

RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)

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

CODIFICAÇÃO ARCADIS (1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3)

VALE S.A.

MAIO 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.	15/05/2023
Kátia M. Mellito	Geóloga, MSc.	
Caíque Cabral	Geólogo, MSc.	
Igor Moreira	Geólogo, MSc.	
João Cruz	Geógrafo	
Karla Oliveira	Engenheira Agrícola e Ambiental, MSc	
Larissa Faria	Engenheira Ambiental	
Larissa Leles	Geóloga	
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	
Ludmila Lage	Estatística	
Maria Luíza Batista	Engenheira Ambiental	
Milena Almeida	Engenheira Ambiental	
Milla Bittencourt	Engenheira Geóloga	
Priscilla Conegundes	Engenheira Ambiental	
Tassia Marques	Geóloga, MSc	
Verificadores	Áreas	Data da Verificação
Filipe Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc	30/06/2023
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
Igor de Camargo Moreira	Geólogo, MSc.	Igor.moreira@arcadis.com
João Cruz	Geógrafo e Técnico Ambiental	joao.cruz@arcadis.com
Kátia M. Mellito	Geóloga, MSc.	katia.mellito@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
Maria Luíza Batista	Engenheira Ambiental	maria.pinto@arcadis.com
Milena Almeida	Engenheira Ambiental	milena.almeirda@arcadis.com
Milla Bittencourt	Engenheira Geóloga	milla.bittencourt@arcadis.com
Priscilla Santana Conegundes	Engenheira Ambiental	priscilla.conegundes@arcadis.com
Tássia Marques	Geóloga, MSc.	tassia.marques@arcadis.com

Sumário executivo

O período de chuva 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 o acumulado total do período mais recente, percebe-se que as chuvas foram menos volumosas, em geral, quando comparadas ao período chuvoso 2021/2022, embora mais similares com o comportamento do período 2019/2020. No mesmo sentido, com o aumento das chuvas, percebe-se que há elevação dos níveis registrados a partir do mês de outubro, com valores mais elevados e variações mais notáveis em janeiro, seguido de decréscimo até o mês de março.

No que tange à evolução espaço-temporal da qualidade da água, considerando-se a avaliação dos períodos chuvosos, os comportamentos são variados e dependentes do trecho fluvial avaliado, tipo de parâmetro e de suas frações correspondentes. Notam-se, em geral, elevações das frações dissolvidas de Ferro e Alumínio ao longo do tempo, com relativo equilíbrio e ou redução nas chuvas 2022/2023, na maior parte das regiões, incluindo-se Montante e, em menor escala, para as regiões Ferro-Carvão e 1A. Para Manganês dissolvido, ao contrário, seus teores são mais elevados no ribeirão Ferro-Carvão e regiões 1A e 1B, considerados trechos mais afetados pelo rompimento, porém, com tendência de redução na maior parte da bacia. Quanto aos parâmetros totais, tendo em vista serem estes mais influenciados pelos eventos chuvosos em suas frações particuladas e com teores absolutos mais expressivos que os dissolvidos nessas condições sazonais, verificam-se condições de redução ou equilíbrio no decorrer do tempo, principalmente para Manganês e Ferro totais e, em menor grau, para Alumínio total que denota elevações em regiões tipicamente com presença de materiais com alumínio como 2A, 2B e 2C. Especificamente para Manganês total, os resultados de testes estatísticos indicam, para o período chuvoso 2022/2023, atingimento de igualdade (ausência de diferença significativa) com as concentrações dos respectivos *baselines* regionais, ao menos até a região 2A, incluindo-se a região Ferro-Carvão. No tocante ao Chumbo total, as maiores concentrações são evidenciadas no ribeirão Ferro-Carvão e nas regiões de Montante, 1B e 2A, mas com a maior parte dos resultados ainda aquém do limite legal. No caso do Fósforo total, seu comportamento é variado espacialmente com similaridade entre Montante e Ferro-Carvão e oscilações ao longo das regiões seguintes, relacionados a inúmeras potenciais fontes na bacia no decorrer temporal.

