundo enriquecidos em Fe e Mn na localidade

da UTE Igarapé, onde o barramento atuou como anteparo do material sedimentar, retendo-os nesta localidade. O PT-15, a jusante da UTE de Igarapé, indica que houve potencial mistura de sedimentos naturais empobrecidos em Fe e Mn a partir desse ponto, reduzindo os valores dos índices composicionais.

Houve migração dos índices composicionais das amostras dos sedimentos da Região 2A, alterando-se do Grupo 2 (coexistência) para o Grupo 1 (sedimentos naturais), com exceção do PT-53, que apresentou característica química enquadrada no Grupo 2 para o período. Os resultados são coerentes com aqueles apontados por Arcadis (2020c).

Similarmente aos demais períodos, as amostras dos sedimentos das regiões 2B e 2C, além dos tributários permaneceram com característica de sedimento natural (Grupo 1). O ponto PT-07 apresentou manutenção no Grupo 3, enquanto o PT-10 migrou para o campo do Grupo 2 (coexistência). O ponto PASU-07, inserido no ribeirão Casa Branca, indicou característica natural (Grupo 1).

Figura 13.3.1-3 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020.



A partir dos dados disponíveis do período de estiagem/2020 (**Figura 13.3.1-4**) indicou maior dispersão dos resultados na Região Ferro-Carvão (Grupo 4), onde o maior valor do IRS2 ocorreu no PT-12, localizado na área de decantação e contenção de sedimentos na cortina metálica (Estaca Prancha), enquanto no PT-11, o maior valor foi para o IRS1.

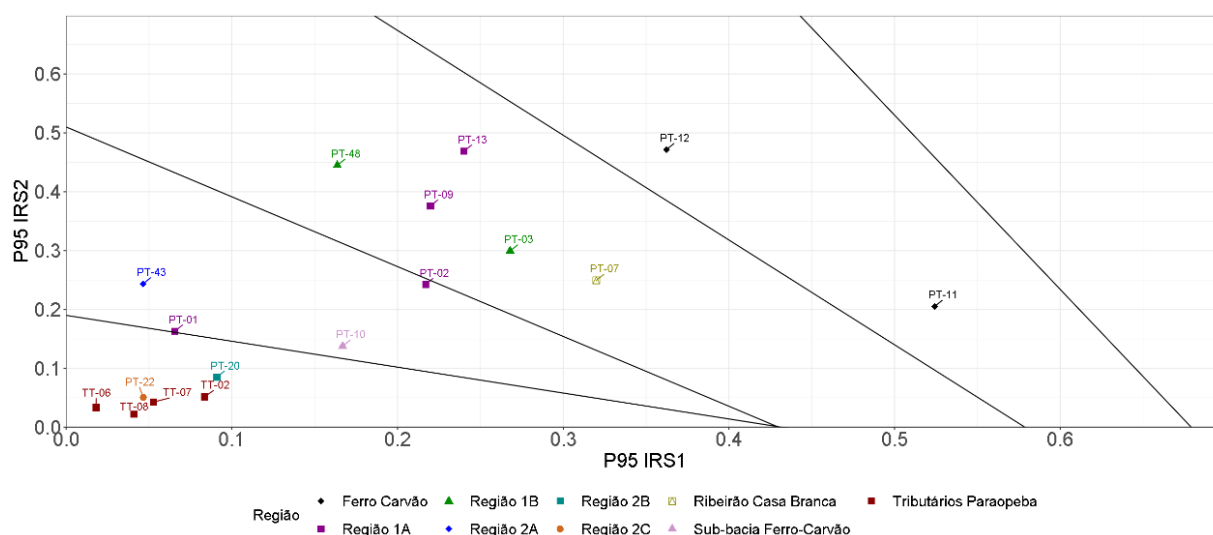
A Região 1A apresentou pontos nos grupos 3 (PT-09 e PT-13) e 2 (PT-01 e PT-02). Os pontos PT-09 e PT-13 se mantiveram no Grupo 3, enquanto os pontos PT-02 e PT-01 migraram dos grupos 3 e 1, respectivamente, ao se comparar com o período sazonal anterior. Os pontos PT-03 e PT-48 indicam manutenção no Grupo 3 para o período.

O ponto PT-43, inserido no contexto da Região 2A, apresentou migração do Grupo 1 para o Grupo 2. Localmente, em maio/2020, o PT-43 apresentou contribuição mais elevada de Mn. O

fato foi anômalo visto que no restante do período de estiagem, o sedimento foi predominantemente natural do rio Paraopeba. Ao avaliar os pontos de montante do PT-43 como o PT-19, PT-18, PT-17 percebeu-se que eles mantiveram uma característica mais natural. Então, é possível que na região do PT-43, que ocorrem dragagens de areia, possa ter havido alguma contribuição anômala pontual local, que não ocorreu nos meses subsequentes.

Os pontos das regiões 2B, 2C e Tributários indicam manutenção no Grupo 1. O ponto localizado no ribeirão Casa Branca (PT-07) permaneceu classificado no Grupo 3, enquanto o PT-10, no córrego Samambaia, se manteve no Grupo 2.

Figura 13.3.1-4 Avaliação no enquadramento da proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 da Geoenviron (2023) nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2020.



No período de chuva de 2020/2021 (**Figura 13.3.1-5**), o PT-52 (Montante) manteve-se no Grupo 1 e os sedimentos identificados no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) permaneceram com elevados valores de IRS1 e IRS2, classificados nos grupos 3 e 4, respectivamente.

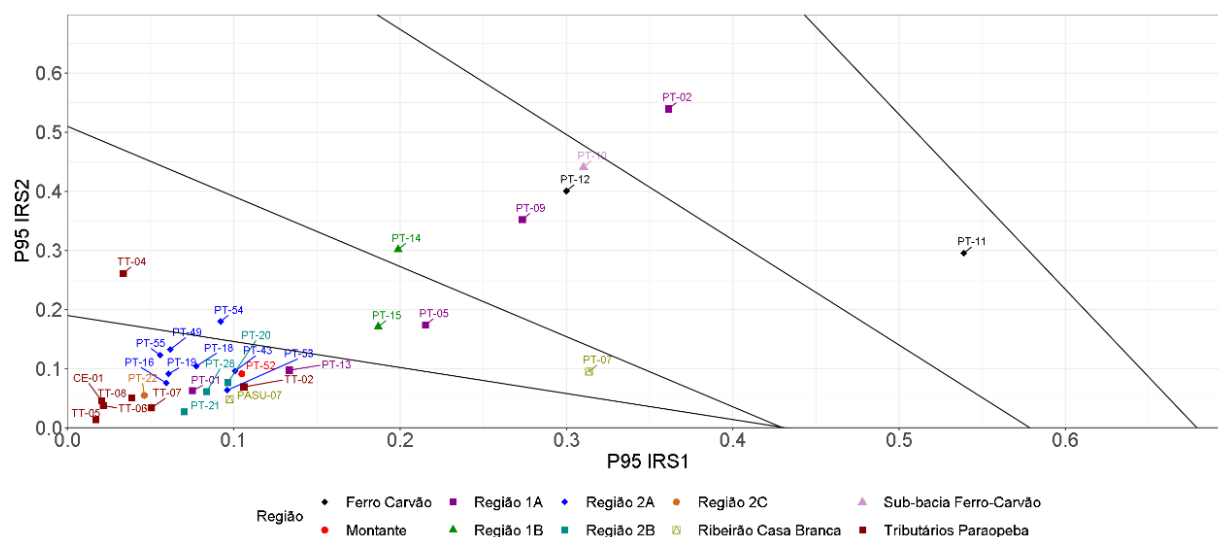
Constatou-se que o PT-02 (Região 1A) migrou do Grupo 2 para Grupo 4, indicando enriquecimento de material com química de rejeito no ponto, neste período, em comparação ao anterior. O PT-09 manteve-se no Grupo 3, enquanto o PT-13 migrou para o Grupo 1, indicando um aporte de sedimentos naturais, empobrecidos em Fe e Mn nesta localidade. O ponto PT-05 foi classificado como Grupo 2, enquanto o PT-01 como Grupo 1. Na Região 1B, os pontos PT-14 e PT-15 foram classificados como grupos 3 e 2, respectivamente, indicando maiores proporções de sedimentos com química de rejeito até o PT-14 (UTE Igarapé) principalmente, e, alternadamente, em diferentes períodos climáticos alcançando o PT-15. Pode-se ainda considerar alguma contribuição de sedimentos relacionados ao intemperismo de rochas ultramáficas/máficas na região que podem contribuir com liberação de Manganês para o sedimento do rio. Entretanto, cabe considerar que no período de 2019 a 2023, as concentrações de Mn tiveram incrementos neste ponto que chegaram a mais de 20.000 mg/kg,

o que foi maior que os dados mais frequentes de Manganês identificados na bacia do rio Paraopeba.

Já os sedimentos amostrados na Região 2A, apresentaram característica química de sedimento natural (Grupo 1). O PT-54 apresentou característica composicional inserida no Grupo 2, visto que foi um dos primeiros pontos dessa região mais próximo a fonte dos rejeitos da B1 e recebeu contribuições provenientes dessas regiões de montante, ou seja, desde a confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão. Certamente houve contribuições locais, porém em concentrações menores. Os pontos das regiões 2B e 2C se mantiveram no contexto do Grupo 1 (sedimentos naturais).

Os tributários do rio Paraopeba, com exceção ao TT-04 (ribeirão Serra Azul), também apresentaram assinatura química de sedimentos naturais. O TT-04 foi enquadrado no Grupo 2, relacionado possivelmente a condições naturais e antrópicas durante esse período, a primeira potencial acumulo de sedimentos de intemperismos e a segunda resultante de contribuições desde 2019 relacionados a retenção hidráulicas por conta da elevada energia de transporte de materiais no rio Paraopeba, dificultando o avanço das cargas dos tributários para o Paraopeba fazendo com que o volume transportado fosse hidraulicamente retido e transbordasse, bem como contribuições de usos de solo na localidade. Dos pontos localizados no ribeirão Casa Branca, o PASU-07 foi classificado como Grupo 1, enquanto o PT-07 migrou do Grupo 3 para o Grupo 2, indicando gradual redução dos teores de Fe e Mn nessa localidade ao longo do tempo. O PT-10 apresentou comportamento de migração do Grupo 2 para o Grupo 3.

Figura 13.3.1-5 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021.



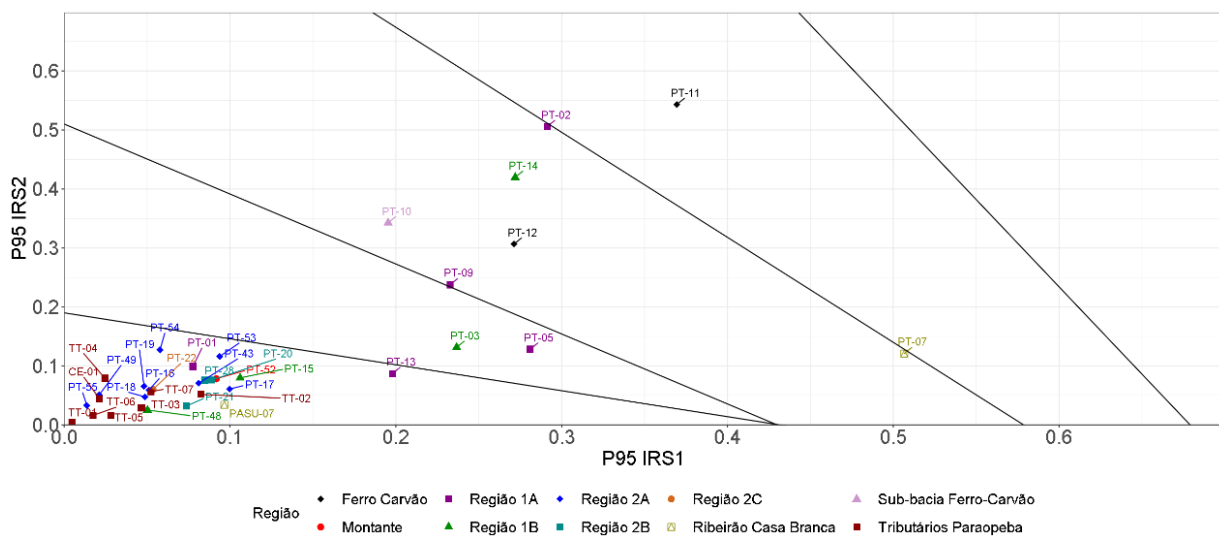
No período de estiagem/2021 (**Figura 13.3.1-6**) foi possível observar que os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão apresentaram variações nos valores de IRS1 e IRS2, mas permanecem

classificados nos grupos 4 (PT-11) e 3 (PT-12), indicando mistura de materiais de rejeitos e deposição de sedimentos naturais pós-rompimento.