No período de chuva 2022/2023, observou-se, dentre os parâmetros monitorados, em geral, menores percentuais de violação aos limites legais em relação à chuva 2021/2022, entretanto, com permanência de desvios acima da condição do *baseline* sazonal, tal qual o período anterior. Manteve-se um maior quantitativo de violações para Ferro e Alumínio dissolvidos nas regiões do rio Paraopeba e Manganês total e Turbidez no Ferro-Carvão. Destaca-se, também, a ocorrência de maiores percentuais de violação para o parâmetro *E. coli* e Fósforo total ao

longo das regiões, destacando-se a influência de contribuições sanitárias. Dentre os parâmetros físico-químicos, em geral, nota-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, apenas o Chumbo e Níquel, em suas frações totais, foram evidenciados em diferentes regiões da bacia, enquanto os demais ocorreram apenas até a região 1A. A maior parte das inconformidades para os elementos traço também foram registradas nos seus respectivos pontos de *baseline* e em trecho de montante não afetado pelo rompimento. Em geral, não houve persistência de valores elevados destes 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 rio Betim, de caráter urbano, e o ribeirão dos Gomes 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 de metais, 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 da UHE de Retiro Baixo, ambiente mais lântico e favorável à deposição de sedimentos) também ocorreram maiores concentrações, com destaque para Alumínio, Arsênio, Cromo, Cobre e Níquel. As concentrações dos metais avaliados nos sedimentos, ao longo dos períodos de chuva têm mantido comportamento geral de manutenção/equilíbrio. Em alguns locais de retenção hidráulica como no Ferro-Carvão, percebeu-se uma tendência de aumento ao longo do tempo, para alguns elementos, são eles: Alumínio (exibindo ao longo das chuvas avaliadas, medianas abaixo do valor de referência de Vicq (2015); Cobre (exibindo medianas superiores ao VOR 1 e P75 inferiores ao VOR 2); e Arsênio (exibindo grande parte dos valores medianos entre o VOR 1 e VOR 2, e a maior parte das concentrações máximas superiores ao VOR 2. Contudo, reforça-se que na chuva 2022/2023 o aumento das concentrações de metais em alguns trechos, pode estar relacionado ao transporte de materiais decorrentes do período de chuva 2021/2022, em que houve aumento das vazões e nível de água do período que transportou o material, sedimentou com a redução das vazões no período de estiagem e aumentou com as variações de vazões do período seguinte.

Em termos de distribuição granulométrica, notou-se predominância de sedimentos mais finos na maioria das regiões da bacia para o início do período de chuva 2019/2020, o que pode estar relacionada ao rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4A, resultando em um acúmulo dos rejeitos, principalmente nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. Para os anos subsequentes (2020 a 2023), houve padrão sedimentar diferente, com aumento gradativo de frações arenosas nos trechos mais lóticos do rio, preservando sedimentos finos (silte e argila)

nas regiões mais sinuosas e de retenção hidráulica (Ferro-Carvão, UTE Igarapé, na região da UHE Retiro Baixo, entrada do reservatório da UHE Três Marias). Nesse sentido, a predominância de sedimentos de frações finas (composto por argila e silte), nas regiões Ferro-Carvão, 1B, localmente na 2A e 2B (UHE Retiro Baixo), ocorre normalmente associado a maiores concentrações de metais prioritários (Fe, Al, Mn), e traço (Ni, Cu, As, Cr e Pb), comum a esses trechos ao longo do período analisado. Em relação as regiões 2D e 3, de modo geral, observa-se o predomínio de sedimentos finos, em todos os períodos de chuva monitorados. A região 2D exibe comportamento similar durante os períodos avaliados, com predomínio de sedimentos finos, já a região 3 mostra diversidade nas concentrações granulométricas, principalmente a partir do período chuvoso 2020/2021, onde observa-se aumento de frações arenosas. Em 2021/2022 o PT-32 (região 3) apresenta predomínio de frações arenosas (> 95%), no entanto, no período seguinte e atual (2022/2023), nota-se redução dos sedimentos arenosos apresentando 55% de areia.

Na avaliação da estatística dos períodos de chuva no espaço e tempo, com o auxílio dos Boxplots, juntamente com a avaliação estatística espaço temporal com o método Kruskal Wallis, percebeu-se que houve equilíbrio nas concentrações de metais nos sedimentos ao longo do tempo e, principalmente, nos últimos ciclos de chuva 2021/2022 e 2022/2023, desde a região de montante até a região 2B. Nestas regiões, percebeu-se alguma variabilidade nos resultados para algumas substâncias, porém, as variações foram poucos significativas e, portanto, não foram verificadas alterações no período.