A Região 1A, apresentou reduções dos índices para os pontos PT-02 (migrando do Grupo 4 ao 3), PT-09 (mantendo-se no Grupo 3, no limite com o Grupo 2), enquanto os pontos PT-05 e PT-13 apresentam discretos aumentos nos valores, mas mantendo-se nos Grupos 2 e 1, respectivamente. O PT-01 se manteve no Grupo 1. Na Região 1B é observada manutenção do PT-14 no Grupo 3, com enriquecimento dos valores de IRS1 e IRS2 e comportamento de redução no PT-15, com migração do Grupo 2 para o Grupo 1. O ponto PT-03 se posicionou no Grupo 2 neste ciclo sazonal.

Os pontos inseridos nas regiões Montante, 2A, 2B, 2C e tributários apresentaram característica química de sedimentos naturais (Grupo 1), bem como o PASU-07. O PT-07 migrou para o Grupo 3, no limite com o Grupo 4, indicando enriquecimento de Fe e Mn nesta localidade nesse período sazonal. O PT-10 foi classificado no Grupo 3, assim como no período sazonal anterior.

Figura 13.3.1-6 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2021.



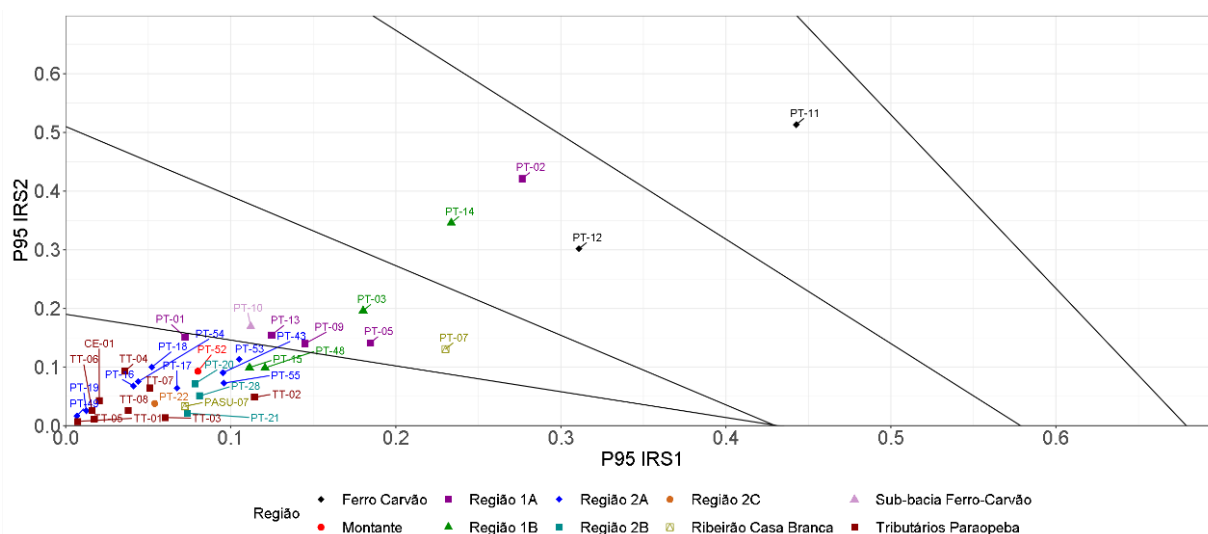
No período de chuvas de 2021/2022 (**Figura 13.3.1-7**), os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão novamente se destacaram por apresentarem os maiores valores de IRS1 e IRS2, com manutenção dos grupos de classificação do período anterior, estando o PT-11 inserido no Grupo 4 e o PT-12 no Grupo 3. Isso sugere estabilidade composicional desses sedimentos.

Na Região 1A, os pontos PT-02 e PT-05 se mantiveram nos grupos 3 e 2, respectivamente, enquanto os pontos PT-09 e PT-13 apresentou, respectivamente, redução em relação ao IRS1 e aumento em relação ao IRS2, sendo enquadrados no Grupo 2. O PT-01 manteve característica química de sedimentos naturais (Grupo 1). A Região 1B apresentou manutenção para os pontos PT-14 (Grupo 3); PT-03 (Grupo 2); PT 48 e PT-15 (Grupo 1). O PT-14 manteve-

se no Grupo 3 em relação ao período anterior e apesar da redução de ambos os índices químicos, o IRS2 manteve-se elevado e acima de 0,3.

Os sedimentos amostrados nas regiões Montante, 2A, 2B, 2C e tributários apresentaram característica química de sedimentos naturais, enquadrados, portanto, no Grupo 1. Os pontos no ribeirão Casa Branca indicaram migração do Grupo 3 para o Grupo 2, no caso do PT-07, e manutenção no Grupo 1, no caso do PASU-07. O PT-10 apresentou redução dos valores de IRS1 e IRS2, migrando do Grupo 3 para o Grupo 2.

Figura 13.3.1-7 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022.



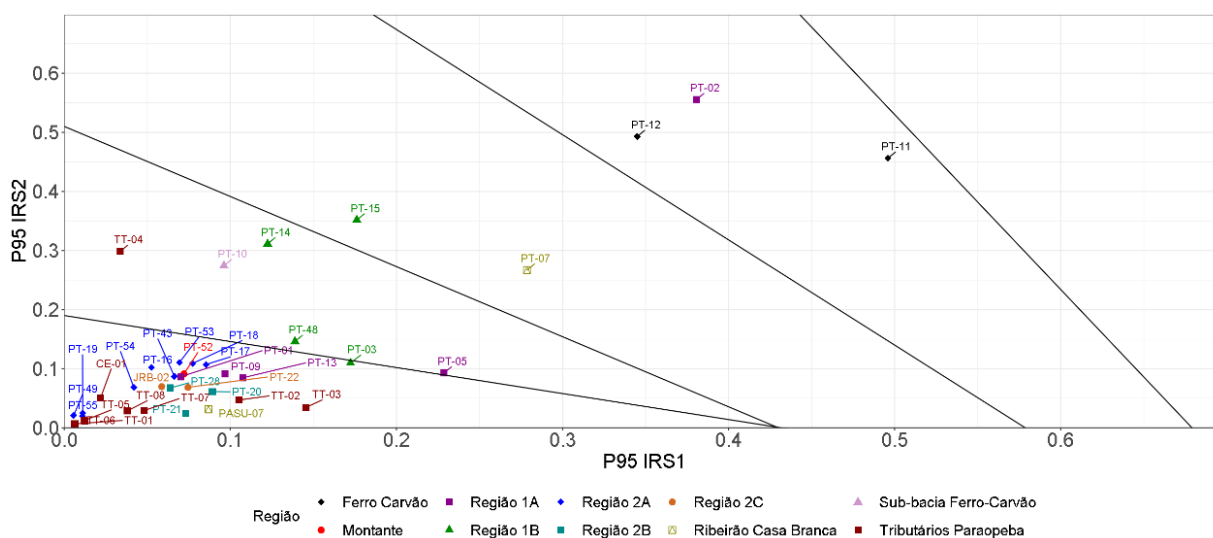
A Região Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), no período de estiagem/2022 (**Figura 13.3.1-8**), mostrou os maiores valores de IRS1 e IRS2, com migração do PT-12 do Grupo 3 ao Grupo 4, relacionado principalmente ao maior acúmulo de sedimentos finos na Estaca Prancha, além da influência das precipitações de 2021/2022 e obras do trecho (*chincanas e sumps*). O PT-02 (Região 1A) também indicou enriquecimento de Fe e Mn, migrando do Grupo 3 para o Grupo 4, situando-se com condições químicas semelhantes aos pontos do Ferro-Carvão. Os demais pontos da Região 1A indicaram reduções dos valores, migrando do Grupo 2 para o Grupo 1 (PT-09, PT-13) e manutenção dos pontos PT-01 no Grupo 1 e PT-05 no Grupo 2.

A Região 1B apresentou elevação dos valores dos índices, principalmente nos pontos PT-48 (Grupo 2) e PT-15 (Grupo 3), no final da Região 1B, que voltaram a apresentar misturas contendo rejeito, mas com predomínio de sedimentos, como possível reflexo das chuvas intensas de 2021/2022. Esse evento de chuvas foi extremo e permitiu maior transporte de materiais e erosão de depósitos mais antigos, indicando reaparecimento do rejeito a jusante da UTE Igarapé. O ponto PT-14 apresentou migração do Grupo 3 para o Grupo 2, refletindo a entrada de sedimentos de assinatura natural no sistema.

As demais regiões, Montante, 2A e 2B e 2C, apresentaram manutenção das assinaturas de sedimentos naturais (Grupo 1). Os tributários do rio Paraopeba apresentaram característica de sedimentos naturais, entretanto, o TT-04 (ribeirão Serra Azul), exibiu assinatura química enquadrada no Grupo 2.

O ponto PT-07 apresentou aumento do IRS2, principalmente, se deslocando para o campo do Grupo 3, assim como o PT-10 que se deslocou do Grupo 1 para o Grupo 2. O ponto PASU-07 permaneceu no Grupo 1.

Figura 13.3.1-8 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2022.



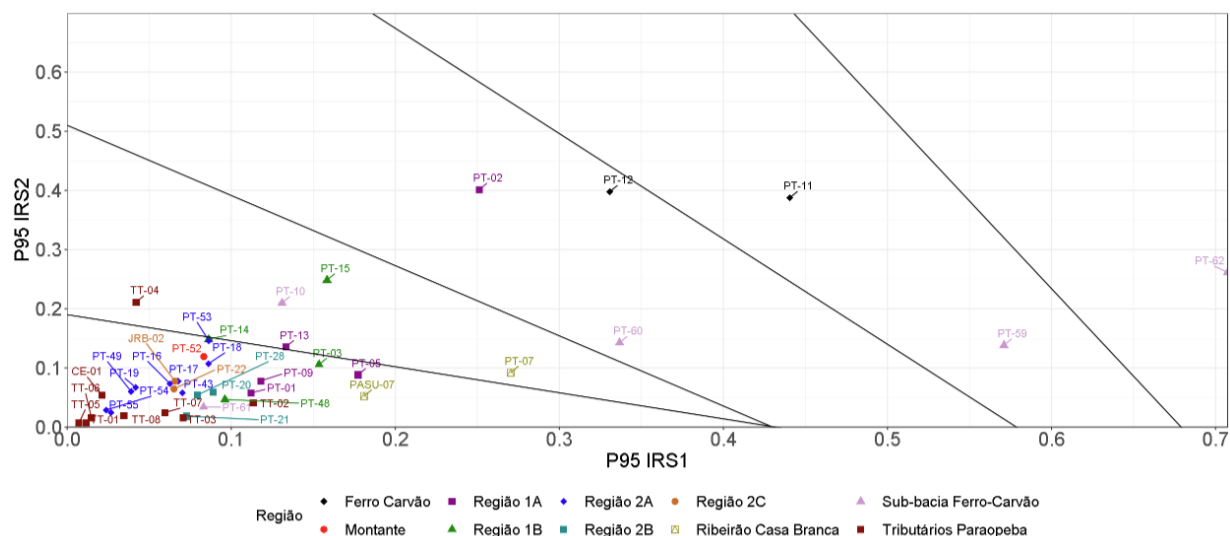
No período de chuva 2022/2023 (**Figura 13.3.1-9**), foi possível observar que os pontos localizados no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), assim como o PT-02 localizado na Região 1A, mantiveram elevados valores de IRS1 e IRS2, comportamento histórico observado durante todo o monitoramento, enquadrados nos grupos 4 (PT-11) e 3 (PT-12 e PT-02). Os demais pontos da Região 1A apresentaram poucas variações nos valores de IRS1 e IRS2, com manutenção no Grupo 1 dos pontos PT-09 e PT-01 e inversão dos grupos do PT-13 (para o Grupo 2) e PT-05 (para o Grupo 1), ambos muito próximos a reta limitadora dos campos.

A Região 1B apresentou redução nos índices composicionais, com o PT-15 migrando do Grupo 3 para o Grupo 2 e os pontos PT-14 e PT-48 do Grupo 2 para o Grupo 1. O PT-03 se manteve no Grupo 1. Observava-se a manutenção, desde o período de chuva 2021/2022, de um comportamento químico apontando a presença de mistura de sedimentos naturais e de rejeitos no PT-15 (Grupo 2), indicando que houve mobilização de sedimentos com característica química de rejeitos até o PT-15, cerca de 10,0 km a jusante da UTE Igarapé. Anteriormente, no período de chuvas 2021/2022 essa distribuição era observada até o PT-14 (Grupo 3), apenas, o que mostra a característica química dos sedimentos de corrente nesta região específica tem variado, eventualmente em função da dinâmica do rio.

Os pontos das regiões Montante, 2A, 2B e 2C mantiveram a característica de sedimentos com característica química de sedimento natural ao longo dos últimos períodos sazonais, classificados no Grupo 1. Dos pontos inseridos no ribeirão Casa Branca, o PASU-07 apresentou manutenção no Grupo 1, enquanto o PT-07 indicou redução dos valores, migrando do Grupo 3 para o Grupo 2. O PT-10 (córrego Samambaia) indicou manutenção as características químicas, classificado no Grupo 2.

Em relação aos tributários do rio Paraopeba analisados, todos os pontos estão no campo dos sedimentos naturais (Grupo 1), com exceção do TT-04, que apresentou valores de IRS1 e IRS2 compatíveis com o Grupo 2. O TT-04, inserido no rio Serra Azul, afluente do rio Paraopeba, pode apresentar contribuições, possivelmente naturais, haja vista sua inserção sob aporte de materiais provenientes do intemperismo de rochas do Grupo Nova Lima, além de contribuições antrópicas, como atividades minerárias, reservatório de captação d'água e indústrias, que são observadas na área da sub-bacia do rio Serra Azul. O TT-02, tributário de maior valor de IRS1 (Fe), inserido no rio Sarzedo, pode ter recebido contribuições provenientes da pilha de minério de ferro no terminal próximo ao TT-02, entre outras contribuições difusas.

Figura 13.3.1-9 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS1 e IRS2 nas regiões Montante a 2C no período de chuva de 2022/2023.



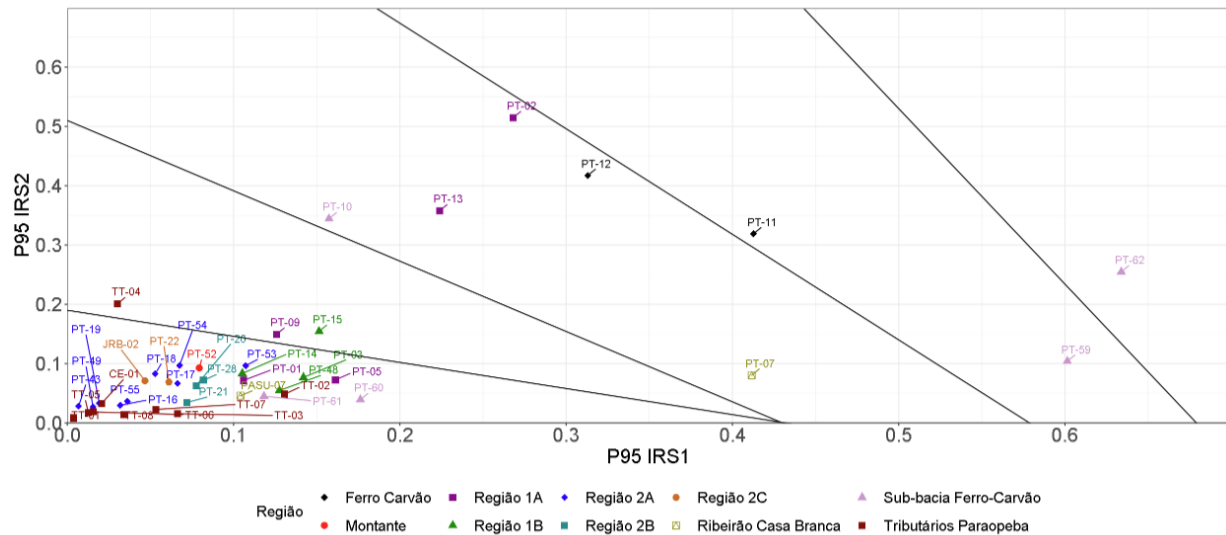
Observa-se que, para o período de estiagem/2023 (**Figura 13.3.1-10**), há distribuição de pontos em todos os cinco grupos propostos por Geoenviron (2023). No Grupo 1 (área de sedimentos naturais), localizam-se todos os pontos das regiões Montante, Região 2A, Região 2B, Região 2C, além dos tributários (com exceção ao TT-04) e Região 1B (com exceção ao PT-15). No Grupo 2 (área de coexistência), se localizam os pontos PT-09 (Região 1A), PT-15 (Região 1B) e TT-04 (tributários). No Grupo 3 (área com predomínio de sedimentos) estão contidos os pontos PT-12 (Ferro-Carvão), PT-02 e PT-13 (Região 1A), PT-07 (ribeirão Casa Branca) e PT-10 (córrego Samambaia). O Grupo 4 (área com predomínio de rejeitos) é composta pelos pontos PT-11 (Ferro-Carvão) e PT-59 (ribeirão Ferro-Carvão), enquanto o

Grupo 5 (área de rejeitos originais) se restringe ao PT-62 (córrego Tijuco). O ponto PT-15, inserido no Grupo 2 (coexistência), localizado a cerca de 63 km da barragem B1, é o ponto mais distal classificado fora do Grupo 1 (área de sedimentos naturais) na estiagem/2023, indicando contribuições do rejeito e sedimentos para esta localidade, fato, não necessariamente natural, haja vista a presença de rejeitos pretos, de aspecto brilhante observado em margem do rio. A UTE de Igarapé (PT-14) apresentou importante função na contenção do avanço do rejeito e, apesar do rejeito de B1 ter sido identificado à jusante desta estrutura, a UTE Igarapé auxiliou a conter seu avanço, haja vista a barreira fixada nesta localidade. Dentro das avaliações dos sedimentos de corrente, a ocorrência de rejeito de B1 foi evidenciada desde 2019.

Observa-se que as amostras classificadas como Grupo 1 ocorrem de maneira ampla ao longo da bacia, abrangendo integralmente os pontos localizados nas regiões 2A, 2B e 2C, além de todos os tributários do rio Paraopeba (com exceção ao TT-04), locais sem impacto do material de fundo aportado na bacia pós ruptura, e dos pontos localizados na Região 1B, sendo o PT-15 a exceção.

O TT-04, inserido no rio Serra Azul, afluente do rio Paraopeba, pode apresentar contribuições distintas que inclui acúmulo de sedimentos em margens no período de estiagem provenientes de regiões de montante deste rio e do rio Paraopeba, bem como pode ser influenciado por aspectos naturais, haja vista sua inserção sob rochas do Grupo Nova Lima. Os pontos inseridos na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão, em área não impactada pelo rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, apresentaram comportamento particular, onde o PT-61 (córrego Laranjeira) se enquadra no Grupo 1, enquanto o PT-10 (córrego Samambaia) se enquadra no Grupo 2, o PT-60 (córrego Olaria) no Grupo 3, PT-59 (ribeirão Ferro-Carvão) no Grupo 4 e PT-62 no Grupo 5 (córrego Tijuco). Todos esses resultados possivelmente estão associados atividades de uso do solo, predominante de mineração que ocorrem a montante desses locais amostrados. Os pontos localizados no ribeirão Casa Branca são classificados como Grupo 1 (PASU-07) e Grupo 2 (PT-07).

Figura 13.3.1-10 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem/2023.



13.4. Considerações

Os índices químicos composicionais (IRS1 e IRS2) permitiram identificar a variação composicional dos sedimentos, ao longo dos ciclos hidrológicos avaliados. A proposta de classificação em cinco grupos distintos elaborada pela Geoenviron (2023) possibilitou dividir os sedimentos em diferentes graus de mistura de sedimentos com composição química natural e rejeito, para toda a bacia do rio Paraopeba.

A **Figura 13.4-1** mostra o panorama geral da aplicação do modelo (GEOENVIRON, 2023) com base nos cinco grupos de classificação dos sedimentos ao longo dos dez ciclos sazonais monitorados desde o rompimento da barragem B1 em janeiro/2019. Como já mencionada anteriormente, à medida que se desloca do Grupo 5 para o Grupo 1 aumenta-se a contribuição dos sedimentos com característica química natural do rio Paraopeba e sem evidência de contribuição do rejeito da barragem B1. Nas figuras abaixo são identificadas as regiões Montante a 2C, inseridas na bacia do rio Paraopeba e sem a identificação dos pontos, visto que o detalhamento da evolução deles foi apresentado nas figuras anteriores.

Notou-se que, desde a chuva de 2019, os pontos localizados nas regiões Montante, 2B e 2C, bem como os tributários do rio Paraopeba estão no campo dos sedimentos com características naturais (Grupo 1), ou seja, o sedimento não mudou sua característica mesmo com o rompimento da barragem B1 e vertimento de rejeito para o rio Paraopeba.

Os pontos da Região Ferro-Carvão apresentaram diferenças nas composições dos índices IRS2 e IRS1 entre os grupos 5 e 4 até a estiagem/2020, indicando predomínio de rejeitos nas misturas com os sedimentos da bacia. Já no período entre as chuvas 2020/2021 até a

estiagem/2023, o modelo mostrou aporte de sedimentos de composição química natural nos rejeitos, classificando-os entre os grupos 4 e 3.

Os valores obtidos para os índices químicos composicionais IRS1 e IRS2 para o período de estiagem/2023, a partir da classificação proposta por Geoenviron (2023), permitiram observar que os pontos localizados na Região Ferro-Carvão, PT-11 e PT-12, são classificadas como Grupos 3 e 4, respectivamente. Dessa forma, o PT-12 é interpretado como mistura de sedimentos naturais e rejeitos, com predomínio composicional de sedimentos em sua composição (50% ou mais), enquanto o PT-11 foi interpretado como mistura com 50% ou mais de rejeitos em sua composição. Esse comportamento de valores de IRS1 e IRS2 nesses pontos é observado desde o período de chuva 2019 até estiagem/2023.

As maiores variações composicionais ocorreram nas regiões 1A e 1B. Na Região 1A, os sedimentos ocupavam os grupos 1, 3 e 4 nas chuvas de 2019 e alguns locais atingiram o Grupo 5 na estiagem/2019, indicando o acúmulo e sedimentação de rejeitos decorrente da redução das vazões e energia de transporte do rio. A partir do período das chuvas de 2019/2020, o modelo indicou os aportes de sedimentos de composição química natural do rio Paraopeba e as amostras dos sedimentos deste trecho estiveram entre os grupos 4 e 1 até a estiagem/2021.

Na Região 1B, os sedimentos ocupavam o Grupo 4 nas chuvas de 2019 e entre grupos 4 e 3 na estiagem/2019. Nas chuvas de 2019/2020, os resultados ficaram mais dispersos entre os grupos 4, 3 e 2 e depois nos períodos seguintes entre estiagem/2020 e estiagem/2022, os sedimentos avaliados estiveram no *trend* entre os grupos 3 e 1. No ciclo hidrológico de 2023 houve outra migração e os sedimentos tiveram características associadas aos grupos 2 e 1, sendo que quanto mais próximo ao Grupo 1, a característica do sedimento é associada ao rio Paraopeba e não ao rejeito da barragem B1.

Historicamente, a Região 1B marca o limite do trecho do rio Paraopeba com sedimentos de corrente indicando assinatura com influência de rejeitos principalmente nos grupos 4 e 3. Da chuva de 2019 a chuva de 2020/2021, o PT-15 indicou presença de material com química de rejeito. Após esse período, percebeu-se que as amostras de sedimentos coletadas no PT-15 tiveram valores de IRS1 e IRS2 progressivamente reduzidos, chegando ao Grupo 1 (sedimentos naturais). A partir da estiagem/2022, esse comportamento retornou, indicando o aporte de sedimentos enriquecidos em rejeito na localidade. Para o período de estiagem/2023, a Região 1B apresentou pontos classificados como Grupo 1 (PT-03, PT-14, PT-48) e Grupo 2 (PT-15), indicando a evolução da composição química dos sedimentos para características mais próximas ao ambiente do rio Paraopeba quando comparados 2019 até a estiagem/2023.