As variações no comportamento dos sedimentos para a região montante estão relacionadas ao parâmetro Ferro, enquanto na região Ferro-Carvão, a variabilidade ocorreu para Cd e Cr. Na região 1A as oscilações relacionaram-se ao Mn, P, Cu e As. Por outro lado, na região 1B e 2A não houve variabilidade significativa para os parâmetros avaliados, em contrapartida, na região 2B observou-se oscilações para Cr, Ni, P e Al. A região 2C foi a que demonstrou maior variabilidade nos resultados e de forma significativa para Mn, Fe, Al, As, Cu, Cr, Ni e P, o que sugere contribuições locais associadas ao uso e ocupação do solo, áreas desnudas com erosões marginais como contribuintes para tais oscilações.

A avaliação de tendência sazonal realizada para os sedimentos com o método de Mann Kendall foi complementar a estatística anterior ponto a ponto, seja do ciclo de chuvas de 2022/2023 ou para a série completa (todos os ciclos), 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, tem indicado redução na característica química de rejeito nos trechos mais afetados mostrando tendência de redução nas concentrações ao longo dos ciclos sazonais. 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 equilíbrio nas concentrações das substâncias avaliadas.

Ao se considerar os valores orientadores para a qualidade dos sedimentos, no período de chuva 2022/2023, constatou-se que as regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2B apresentaram as maiores persistências de elementos com concentrações acima dos valores de referência. Em linhas gerais, neste período, Manganês e Alumínio ultrapassaram os valores de referência de Vicq (2015) e Arsênio, Cádmiio, Chumbo, Cobre, Cromo e Níquel ficaram acima dos valores orientadores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Destaca-se, ainda, que a presença de Manganês ocorre 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 (ambos), 1A (Cd) e 2B (Pb). Em relação ao valor orientador do nível 2, ocorreram desvios para Arsênio nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B; Cromo na região 2B; Níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2B. Em relação as regiões 2D e 3, para VOR 1 o único parâmetro que se apresentou acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 foi o Cromo (região 2D), e para VOR 2, cádmio, níquel e zinco, na região 3. As regiões 2D e 3 não tiveram influência do rompimento da barragem e as concentrações identificadas estão associadas a contribuições e fontes locais.

Com relação aos Índices Rejeito-Sedimento (IRS1 e IRS2), foi possível estabelecer característica química de rejeitos ou natural para os sedimentos da bacia do rio Paraopeba, ao longo dos períodos sazonais avaliados. Os valores obtidos para os índices químicos composicionais indicaram, em geral, a presença de sedimentos com características químicas de rejeitos até região 2A (PT-55) na chuva/2019, relacionada a massas brutas do rejeito (até Região 1B) e, também, ao transporte e deposição de partículas em suspensão (até Região 2A). Entre as chuvas de 2019/2020 e chuva 2020/2021, a assinatura de rejeito foi evidenciada até o final da região 1B (PT-15), enquanto nos demais locais (a jusante do PT-15), a assinatura permaneceu como de sedimentos com característica química natural. Durante a estiagem 2021 e chuva 2021/2022 houve restrição da distribuição de sedimentos com característica química de rejeitos, até o PT-14 (UTE Igarapé). Possivelmente, as chuvas intensas de 2021/2022 e aumento nas vazões refletiram e afetaram a região, onde ocorreu maior transporte de materiais e erosão de depósitos mais antigos a jusante, indicando reaparecimento do rejeito a jusante da UTE Igarapé até o PT-15. Esse comportamento é observado na estiagem/2022 e seguiu no período de chuva 2022/2023.

A análise integrada indicou baixa associação entre os metais em água superficial e sedimentos para a chuva 2022/2023. 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, ocorriam concentrações 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 de 2019 percebeu-se que, para água superficial, as concentrações dos principais parâmetros majoritários 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 chuva 2022/2023. 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 chuva de 2022/2023, notou-se, de modo geral, que há uma manutenção nos padrões de distribuição dos parâmetros nas regiões, com leve incremento, relacionado às chuvas mais intensas e duradouras de 2021/2022 e do período de estiagem de 2022.