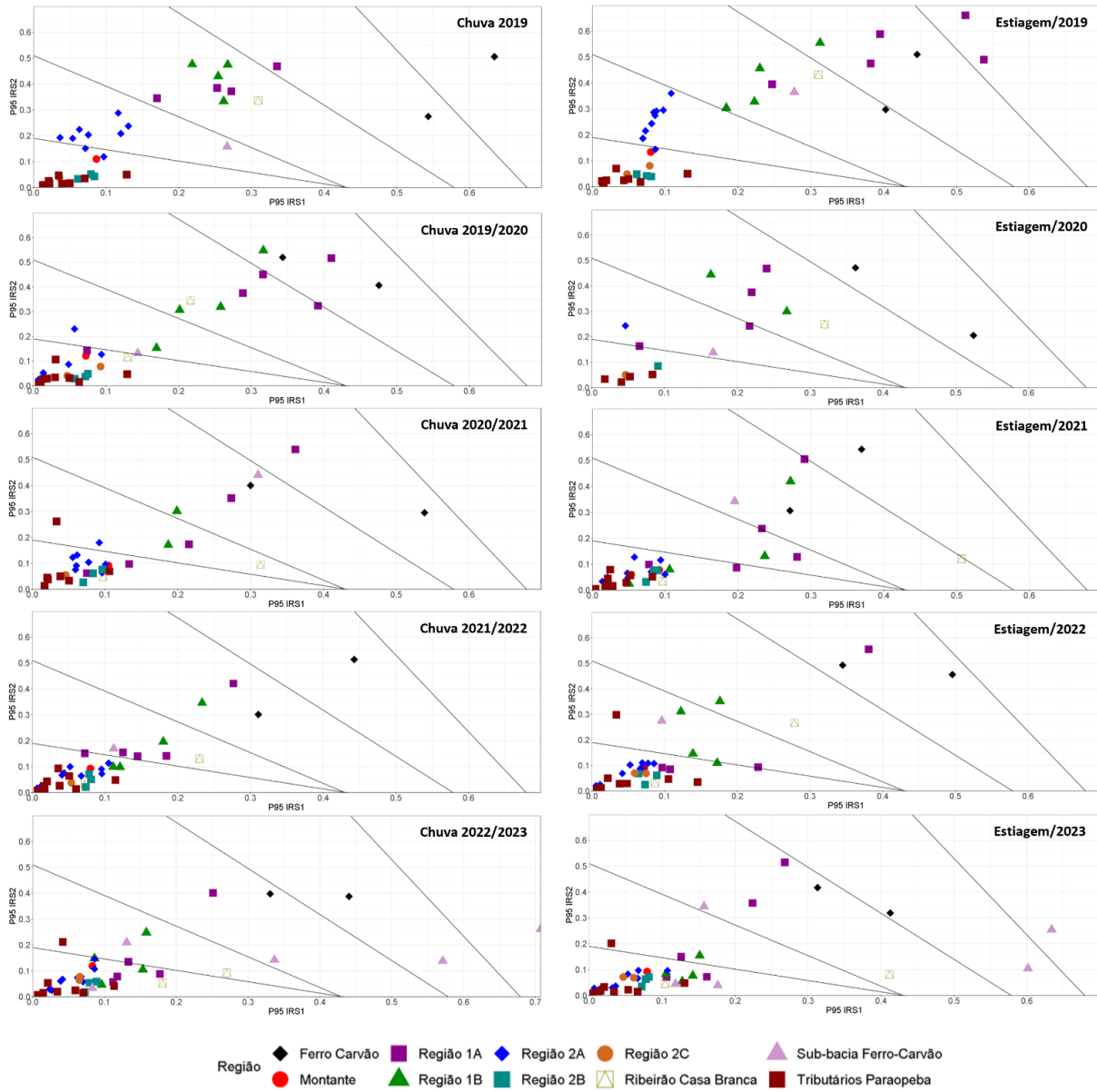
Na Região 2A, segundo o modelo da Geoenviron (2023), os ciclos de chuva de 2019 e estiagem/2019 indicaram predominância no Grupo 2, com elevados valores de IRS2 e baixos valores de IRS1. A presença de materiais enriquecidos em IRS2 pode ter sido decorrente do transporte de materiais finos em suspensão contendo Manganês proveniente do rompimento de B1 e que alcançaram a Região 2A.

A partir da chuva 2019/2020, a composição química dos sedimentos dessa região apontou predominância das características químicas de sedimentos naturais do rio Paraopeba (Grupo 1), ou seja, com baixos valores tanto para IRS1 quanto para IRS2.

Os tributários do rio Paraopeba mantiveram-se praticamente no Grupo 1 em todos os ciclos sazonais, enquanto os tributários da sub-bacia do Ferro-Carvão, a variação foi maior. Destaca-se que o TT-04, inserido no rio Serra Azul, pode apresentar contribuições distintas que inclui acúmulo de sedimentos em margens no período de estiagem provenientes de regiões de montante deste rio e do rio Paraopeba, bem como pode ser influenciado por aspectos naturais, haja vista sua inserção sob rochas do Grupo Nova Lima. O TT-02 é o tributário que apresenta os maiores valores de IRS1 (Fe). Observando-se as características do uso e ocupação do solo percebeu-se a presença de um terminal de armazenamento de minério de Ferro bordejando o ribeirão Sarzedo, onde se encontra o TT-02. Como o local está em área topograficamente mais elevada, a drenagem da região pode ter escoado partículas desse minério para o TT-02, sugerindo uma possibilidade de identificação dessa característica química no local.

Na sub-bacia Ferro-Carvão entre as chuvas de 2019 e a estiagem/2022, os sedimentos coletados ficaram ora no Grupo 3 ora no Grupo 2. Nas chuvas de 2022/2023 e na estiagem/2023 percebeu-se que as amostras dos sedimentos indicaram distribuição dos resultados em todos os grupos, o que sugere influências na área da sub-bacia e alteração no equilíbrio das concentrações locais. Em ordem crescente na classificação dos grupos (1 a 5), seguem os pontos PT-61, PT-10, PT-60, PT-59 e PT-62. Destaca-se que esses pontos da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão se localizam em área não impactada pelos rejeitos das barragens B1, B4, B4A. O intemperismo de rochas pode contribuir com a disponibilização dos minerais para esses pontos, porém, observou-se que as atividades de uso do solo, predominantemente de mineração e transporte de minério podem contribuir para o aporte desses minerais contendo Fe e Mn nos córregos de montante do rompimento da barragem B1 também.

Figura 13.4-1 Avaliação no enquadramento da nova proposta de classificação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo de todos os períodos sazonais analisados.



14. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais

14.1. Objetivo

A avaliação integrada entre as matrizes água e sedimentos foi realizada para se evidenciar qualitativamente as variações dos metais nessas duas matrizes, nos períodos sazonais de estiagem de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023, e avaliar se tais variações identificadas no período recente encontram-se correlacionadas nos mesmos trechos e/ou se estes trechos continuam afetados pelo rejeito do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A.

14.2. Metodologia

O método aplicado consistiu na elaboração de gráficos de diferentes parâmetros relacionados ao comportamento da água superficial e sedimentos, em diferentes períodos sazonais, ao longo da bacia do rio Paraopeba. Os pontos de monitoramento foram dispostos em ordem unifilar de modo a se verificar as variações nas concentrações no espaço e no tempo.

Todas as etapas foram realizadas no *software* R, versão 3.4.4. Inicialmente, foi realizada uma seleção preliminar dos dados disponíveis no banco de dados da Vale no contexto da bacia do rio Paraopeba (metais, parâmetros orgânicos e físico-químicos). Essa etapa envolveu a seleção de dados principais (parâmetros com forte correlação de Pearson) e *outliers* ($P75 + 1,5 \text{ IQR}$ e $P25 - 1,5 \text{ IQR}$), seguida da retirada de dados extremos (TUKEY, 1977). Em seguida, os dados selecionados foram padronizados/transformados em escala Z (escala padrão em estatística onde o desvio padrão é 1 unidade e a média é zero) para tornar os diferentes parâmetros comparáveis entre si.

Em estatística, padronização é o processo de colocar variáveis em escalas distintas em base comparável, ou seja, na mesma escala (ANDRIOTTI, 2010). Esse processo permite a parametrização da população de dados dos distintos parâmetros, com diferentes tipos de variáveis, onde aplica-se o cálculo da média e o desvio padrão para uma nova variável, conforme TRINDADE (2013). A metodologia utilizada se baseia em ferramentas estatísticas difundidas na literatura (REIMANN *et al.*, 2008).

A seleção dos parâmetros correlacionados nos gráficos aqui apresentados partiu da análise de correlação de Pearson, com intuito de auxiliar na seleção dos parâmetros, a fim de corroborar as associações entre as variáveis em cada matriz. Essa análise foi realizada excluindo as variáveis com dados ausentes, ou seja, somente são considerados os dados que apresentaram resultados para todos os parâmetros selecionados na análise em específico. Os parâmetros destacados foram definidos com variáveis pareadas que apresentaram coeficientes de correlação de Pearson maiores que 0,80. Além disso, contribuiu para a seleção dos parâmetros

com base na associação, direta ou indireta, com os rejeitos da barragem B1. Para isso, foram considerados os analitos apresentados no estudo sobre os rejeitos (GEOENVIRON, 2019), sobre as condições de água e sedimentos (relatórios de Fechamento de Ciclo; ARCADIS, 2019; 2022), pela caracterização socioambiental pós-rompimento e avaliação de impactos (ARCADIS, 2022d) na bacia do rio Paraopeba; e em estudos mais recentes da região afetada como o PROJETO ENTIRE (ENTIRE, 2023).

Além disso, foram testadas diferentes curvas de tendências de acordo com os parâmetros considerados e seus valores (em escala Z) usando ajuste de regressão polinomial local com o *software*, incluindo os tipos *loess*, *gam*, *glm* ou *lm* (pacote base, R Core Team, 2019). O sombreamento relacionado às curvas nos gráficos identifica o erro padrão da regressão modelo. A curva de tendência tem como objetivo modelar uma possível curva alisada (*i.e. loess*, *gam*, *glm* ou *lm*) dos dados avaliados em função dos pontos e da distância no rio. Onde, a partir delas, foi possível comparar e interpretar o comportamento de diferentes parâmetros entre os diferentes períodos sazonais e, no fim, discutir a evolução global na qualidade de água e sedimento na bacia do rio Paraopeba, ao longo do tempo. Foi considerada a curva de tendência que apresentou melhor estimativa frente ao conjunto de dados considerados, tanto para água como para sedimentos. Nesse sentido, para as avaliações, foram adotadas as curvas modelo de tendência do tipo polinomial *gam* (*generalized additive model*), que apresentaram aspecto mais senoidal e sensível à distribuição e oscilação dos dados.

A análise da qualidade de sedimento foi realizada levando-se em consideração os resultados analíticos de Manganês, Ferro, Alumínio, Fósforo, Chumbo, Cobre e Cádmio, com adição do Níquel, Carbono Orgânico total, além das dimensões granulométricas Silte e Argila. A avaliação foi realizada para os períodos sazonais de chuva de 2019 a 2023 e estão apresentados no **Gráfico 14.3-1**. De forma similar, os parâmetros selecionados para a matriz de água superficial incluíram para as frações dissolvidas e totais, o Manganês, Ferro, Alumínio, Fósforo, Chumbo, Cobre e Cádmio, além de Turbidez e Sólidos Totais (**Gráficos 14.3-2**).

Esta exposição teve como objetivo avaliar o comportamento dos diferentes parâmetros selecionados de forma integrada no tempo e no espaço, ao longo do perfil do rio Paraopeba. Os pontos apresentados da esquerda para a direita seguem a ordem unifilar, de montante da região do rompimento da barragem B1 (PT-52), passando para o ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), seguindo pelos pontos inseridos no rio Paraopeba, na Região 1A (PT-01 ao PT-05), Região 1B (PT-03 ao PT-15), Região 2A (PT-53 ao PT-55), Região 2B no reservatório da UHE de Retiro Baixo (PT-20 a PT-21) e, finalmente, Região 2C (JRB-02 a PT-22).

14.3. Resultados e discussão

A avaliação integrada entre as matrizes água e sedimentos foi importante para verificar a evolução das concentrações ao longo do tempo e do espaço, além de identificar correlações entre as matrizes. Os parâmetros avaliados foram definidos com base na sua associação com a pluma de Turbidez e analitos. Os gráficos em escala Z permitiram correlacionar parâmetros diferentes em função de sua distribuição ao longo do rio, através da padronização de variáveis, avaliando as concentrações padronizadas em relação à média e desvios presente na bacia.

Ou seja, nos gráficos, é possível, simplificada, avaliar o quanto os valores de cada ponto/região estão acima dos valores médios da bacia, considerando cada parâmetro e período sazonal.

Nesse sentido, o fato de porções da curva de tendência apresentarem valores positivos (até +1) ou negativos (até -1) indica que, dentro da distribuição de dados do período, alguns pontos/regiões apresentaram concentrações mais elevadas ou menores que a média prevista para a bacia. E, assim, indicam locais onde há maior tendência de concentração dos parâmetros avaliados, em especial, de metais. O comportamento oscilatório da curva de tendência, evidenciado por picos (valor mais elevados) e vales (valores mais reduzidos), indica alterações locais no comportamento de distribuição dos dados.

Para os sedimentos, a análise dos parâmetros foi realizada de forma unificada para os diferentes períodos sazonais de estiagem (2019, 2020, 2021, 2022 e 2023). A avaliação considerou parâmetros granulométricos como silte e argila, apresentando oscilação no comportamento entre os diferentes pontos monitorados (**Gráfico 14.3-1**), além de metais (Alumínio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Ferro, Fósforo, Manganês), com redução global das concentrações ao longo do tempo (**Gráfico 14.3-2**).

Com relação à granulometria, o **Gráfico 14.3-1** apresentou oscilação na distribuição de silte e argila ao longo da bacia do rio Paraopeba e no tempo, nos diferentes períodos sazonais. É importante ressaltar que as mudanças nos locais de coleta ao longo do tempo ou impossibilidades de amostragens, somadas à influência das precipitações, podem ter contribuído para as diferenças granulométricas entre os diferentes períodos avaliados.

O **Gráfico 14.3-1A** mostrou a distribuição granulométrica para a estiagem/2019, sendo possível identificar que as regiões Ferro-Carvão, 1B e 2B apresentam predominância de sedimentos de granulometria fina (silte e argila), relacionados a locais de barramento com retenção e deposição de materiais finos, como a UTE Igarapé (PT-14 na Região 1B) e UHE Retiro Baixo (PT-20 na Região 2B). Pontos em locais de maior sinuosidade do rio ou obstáculos, que favorecem também o acúmulo de sedimentos finos como o PT-17 (próximo a uma ponte caída), PT-53 e PT-55 na Região 2A, apresentam valores mais elevados no gráfico. A curva de tendência sugeriu comportamento mais constante de distribuição, com predominância de acúmulo na Região 1B. Nesse sentido, observou-se que, após o rompimento, os rejeitos foram transportados como carga de fundo, principalmente até a Região 1B, onde foram barrados e depositados próximos ao PT-14. Arcadis (2021b, 2020c) indicaram interpretação similar desse comportamento granulométrico dos sedimentos de fundo na região. Pontos a jusante apresentam dinâmica mais característica da bacia, com menor influência do rompimento, até o limite da Região 2B, região também de barramento hidráulico.

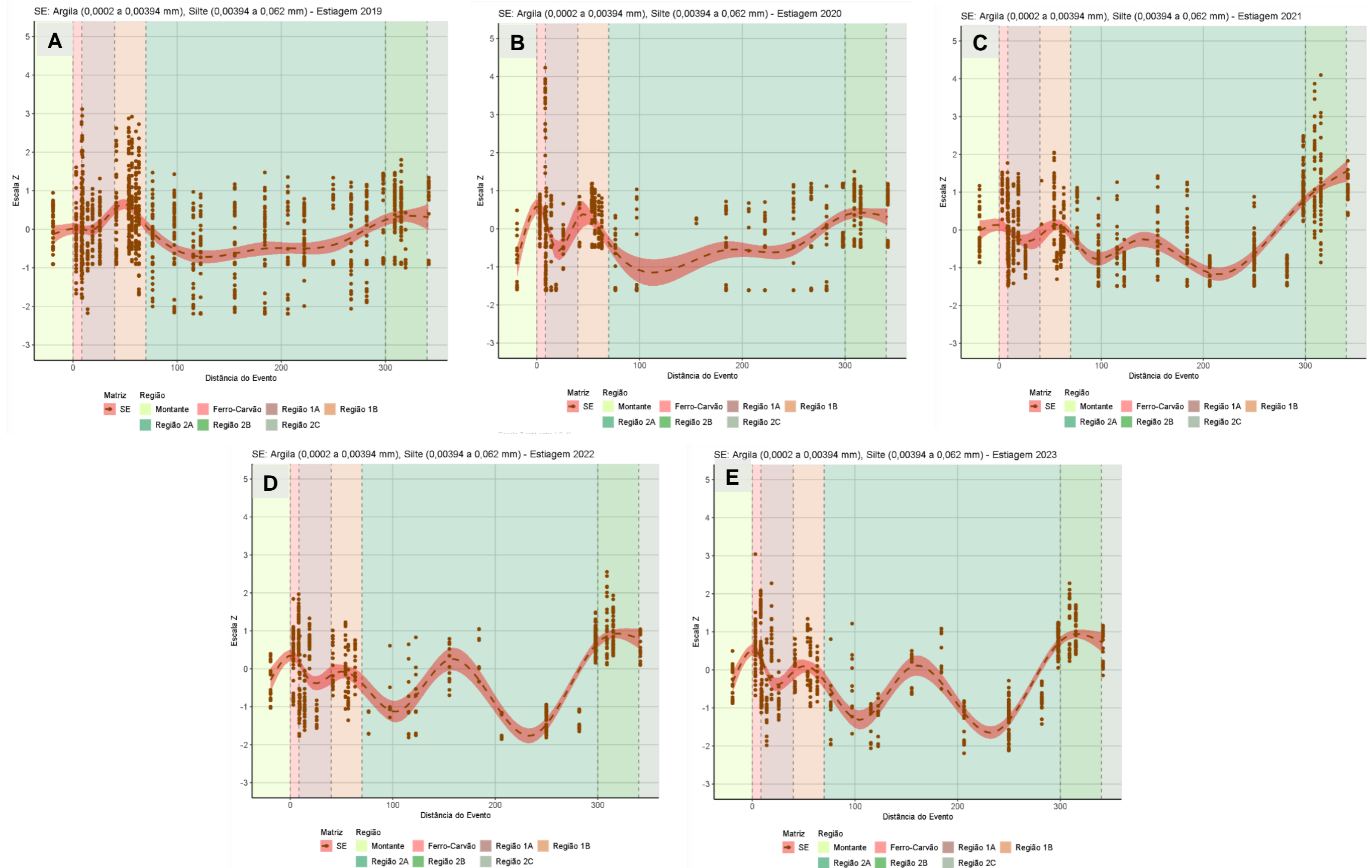
A estiagem/2020 (**Gráfico 14.3-1B**) apresentou aspecto similar, com surgimento de elevação de valores principalmente na Região Ferro-Carvão. A elevação na Região Ferro-Carvão deveu-se, principalmente, pela construção da estrutura de retenção Estaca Prancha, com retenção de água e sedimentos do ribeirão homônimo, como medida de impedir o transporte direto de água, sedimentos e rejeitos do trecho impactado para o rio Paraopeba. Enquanto as demais

regiões apresentam comportamento parecido ao período sazonal anterior, com pico nas regiões 1B e 2B. A Região 2A indica certa redução de sedimentos finos, relacionado principalmente às precipitações do período anterior e atual, com maior transporte de materiais e erosões relacionado ao aumento do escoamento superficial e de níveis/vazões. Nesse sentido, a Região Ferro-Carvão funcionou como uma estrutura de retenção de material, principalmente fino (silte e argila), indicado pelos valores mais elevados, seguida pelas regiões 1B (PT-14) e 2B (PT-20).

Já o período de estiagem/2021 (**Gráfico 14.3-1C**), marcado por menores volumes pluviométricos, registrou comportamento diferente dos períodos anteriores, com menor oscilação granulométrica entre as regiões de montante a 2A, com menores valores em todo esse trecho quando comparado ao ciclo sazonal anterior. Observa-se um aumento na Região 2B, situada no contexto da UHE de Retiro Baixo, em ambiente mais lântico (intermediário), propiciando a decantação de finos. A curva de tendência sugeriu leve pico nas regiões Ferro-Carvão e 1B, similar ao período sazonal de estiagem anterior. A Região 2A apresentou um comportamento oscilatório, com pico no trecho inicial e um vale no trecho final. A maior alteração em relação ao período sazonal anterior foi observada na Região 2B, com elevação dos valores, em resposta a deposição de sedimentos finos na região, evidenciado pelo caráter de aumento da inclinação da curva de tendência. A presença de sedimentos finos apresentou menor oscilação em relação ao histórico anterior (com valores em escala Z oscilando entre -2 até 2), mantendo-se um achatamento maior entre Montante e Região 2A. Esse comportamento sugere uma menor oscilação dos valores em relação à média nesse trecho. Já na Região 2B, foi observado aumento expressivo dos valores, indicado pelo comportamento da curva de tendência e valores acima de 4 para o período. Nesse sentido, o menor aporte e transporte de sedimentos finos para a bacia poderiam justificar a oscilação na presença de silte e argila.

Já os dois últimos períodos sazonais avaliados, estiagem/2022 (**Gráfico 14.3-1D**) e estiagem/2023 (**Gráfico 14.3-1E**), apresentaram comportamento similar entre si, mas diferentes do histórico. O comportamento semelhante relaciona-se principalmente aos ciclos de precipitações relativamente similares nos dois períodos. Em ambos os gráficos, a Região Ferro-Carvão mostrou oscilação dos valores na escala Z de -2 até +2, com predominância de valores mais elevados, conforme indicado pelo pico na curva de tendência. Da mesma forma, as regiões 1A, 1B e 2A apresentaram curva de tendência com vales (-1) e picos (+1), respectivamente, relacionado aos pontos de onde há acúmulo de material fino. Já a Região 2B manteve valores mais elevados relacionados ao acúmulo de sedimentos no reservatório, mas com menores oscilações dos valores. A extensão do grande período de chuvas iniciado em 2021, que continuou a reverberar até 2023, resultou em aumento nos níveis/vazões dos rios e erosão de depósitos (marginais e de canal), o que permitiu maior oscilação na deposição de sedimentos em 2022, com maior dispersão nos depósitos de silte/argila. Enquanto nas chuvas que antecederam o período de estiagem/2023, o aporte e deposição foram maiores, favorecendo o acúmulo de sedimentos ao longo do rio, evidenciado pela presença de curva de tendência com picos mais evidenciados/abruptos.

Gráfico 14.3-1 Distribuição granulométrica de silte e argila dos sedimentos do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada *gam*.



Com relação aos metais, de modo geral, observou-se um comportamento bastante similar ao da granulometria (silte e argila), ou seja, pontos com acúmulo de materiais finos também apresentaram maiores concentrações de metais. Há um grande controle sedimentológico dos metais. Padrão este, já assinalado por Arcadis (2022a), uma vez que partículas finas, principalmente argila, possuem tensão superficial maior que frações arenosas e tendem a adsorver mais metais. Nesse sentido, o **Gráfico 14.3-2** apresentou oscilação na distribuição de metais ao longo da bacia do rio Paraopeba e nos diferentes períodos sazonais. Fatores, como dificuldades nas coletas, mudanças nas posições de amostragem e as precipitações também podem influenciar nas variações de metais entre os diferentes períodos avaliados.

O **Gráfico 14.3-2A** apresentou o comportamento de metais para a chuva 2019, com forte controle sedimentológico. As regiões 1B e 2B mostraram elevação das concentrações com bastante dispersão dos dados, relacionado ao contexto de acúmulo de sedimentos em ambientes de retenção hidráulica (UTE Igarapé e UHE Retiro Baixo). A Região Ferro-Carvão também mostrou grande dispersão dos dados, com dados atingindo valores de até 5 na escala Z, porém com tendência próxima à da Região Montante e pontos da Região 2A. As demais regiões a jusante (2A a 2C) mostraram valores inferiores, porém levemente acima da Região Montante, relacionado principalmente a pontos com menor acúmulo de materiais finos e possibilidade de transporte de rejeitos até fim da Região 2A, principalmente (pico da curva). Comportamento este que corrobora a indicação de ARCADIS (2020a; 2020b), que já havia pontuado que dispersão dos rejeitos como carga de fundo ocorreu até a Região 1B, no reservatório da UTE Igarapé. Arcadis (2020a), de forma complementar, sugeriu ainda a dispersão dos rejeitos como fase suspensa até o limite da Região 2A no PT-55.