Índice

1. Introdução.....	26
2. Contextualização da evolução da qualidade da água superficial e dos sedimentos	28
3. Premissas gerais.....	36
3.1. Recorte dos Dados	36
3.2. Caracterização da Área de Estudo.....	36
3.3. Caracterização do Rejeito	37
3.4. Campanhas de Monitoramento.....	37
3.5. <i>Baselines</i>	38
3.6. Limites de Quantificação (LQ)	39
3.7. Avaliação QAQC.....	40
3.8. Situação da pluma original	40
3.9. Padrões de qualidade	41
4. Caracterização hidrológica	43
4.1. Contextualização.....	43
4.2. Rio Paraopeba	47
4.3. Ribeirão Ferro-Carvão	61
4.4. Considerações	65
5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de chuva tendo em vista o baseline (sazonal) do corpo hídrico	66
5.1. Objetivo	66
5.2. Metodologia	66
5.2.1. Estatística descritiva e inferencial	66
5.2.2. Análise de tendência temporal	68
5.2.3. Mapas temáticos	72
5.3. Resultados e discussão	73
5.3.1. Análise de Cluster	73
5.3.2. Estatística descritiva e inferencial	74
5.3.3. Análise de tendência temporal	104
5.3.4. Mapas temáticos - <i>baseline</i>	109
5.4. Considerações	115
6. Evolução das violações da água superficial aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba	118
6.1. Objetivo.....	118
6.2. Metodologia	118

6.3. Resultados e discussão	118
6.3.1. Análise de violação aos padrões legais por períodos sazonais de chuva.....	118
6.3.2. Mapas temáticos - VMP	136
6.4. Considerações	142
7. Qualidade da água no reservatório de Retiro Baixo e no trecho de jusante na bacia do rio Paraopeba	144
7.1. Objetivo	144
7.2. Metodologia	144
7.3. Resultados e discussão	145
7.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo	145
7.3.2. Comportamento da qualidade da água a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo nos diferentes períodos sazonais.....	149
7.4. Considerações	155
8. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos	157
8.1. Objetivo	157
8.2. Metodologia	157
8.3. Resultados e discussão	161
8.4. Considerações	175
9. Comportamento dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais	176
9.1. Objetivo	176
9.2. Metodologia	176
9.3. Resultados e discussão	178
9.3.1. Ribeirão Sarzedo (TT-02).....	178
9.3.2. Rio Betim (TT-01).....	187
9.3.3. Ribeirão das Abóboras (TT-05).....	195
9.3.4. Ribeirão dos Gomes (CE-01)	204
9.4. Considerações	213
10. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba	216
10.1. Objetivo	216
10.2. Metodologia	216
10.3. Resultados	216
10.4. Considerações	226
11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de chuva até 2023	227
11.1. Objetivo	227

11.2. Metodologia	227
11.3. Método da Estatística descritiva e inferencial	227
11.3.1. Análise de tendência temporal	228
11.4. Resultados e discussão	230
11.4.1. Análise de cluster	230
11.4.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial	231
11.4.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall	280
11.5. Considerações	290
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 chuvosos de 2019 a 2023 ao longo do rio Paraopeba	293
12.1. Objetivo	293
12.2. Metodologia	293
12.3. Resultados e discussão	294
12.3.1. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos	308
12.4. Considerações	329
13. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais	331
13.1. Objetivo	331
13.2. Metodologia	331
13.3. Análise dos resultados	334
13.3.1. Avaliação por período sazonal	334
13.3.2. Avaliação do comportamento químico do rejeito com os índices IRS1 e IRS 2 por ponto de monitoramento	343
13.4. Considerações	350
14. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais	352
14.1. Objetivo	352
14.2. Metodologia	352
14.3. Resultados e discussão	353
14.4. Considerações	366
15. Referencial Bibliográfico	368