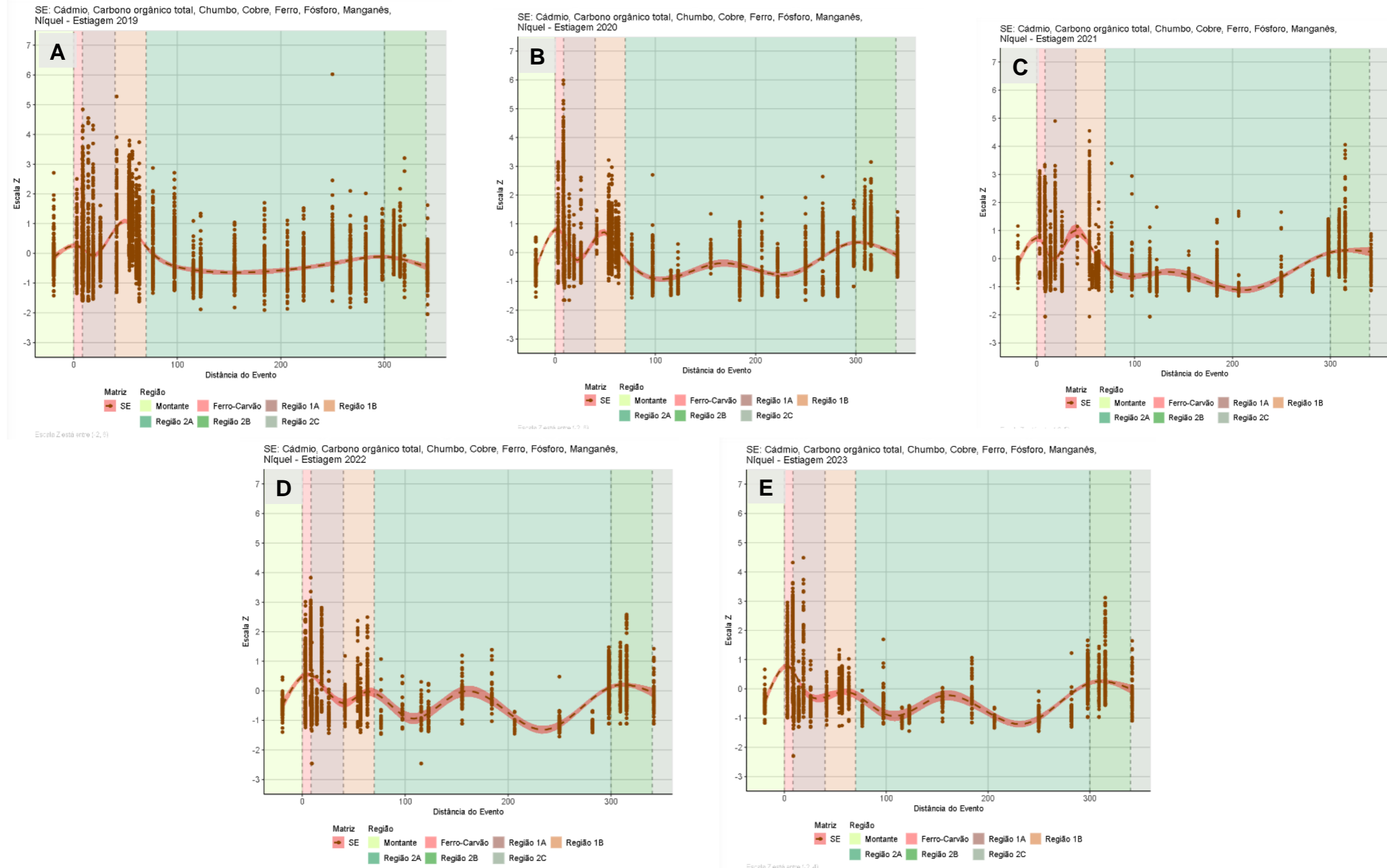
O **Gráfico 14.3-2B**, referente a estiagem/2020, destacou-se pelo surgimento de um pico na curva de tendência na Região Ferro-Carvão, relacionado implementação do barramento Estaca Prancha e seu represamento de materiais. Evidencia-se ainda que as maiores concentrações continuaram relacionadas aos trechos de Ferro-Carvão até 1B, principalmente aos pontos de reservatório (PT-12 e PT-14), enquanto as regiões a jusante (2A a 2C) exibiram concentrações menores, próximas a da Região Montante.

Já o ciclo sazonal posterior (estiagem/2021), indicado no **Gráfico 14.3-2C**, evidencia-se, de maneira geral, uma curva de tendência com pico bem-marcado na Região Ferro-Carvão e 1B, seguido de um comportamento mais homogêneo para as demais regiões. A Região 2B apresentou oscilações discretas, próximo das regiões montante, 2A e 2C, apesar de apresentarem grande dispersão dos dados. Tal comportamento está associado a um período menos intenso de precipitações e com maior oscilação na deposição de sedimentos, acompanhado de uma menor influência das partículas finas dos rejeitos e de um maior controle bacinal, quando comparado aos períodos anteriores.

Os **Gráficos 14.3-2D e 14.3-2E** apresentam comportamento de curva de tendência próximas, sugerindo que os períodos de estiagem de 2022 e 2023 apresentaram condições hidráulicas, sedimentológicas e de concentração de metais similares. Em ambos os períodos, as chuvas foram mais intensas que em 2021, capazes de transportar e erodir materiais ao longo do rio. Nesse sentido, a Região Ferro-Carvão apresentou concentrações mais elevadas, com pico na

localizado e alta frequência de dados elevados (até cerca de +4), sugerindo importante contribuição dos rejeitos no trecho, em função da Estaca Prancha. Importante considerar que esta é uma região em reparação, onde há maior disponibilidade de materiais associados ao rejeito, além de remobilização de materiais em função as obras. As regiões 1B e 2B também apresentaram picos mais acentuados, relacionados a pontos de acúmulo de materiais, com maiores concentrações de metais quando comparadas a Montante, 1A e 2C, principalmente. Apesar dos teores elevados na Região 1B, nota-se menor contribuição dos rejeitos na área e/ou mistura com sedimentos naturais, evidenciado por estiagem/2023. Na Região 2B, os valores elevados relacionam-se ao fato deste ser um importante trecho de acúmulo de metais, ao longo do tempo.

Gráfico 14.3-2 Distribuição de metais nos sedimentos do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada *gam*



Para a água superficial, de modo similar aos sedimentos, a análise dos parâmetros também foi realizada de forma unificada para os diferentes períodos sazonais de estiagem (2019, 2020, 2021, 2022 e 2023), apresentada no **Gráfico 14.3-3**. A avaliação considerou metais nas frações total e dissolvida (Alumínio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Ferro, Fósforo, Manganês), além de Sólidos totais e Turbidez, apresentando oscilação no comportamento, com redução global das concentrações ao longo do tempo.

A estiagem/2019 (**Gráfico 14.3-3A**) indicou distribuição heterogênea ao longo da bacia, com presença de maiores concentrações das regiões Ferro-Carvão até 1B, e menores nas demais. A Região Ferro-Carvão registrou os maiores valores, com a curva de tendência exibindo um pico bem-marcado (próximo a +1), seguido de uma elevação mais suave na Região 1B. Comportamentos estes relacionados principalmente à influência dos rejeitos recém inseridos na bacia, principalmente na fração total. A Região 2A apresentou curva suavizada com padrão *flat* e próximo a zero e da Região Montante, com redução na Região 2B, de reservatório. Importante ressaltar também que o padrão *flat* relaciona-se, principalmente, ao fato de uma das regiões apresentar valores extremamente elevados, e durante a transformação para a escala Z, resultam em um achatamento dos valores menos discrepantes nas demais regiões, com uma curva modelo de baixa oscilação. Nesse sentido, apesar da baixa oscilação dos dados, as regiões 2A e 2B apresentaram certa dispersão dos valores pontuais, acima inclusive da Região Montante, o que poderia indicar também influência dos rejeitos nestes trechos. Arcadis (2019) sugeriu extensão da pluma de turbidez e analitos até a região de reservatório UHE Retiro Baixo (2B) nos primeiros meses após o rompimento.

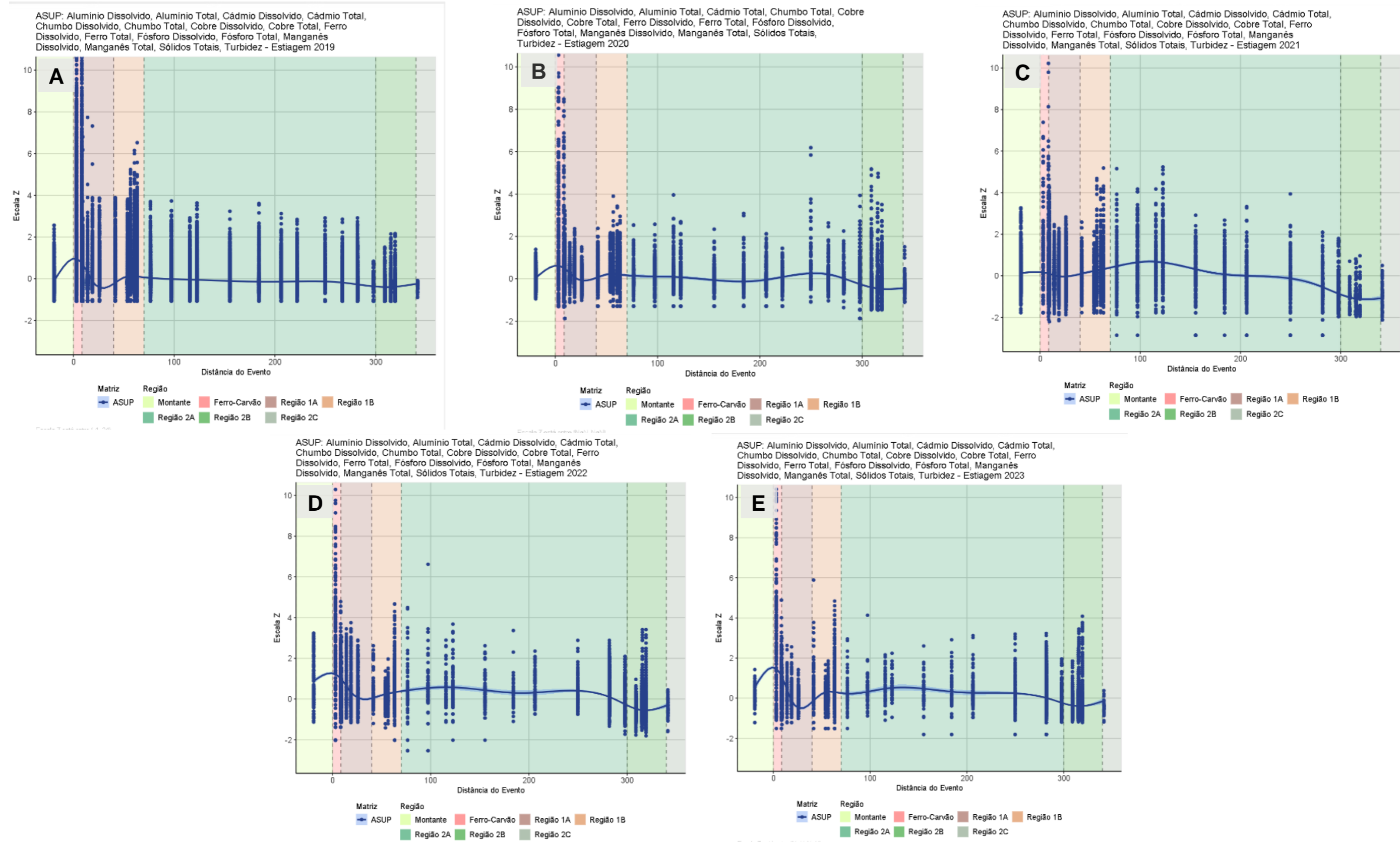
De forma similar, a estiagem/2020 (**Gráfico 14.3-3B**) também apresentou comportamento heterogêneo, com pico da curva modelo na Região Ferro-Carvão, com maiores valores pontuais, seguido de padrão mais retilíneo até o limite com a Região 2B, que apresenta aumento dos valores em relação a estiagem anterior. A Região 1B apesar de apresentar valores pontuais elevados, mostrou frequência de dados menores, indicados por leve oscilação positiva na curva suavizada. A Região Montante apresentou redução no período. Em comparação com o período anterior, observou-se manutenção de concentrações mais elevadas na região afetada Ferro-Carvão, principalmente para metais, com deslocamento para regiões a jusante (1A e 1B), conforme indicado pela elevação nos valores pontuais (até +6) e da curva modelo. Destaca-se, especialmente, o aumento das frações dissolvidas neste período. Regiões a jusante (2A e 2B) exibiram incremento dos valores pontuais também, o que poderia estar relacionado a condições da bacia ou de contribuições locais. Pontua-se ainda a possibilidade de influência discreta dos rejeitos nestes trechos, dado o contexto de precipitações.

Já na estiagem/2021 (**Gráfico 14.3-3C**), observou-se aumento das concentrações pontuais nas regiões 1A, 1B enquanto na Região Ferro Carvão o caráter foi de redução de valores acima de +6. A Região Montante destacou-se pelo aumento dos valores pontuais, o que indicou um aumento na bacia das concentrações dos parâmetros avaliados. Esse comportamento também é observado na Região 2A. A presença de valores discrepantes nos trechos mais impactados pelo rompimento (Ferro-Carvão até 1B), acima inclusive da Região Montante, sugere ainda influência dos rejeitos na água superficial. De maneira geral, o padrão *flat* da curva de

tendência, com baixas oscilações, indica a predominância de valores mais amenos ao longo da bacia, com redução da influência do rejeito e aproximação das condições de *baseline*.

Para os períodos seguintes, estiagem/2022 (**Gráfico 14.3-3D**) e estiagem/2023 (**Gráfico 14.3-3E**), foram identificadas tendência similares para as curvas suavizadas, com pico concentrado na Região Ferro-Carvão e aspecto mais retilíneo nas regiões subsequentes, seguido de redução no reservatório de UHE Retiro Baixo (Região 2B). Esse padrão indica uma redução da influência do rejeito ao longo da bacia, dada a dissipação e deposição dos sedimentos nesses períodos de menor energia de transporte no rio, o que diminuiu a presença de materiais em suspensão na água superficial. A presença de valores mais elevados, inclusive parecidos aos do período de rompimento (até +1,5) nas regiões Ferro-Carvão pode ser associada ao trecho em reparação que favoreceram a suspensão e disponibilização de materiais para a água. A Região Montante, da mesma forma, manteve valores altos (até +3) em 2022 e reduziu para 1,5 em 2023, também indicou um comportamento bacinal para a oscilação nos parâmetros avaliados.

Gráfico 14.3-3 Distribuição de metais na água superficial do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem/2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada *gam*.



A fim de verificar mais detalhadamente a influência global dos rejeitos nas matrizes de água e sedimentos, foram realizadas avaliações de seus principais marcadores e seu transporte através da pluma de turbidez e analitos. O **Gráfico 14.3-4** apresenta a comparação e correlação das duas matrizes ao longo do tempo (2019 a 2023). Os parâmetros avaliados foram Ferro, Manganês (com frações dissolvida e total para água), com inclusão de Turbidez e Sólidos Totais para água, e das dimensões granulométricas silte e argila, para sedimentos.

Nesse sentido, a avaliação integrada das duas matrizes (**Gráfico 14.3-4**) sugeriu que, de maneira geral, logo após o rompimento, houve a maior disponibilidade de materiais e metais (Manganês e Ferro) tanto para os sedimentos como para água superficial, principalmente das frações totais. Isso ocorreu nas regiões mais afetadas pelo avanço do rejeito das barragens B1, B4 e B4A, de Ferro-Carvão até 1B. À medida que se afastaram dessas regiões, e da fonte, as concentrações desses metais, de forma geral, foram se atenuando nas duas matrizes.

A redução também ocorreu ao longo do tempo, relacionado tanto a processos naturais da bacia, com diluição, solubilização e mistura com materiais naturais, como também a medidas de contenção e remediação, como barreiras, diques, dragagem, entre outras. Em 2019, com a implantação da cortina metálica no ribeirão Ferro-Carvão, a contribuição dos rejeitos das barragens para o rio Paraopeba foi interrompida e passou a ser acumulada no barramento Estaca Prancha, no ribeirão Ferro-Carvão. Da mesma forma, a barragem da UTE Igarapé acumulou sedimentos e rejeitos com o tempo. Os **Gráficos 14.3-4** indicam essa elevação nas concentrações ao longo do tempo nos sedimentos, porém não é observada de forma tão evidente na água, somente na dispersão dos dados pontuais.

Já nas regiões a jusante, de 2A a 2C, as matrizes apresentaram padrões diferentes. A água superficial mostrou concentrações mais homogêneas e similares entre os pontos da Região 2A com redução até a Região 2B. Já os sedimentos mostraram oscilação das concentrações, em função de locais de retenção hidráulica, onde se acumulam sedimentos finos e, por consequência, aumentam as concentrações de metais, com aumento até a região de reservatório 2B.

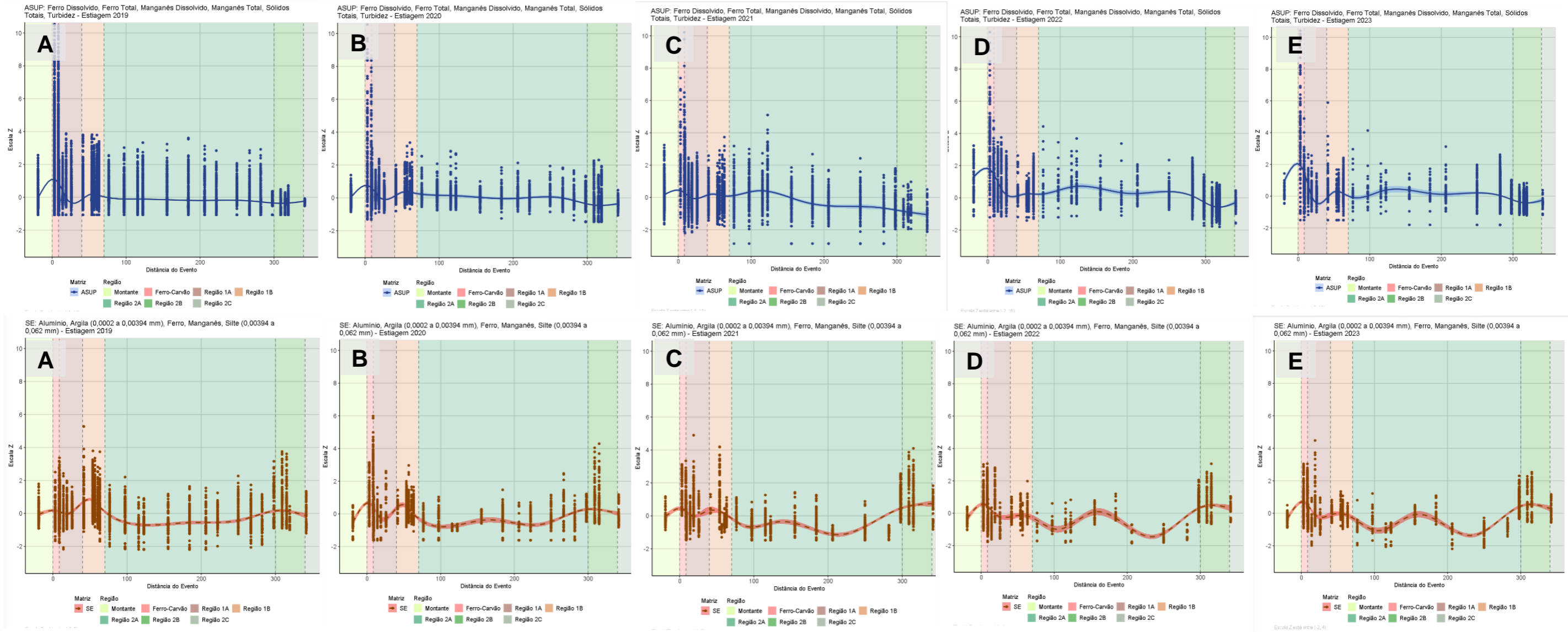
É importante considerar nesta análise o efeito da sazonalidade, no caso das precipitações. Enquanto o período de chuvas é o que mais agrega concentrações de materiais em suspensão na água, refletidas em suas frações totais, decorrentes de ressuspensão de materiais depositados na bacia, escoamentos superficiais e transporte de materiais de regiões alóctones, o período de estiagem é o que evidencia aumento na deposição dos sedimentos e pode proporcionar possíveis aumentos nas concentrações de sedimentos. Aspectos como a morfologia do corpo hídrico (declividade do rio, baixa sinuosidade na maioria das seções amostradas), estruturas de contenção (barramentos, pilares de pontes, estreitamento do canal ao longo do rio, reservatório e barragem), a própria capacidade de arraste do rio influenciado pelo aumento das vazões e níveis de água, levam a um potencial acúmulo sucessivo de sedimentos locais específicos entre os períodos sazonais.

Por fim, notou-se que a avaliação temporal mostrou redução nas concentrações na estiagem/2023, quando comparados com o início do monitoramento em 2019. Constatou-se, ao longo dos períodos sazonais, que nas regiões impactadas (Ferro-Carvão até 1B), as

concentrações dos metais continuaram mais elevadas, haja vista que a maior quantidade de rejeitos acumulados principalmente até o PT-15, na Região 1B.

Nesse sentido, o **Gráfico 14.3-4** aponta, de maneira geral, para a boa correlação de água e sedimentos até a estiagem/2020, sugerindo de fato uma influência dos rejeitos na qualidade da água e dos sedimentos, com sedimentos de fundo contribuindo para disponibilização de metais para a água, principalmente nos trechos mais impactados. Com o avanço para o período sazonal atual (2023), evidenciou-se também um certo desacoplamento das duas matrizes, com curvas de tendência apresentando padrões e concentrações diferentes para a maioria da bacia, tendo somente as regiões com maior presença de rejeito (Ferro-Carvão e 1B) preservado a influência mais marcante dos sedimentos na água superficial. Pontua-se, ainda, que avaliações mais detalhadas são necessárias e devem ser realizadas a fim de corroborar esses aspectos gerais identificados, a fim de compreender a dinâmica entre matrizes e entre frações (dissolvida e total), e complementar a avaliação ambiental para a bacia do rio Paraopeba.

Gráfico 14.3-4 Distribuição de diferentes parâmetros relacionados aos rejeitos nas matrizes de água superficial (azul) e sedimento (vermelho) do rio Paraopeba (até Região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de estiagem: 2019 (A), 2020 (B), 2021 (C), 2022 (D) e 2023 (E). Os valores das observações foram transformados em uma escala Z para fazer as variáveis comparáveis. A curva modelo de tendência é do tipo polinomial alisada *gam*.



14.4. Considerações

A análise integrada de água superficial e sedimento permitiu verificar as associações em termos de concentração entre as duas matrizes na bacia do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais. Percebeu-se que as concentrações, para as matrizes água superficial e sedimento, quando comparados com o início do monitoramento em 2019, têm apresentado redução dos principais metais associados à assinatura química do rejeito, ao longo do tempo e do espaço, e a dissipação da Turbidez, causada com o rompimento da barragem. Na estiagem/2023, notou-se, de modo geral, que há uma manutenção nos padrões de distribuição espacial dos parâmetros, em relação a estiagem/2022.

Na bacia do rio Paraopeba, desde antes do rompimento da barragem, ocorriam concentrações dos analitos majoritários (Manganês e Ferro) e traço (Ni, Cu e Pb), em água superficial e sedimento, em todas as regiões monitoradas, ou seja, de Montante até a Região 2C. Com o rompimento da barragem no período de chuva 2019, constatou-se um enriquecimento das concentrações dos parâmetros, com destaque para Fe, Mn, P, Cu, Ni e Pb, até quase a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, para águas com materiais em suspensão das barragens B1, B4, B4A até o ponto PT-21, e para sedimentos, até o PT-55.