Lista de Figuras

Figura 4.1-1 Estações fluviométricas e pluviométricas localizadas na região de interesse.....	44
Figura 4.1-2 Isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba - período 1942 – 2018	45
Figura 4.3-1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores.....	62
Figura 5.2.2-1 Série temporal de manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos)	70
Figura 5.2.2-2 Série temporal de manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos)	70
Figura 5.2.2-3 Série temporal de manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais).....	71
Figura 5.3-1 Dendograma da análise de Cluster para a matriz água superficial	73
Figura 5.3.4-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do <i>baseline</i>	110
Figura 5.3.4-2 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do <i>baseline</i>	111
Figura 5.3.4-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do <i>baseline</i>	112
Figura 5.3.4-4 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do <i>baseline</i>	113
Figura 5.3.4-5 Mapa de comparação dos teores máximos de Chumbo total com os máximos do <i>baseline</i>	114
Figura 5.3.4-6 Mapa de comparação dos teores máximos de Fósforo total com os máximos do <i>baseline</i>	115
Figura 6.3.2-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP.....	138
Figura 6.3.2-2 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP	139
Figura 6.3.2-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP	140
Figura 6.3.2-4 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP.....	141
Figura 6.3.2-5 Mapa de comparação dos teores máximos de Chumbo total com o VMP	142
Figura 8.2-1 Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água.....	160
Figura 11.4.1-1 Análise de Cluster dos sedimentos considerando todos os pontos de monitoramento agrupados até a UHE Retiro Baixo considerando a obrigatoriedade de remoção dos pontos de monitoramento sem os resultados analíticos	231

Figura 12.3.1-1 Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	310
Figura 12.3.1-2 Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	312
Figura 12.3.1-3 Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	314
Figura 12.3.1-4 Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	316
Figura 12.3.1-5 Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	318
Figura 12.3.1-6 Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	319
Figura 12.3.1-7 Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	321
Figura 12.3.1-8 Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	323
Figura 12.3.1-9 Evolução do Cádmiio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	325
Figura 12.3.1-10 Evolução do Fósforo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	326
Figura 12.3.1-11 Evolução do Zinco no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	327
Figura 12.3.1-12 Evolução do Mercúrio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.....	328
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.....	331
Figura 13.2-2 Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis (2020a).....	332
Figura 13.2-3 Diagrama dos índices composicionais IRS1 e IRS2 para dados de sedimentos de corrente localizados a montante e a jusante da UTE Igarapé, com uso dos dados de sedimentos de corrente avaliados com o XRF.....	333
Figura 13.3.1-1 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019.....	335
Figura 13.3.1-2 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2019.....	336
Figura 13.3.1-3 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020.....	337

Figura 13.3.1-4 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem de 2020	338
Figura 13.3.1-5 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021	339
Figura 13.3.1-6 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2021.....	340
Figura 13.3.1-7 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022	341
Figura 13.3.1-8 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2022.....	342
Figura 13.3.1-9 Avaliação dos índices IRS1 e IRS2 nas regiões Montante a 2C no período de chuva de 2022/2023	343
Figura 13.3.2-1 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-02.....	345
Figura 13.3.2-2 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-14.....	346
Figura 13.3.2-3 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-15.....	347
Figura 13.3.2-4 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-49.....	348
Figura 13.3.2-5 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-55.....	349
Figura 13.3.2-7 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-20.....	350
Figura 13.3.2-8 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-21.....	350

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 chuva 2018/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023	51
Gráfico 4.2-3 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação Belo Vale	53
Gráfico 4.2-4 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação Alberto Flores	53
Gráfico 4.2-5 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação Ponte Nova do Paraopeba	54
Gráfico 4.2-6 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba.....	54
Gráfico 4.2-7 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação UHE Retiro Baixo Montante	55
Gráfico 4.2-8 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação UHE Retiro Baixo Jusante.....	55
Gráfico 4.2-9 Chuvas do período de 01/agosto (2019)* a 31/março (2023) na estação AUT_JRB-01	56
Gráfico 4.2-10 Operação da UHE Retiro Baixo nos períodos de chuva tendo em vista as vazões vertidas, turbinadas e defluentes.	58
Gráfico 4.2-11 Variação de nível/cota nos períodos de chuva nas estações fluviométricas do rio Paraopeba	59
Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva de 2018/2019 a 2022/2023.....	63
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.....	64
Gráfico 5.3.2.1-1 <i>Boxplots</i> Manganês total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala fixa	76
Gráfico 5.3.2.1-2 <i>Boxplots</i> Manganês total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala ajustada e variável	76
Gráfico 5.3.2.1-3 <i>Boxplots</i> Manganês dissolvido para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala fixa.....	78
Gráfico 5.3.2.1-4 <i>Boxplots</i> Manganês dissolvido para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala ajustada e variável.....	78

Gráfico 5.3.2.2-1 <i>Boxplots</i> Ferro total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala fixa	82
Gráfico 5.3.2.2-2 <i>Boxplots</i> Ferro total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, com escala ajustada e variável	82
Gráfico 5.3.2.2-3 <i>Boxplots</i> Ferro dissolvido para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	84
Gráfico 5.3.2.2-4 <i>Boxplots</i> Ferro dissolvido para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	84
Gráfico 5.3.2.3-1 <i>Boxplots</i> Alumínio total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	90
Gráfico 5.3.2.3-2 <i>Boxplots</i> Alumínio total para os períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	90
Gráfico 5.3.2.3-3 <i>Boxplots</i> Alumínio dissolvido para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	92
Gráfico 5.3.2.3-4 <i>Boxplots</i> Alumínio dissolvido para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	92
Gráfico 5.3.2.4-1 <i>Boxplots</i> Turbidez para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	95
Gráfico 5.3.2.4-2 <i>Boxplots</i> Turbidez para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	95
Gráfico 5.3.2.5-1 <i>Boxplots</i> Chumbo total para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	98
Gráfico 5.3.2.5-2 <i>Boxplots</i> Chumbo total para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	98
Gráfico 5.3.2.6-1 <i>Boxplots</i> Fósforo total para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa	101
Gráfico 5.3.2.6-2 <i>Boxplots</i> Fósforo total para períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável	101
Gráfico 7.3.1-1 Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02	146
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	146
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	147
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	147
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	148

Gráfico 7.3.1-6 Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período chuvoso de 2022/2023	149
Gráfico 7.3.2-1 Boxplots dos resultados de Al dissolvido dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	151
Gráfico 7.3.2-2 <i>Boxplot</i> dos resultados de Fe dissolvido dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	152
Gráfico 7.3.2-3 <i>Boxplot</i> dos resultados de Mn total dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	153
Gráfico 7.3.2-4 <i>Boxplot</i> dos resultados de Turbidez dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	154
Gráfico 7.3.2-5 <i>Boxplot</i> dos resultados de Chumbo total dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar	155
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	163
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	165
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	166
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	167
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 chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	170
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 chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	171

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 chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	172
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 chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear	173
Gráfico 9.3.1-1 Percentuais de violações nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	178
Gráfico 9.3.1-2 <i>Boxplots</i> - TT02	184
Gráfico 9.3.2-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	187
Gráfico 9.3.2-2 <i>Boxplots</i> - TT01	193
Gráfico 9.3.3-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba	196
Gráfico 9.3.3-2 <i>Boxplots</i> - TT05	202
Gráfico 9.3.4-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.....	205
Gráfico 9.3.4-2 <i>Boxplots</i> - CE-01	211
Gráfico 10.3-1 Variação granulométrica no período de janeiro/2019 a março/2019.....	221
Gráfico 10.3-2 Variação granulométrica no período de outubro/2019 a março/2020	222
Gráfico 10.3-3 Variação granulométrica no período de outubro/2020 a março/2021	223
Gráfico 10.3-4 Variação granulométrica no período de outubro/2021 a março/2022.....	224
Gráfico 10.3-5 Variação granulométrica no período de outubro/2022 a março/2023.....	225
Gráfico 11.4.2.1-1 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.....	235
Gráfico 11.4.2.1-2 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável	235
Gráfico 11.4.2.1-3 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	240
Gráfico 11.4.2.1-4 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	240
Gráfico 11.4.2.1-5 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	245

Gráfico 11.4.2.1-6 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	245
Gráfico 11.4.2.2-1 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	250
Gráfico 11.4.2.2-2 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	250
Gráfico 11.4.2.2-3 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	255
Gráfico 11.4.2.2-4 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	255
Gráfico 11.4.2.2-5 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	260
Gráfico 11.4.2.2-6 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	260
Gráfico 11.4.2.2-7 Variação do Cádmiio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	264
Gráfico 11.4.2.2-8 Variação do Cádmiio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	264
Gráfico 11.4.2.2-9 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	269
Gráfico 11.4.2.2-10 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	269
Gráfico 11.4.2.2-11 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	273
Gráfico 11.4.2.2-12 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	273
Gráfico 11.4.2.3-1 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período	278
Gráfico 11.4.2.3-2 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável.....	278
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 chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 gama.	356
Gráfico 14.3-2 Distribuição de metais nos sedimentos do rio Paraopeba (até região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 gama.....	359