A partir da estiagem/2019, percebeu-se que, para água superficial, as concentrações dos parâmetros majoritários se atenuaram com a dissipação das chuvas, redução do nível de água e da Turbidez. A condição de baixas velocidades associadas ao elevado fator de diluição e dispersão observado no ambiente de reservatório, promoveu atenuação/diluição dessas concentrações, sem a observância de alterações nos valores de concentrações para além do ponto de monitoramento PT-21 (Região 2B). Na estiagem/2022, foram identificados aumentos das concentrações entre as regiões Montante até a Região 1A, localmente em 1B e 2A para alguns parâmetros. Isso ocorre em função das chuvas intensas e contínuas que ocorreram no ciclo chuvoso de 2021/2022, que elevou o nível de água e vazões, onde rio Paraopeba permanece sob condição de desaguamento. Dessa forma, materiais em suspensão tenderam a aumentar a concentração na água.

Já para os sedimentos, na chuva 2019, enquanto as concentrações dos metais e Turbidez da água se dissiparam, houve aumento dos analitos (principalmente Mn, Pb, Ni, Cu) até a Região 1B. A Região 2A mostrou redução das concentrações dos elementos químicos a partir da chuva 2019/2020, enquanto nas regiões 2B e 2C, não afetadas pelos rejeitos, mostraram manutenção dos teores, controladas por fatores locais. Destaca-se ainda que os analitos avaliados (*i.e.* Fe, Al, Mn, As, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn, Cd e P) já haviam sido mapeados pela CPRM (2008, 2009), com ocorrência natural na bacia, antes do rompimento da barragem B1 e arraste de sedimentos das barragens B4 e B4A, sendo as maiores concentrações identificadas entre PT-03 (Região 1A) e PT-53 (Região 2A) para a maioria dos metais. Já o Al apresentou concentrações mais elevadas na porção centro-norte da bacia do rio Paraopeba, ou seja, depois da Região 1B. Após a estiagem/2019, até a estiagem/2023, os sedimentos mostraram, de modo geral, manutenção das concentrações de metais, porém inferiores às identificadas em 2019, principalmente entre os trechos Montante e 1B, incluindo regiões impactadas pelos rejeitos. Somente os trechos com retenção hidráulica, como o trecho Ferro-Carvão (Estaca Prancha),

1B (UTE Igarapé) e 2B (UHE Retiro Baixo), mostraram incremento ou manutenção das concentrações de metais e P em decorrência do acúmulo de sedimentos finos. Oscilações pontuais, com valores maiores em alguns pontos ao longo do tempo foram identificadas relacionadas principalmente a processos locais, à hidrodinâmica do rio, aporte de materiais e influência das precipitações. Além disso, é importante considerar que desde agosto/2020, os sedimentos passaram a ser coletados em margem de rio, onde há predomínio de sedimentos finos (silte e argila), enquanto em 2019, eram amostrados majoritariamente em centro de rio, onde predominam os sedimentos mais arenosos, o que pode influenciar nos resultados.

É importante ressaltar ainda que, na estiagem/2023, constatou-se que os sedimentos com característica química de rejeitos permanecem até o PT-15, localizado a jusante da UTE Igarapé. Nesta localidade, as características oscilam entre sedimentos naturais (estiagem/2021 e chuvas 2021/2022) e sedimentos com característica de rejeitos (estiagem/2022). Esse comportamento pode ser observado a partir da análise dos indicadores IRS1 e IRS2, detalhada no capítulo 13 do presente relatório de fechamento de ciclo de chuvas.

15. Referencial Bibliográfico

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Hidroweb – Séries Históricas das estações**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. 2019a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Ofício nº 65/2019/AA-CD-ANA**. Solicita informações sobre providências adotadas pela Vale. Brasil: ANA, 08 mar. 2019b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>. Acesso em: 22 dez. 2023a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema HIDRO - Telemetria**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>. Acesso em: 22 dez. 2023b.

AKOGLU, H. User's Guide to Correlation Coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, v. 18, n. 3, p. 91–93, set. 2018.

ARCADIS. **Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno. PMQS – Três Marias**. Abril/2023. 2023a.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba**. Relatório de Fechamento de ciclo de estiagem (25/01/2019 a 31/03/2023). Belo Horizonte, MG: 2023b.

ARCADIS, 2023c. **Dispersão de Rejeitos na Carga de Fundo do Rio Paraopeba após o Rompimento da Barragem B1, 3ª Campanha (2022) – Volume 3**. Belo Horizonte – MG.

ARCADIS. **Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno. PMQS – Três Marias**. Outubro/2022. 2022a.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba**. Relatório de Fechamento de ciclo de chuva (25/01/2019 a 30/09/2023). Belo Horizonte, MG: 2023a.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Relatório de Fechamento de ciclo de estiagem (25/01/2019 a 30/09/2022). Belo Horizonte, MG: 2022b.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Relatório de Fechamento de ciclo de chuva (25/01/2019 a 31/03/2022). Belo Horizonte, MG: 2022c.

ARCADIS. **Plano de reparação socioambiental da bacia do rio Paraopeba - Rompimento das Barragens B1, B4 e B4-A do Complexo Paraopeba II da Mina Córrego do Feijão.** Capítulo 2 - Caracterização socioambiental pós-rompimento e avaliação de impactos. Volume 2 - Caracterização socioambiental pós-rompimento. 2022d.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (25/01/2019 a 30/09/2021). Belo Horizonte, MG: 2021a.

ARCADIS. **Dispersão de Rejeitos na Carga de Fundo do Rio Paraopeba Após o Rompimento da Barragem B1, 2ª Campanha (2020).** Relatório técnico, volume 2. Belo Horizonte, MG: 2021b.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Relatório de fechamento de Ciclo de Chuva (25/01/2019 a 31/03/2021). Belo Horizonte, MG: 2021c.

ARCADIS. 2021d. **Relatório Executivo Consolidado Transporte e Deposição de Sedimentos e Rejeitos ao Longo do Rio Paraopeba e Reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias.** Belo Horizonte, MG: 2021d

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (janeiro/2019 a setembro/2020). Belo Horizonte, MG: 2020a.

ARCADIS. **Informe de análise estatística para background de sedimentos com base em dados históricos (2008-2009) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais para a bacia do rio Paraopeba.** Informe técnico. Belo Horizonte, MG: 2020b.

ARCADIS. **Caracterização geológica dos testemunhos de sondagem no rio Paraopeba – MG.** Relatório técnico interno. Belo Horizonte, MG: 2020c.

ARCADIS. **Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba.** Fechamento de ciclo de chuva (janeiro/2019 a março/2020) - Abril/2020. 2020d.

ARCADIS. **Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba.** Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a junho/2019) - Agosto/2019. 2019.

RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 30/09/2023)	CÓDIGO Vale 1.03.08.50435-QM-RT-0030-Rev.1	Folha 395 / 399
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0027-Rev.1	

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. 1 ed. Porto Alegre: Artmed, 2003. p. 264.

CAMPOS, L. F.B. **Da Sedimentação à Anquizona: Evolução dos pelitos neoproterozóicos do Grupo Bambuí definidas pela composição mineral e pelo índice de Kübler calibrado de acordo com o índice padrão de cristalinidade**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

CAMPOS, L. F. B.; GUIMARÃES, E. M. Petrografia, química mineral e geoquímica de filossilicatos como indicadores da proveniência dos sedimentos neoproterozoicos das formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade (Grupo Bambuí). **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 45, n. 3, p. e0707, 2018. DOI: 10.22456/1807-9806.91388. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/91388>. Acesso em: 22 dez. 2023.

CARVALHO, M.A. G. **Métodos Estatísticos para Análise de Dados de Monitoração Ambiental**. 2003. 135 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

CLEAN ENVIRONMENT BRASIL. Rede Hidrometeorológica Nacional. Sistema de Telemetria de Recursos Hídricos. 2023. Disponível em: <https://nocampo.clean.com.br/CleanViewer/default/index.jsp>. Acesso em: 31 mar. 2023.

CHRISTÓFARO, C.; LEÃO, M. M. D. Tratamento de dados censurados em estudos ambientais. **Química Nova**, vol. 37, n. 1, p.104-110, 1 jan 2014.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba**. In: Monitoramento Geoquímico: Relatório V. Belo Horizonte, MG: 2020.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba**. In: Monitoramento Geoquímico: Relatório III. Belo Horizonte, MG: 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Atlas geoquímico da Bacia do Rio São Francisco**. 2018.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 454, de 1º 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. 2012.

Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) & Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH/MG). **Deliberação normativa conjunta COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes

ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário do Executivo. Minas Gerais: 2022.

DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. **Technometrics**, v. 6, n. 3, p. 241-252. 1964.

GEOENVIRON, 2023. **Revisão do fingerprint geoquímico de rejeitos (IRS1 e IRS2) considerando misturas de rejeitos e sedimentos.** Belo Horizonte – MG.

GEOENVIRON, 2019. **Caracterização Geoquímica de Rejeitos Fase I – Composição Química Global, Análise Granulométrica e Classificação segundo a Norma NBR ABNT 10.004/200.** Nota Técnica - Dezembro/2019.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados.** 5.ed. Porto Alegre: Bookman. 593 p. 2005.

HELSEL, D.R., HIRSCH, R.M. **Statistical methods in water resources.** Techniques of Water Resources Investigations Series, Book 4, chapter A3, US Geological Survey, 2002, 510p.

IGAM, 2020a. *Informativo da avaliação dos sedimentos do rio Paraopeba nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 no município de Brumadinho - Minas Gerais.* Informativo n. 5. Período de 27 de janeiro de 2019 a 12 de março de 2020.

IGAM, 2020b - *Informativo dos parâmetros de qualidade das Águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho - Minas Gerais.* Abril /2020.

IGAM 2021a – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Nota Técnica nº 20/IGAM/GEMOQ/2021.* PROCESSO Nº 2090.01.0002169/2019-08. 2021.

IGAM 2021b – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Nota Técnica nº 32/IGAM/GEMOQ/2021.* PROCESSO Nº 2240.01.0000428/2019-10: Análise da qualidade das águas do rio Paraopeba após desastre na barragem BI. 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (Igam). **Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho Minas Gerais.** Informativo especial: avaliação da série histórica entre 2000 e 2018. Belo Horizonte, MG: 2019.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583–621, dez. 1952.

Agência RMBH, UFMG. 2017. **Processo de revisão do Plano Diretor - Assessoramento aos municípios/PDDI-RMBH**. Material de trabalho – Perfil Municipal. Prefeitura Municipal de Sarzedo. Disponível em:

http://www.rmbh.org.br/arquivos_biblioteca/PDRMBH_PRD04_SARZEDO_PM.pdf. Acesso em 09 jan. 2020.

MONTGOMERY D. G. *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th edn, Wiley, New York, 2009. 734 p.

ENTIRE. **Análise dos impactos de rejeitos em rompimentos de barragens para um ambiente aquático restaurado**. Relatório Semestral, Julho de 2023.

R CORE TEAM. **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

SABINO, C.V.S; LAGE, L.V.; ALMEIDA, K.C.B. (2014). Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [s.l.], v. 19, n., p. 87-94. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522014019010000588>.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, dez. 1968.

SHEEDER, S.A.; ROSS, J.D.; CARLSON, T.N. Dual urban and rural hydrographs signals in three small watersheds. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v.38, n.4, p.1027-1040, 2002.

DA SILVA, R. M. et al. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. **Natural Hazards**, v. 77, n. 2, p. 1205–1221, 15 fev. 2015.

TEC3 – Geotecnia e Recursos Hídricos. **Estudo conceitual mina córrego do Feijão – Caracterização hidrológica da bacia do rio Paraopeba**. Relatório Técnico. 2019.

Vale S.A. *Caracterização dos Rejeitos de Minério de Ferro da Mina Córrego do Feijão após o rompimento da Barragem I*. Relatório consolidativo dos resultados das análises solicitadas no Auto de Fiscalização 47.542/2019. Nova Lima, 10/02/2019.

Vale S.A. *Obras Emergenciais Planejadas / Realizadas no Ribeirão Ferro-Carvão Trecho 1 - Contenção / Remoção dos Rejeitos – Reabilitação da Drenagem*. Nova Lima, dezembro/2019.

VICQ, Raphael Ferreira da Costa. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (Background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. Tese

(Doutorado) - Escola de Minas, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

VICQ, R.; MATSCHULLAT, J., LEITE, M.G.P., NALINI JR, H.A. & LEÃO, L.P. Geochemical mapping of potentially hazardous elements in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 32, p. 243 – 267, 2018.

WENTWORTH, C. K. **A scale of grade and class terms for clastic sediments.** Journal of Geology, v. 30, n. 5, p. 377-392. 1922.