Gráfico 14.3-3 Distribuição de metais na água superficial do rio Paraopeba (até região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 gama. 362

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 chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 gama. 365

Lista de Tabelas

Tabela 1-1 Tabela resumo das alterações dos planos de monitoramento PME.....	26
Tabela 3.5-1 - Regiões e pontos analisados frente às violações aos limites legais.	38
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.....	39
Tabela 3.8-3 - Datas da passagem da Pluma de Turbidez.....	40
Tabela 4.1-1 - Estações hidrometeorológicas localizadas na região do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba.....	43
Tabela 4.1-2 Vazões médias mensais, $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{mlt} (m^3/s) na calha principal do rio Paraopeba	46
Tabela 4.2-1 - Estações de referência para a avaliação dos registros hidrométricos.	47
Tabela 5.3.2.1-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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	77
Tabela 5.3.2.1-3 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Manganês dissolvido	79
Tabela 5.3.2.1-4 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região.....	79
No conjunto entre o Gráfico 5.3.2.2-1 e o Gráfico 5.3.2.2-4 são apresentados os <i>Boxplots</i> 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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.....	81
Tabela 5.3.2.2-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro total	83
Tabela 5.3.2.2-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região.....	83
Tabela 5.3.2.2-3 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro dissolvido.....	85
Tabela 5.3.2.2-4 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região	85

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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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.....89

Tabela 5.3.2.3-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio total.....91

Tabela 5.3.2.3-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região91

Tabela 5.3.2.3-3 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio dissolvido.....93

Tabela 5.3.2.3-4 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região.....93

Tabela 5.3.2.4-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Turbidez.....96

Tabela 5.3.2.4-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Turbidez em cada região.....96

Tabela 5.3.2.5-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Chumbo total.....99

Tabela 5.3.2.5-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo total em cada região.99

Tabela 5.3.2.6-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Fósforo total..... 102

Tabela 5.3.2.6-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região..... 102

Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados na Tabela 5.3.3-1 considerando a série completa de dados (todos os períodos sazonais de chuva e de estiagem desde 25/01/2019 até 31/03/2023) e, na Tabela 5.3.3-2, para a série de chuva (todos os períodos de chuva, desde 2019 até 2023). 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 podem ser consultados no Anexo IV-D. Ademais, como complemento, os resultados e discussões referentes às séries de estiagem podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (25/01/2019 a 30/09/2022) (ARCADIS, 2022b). 104

Tabela 5.3.3-1 - 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 31/03/2023) – medianas mensais	105
Tabela 5.3.3-2 - Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) – medianas mensais.....	106
Tabela 6.3.1-1 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Montante119	
Tabela 6.3.1-2 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Ferro Carvão	119
Tabela 6.3.1-3 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 1A	119
Tabela 6.3.1-4 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 1B	119
Tabela 6.3.1-5 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2A	119
Tabela 6.3.1-6 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2B	119
Tabela 6.3.1-7 Parâmetros violados <i>baseline</i> Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2C	119
Tabela 6.3.1-8 - Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco no período de chuva 2022/2023.....	127
Tabela 8.2-1 - Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos	158
Tabela 8.2-2 - Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão	159
Tabela 8.2-3: Data de início das operações de cada estação telemétrica.....	160
Tabela 8.3-1 - Resultados de R ² para as relações de Turbidez com a fração dissolvida dos metais	162
Tabela 8.3-2 - Resultados de R ² das relações de Turbidez com as frações totais dos metais traçadores	162

Tabela 9.2-1 - Tributários e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba	177
Tabela 9.3.1-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo	186
Tabela 9.3.2-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim.....	195
Tabela 9.3.3-1- Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras.....	204
Tabela 9.3.4-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes	213
Tabela 11.4.2.1-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Manganês.	236
Tabela 11.4.2.1-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês em cada região.....	236
Tabela 11.4.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro.....	241
Tabela 11.4.2.1-4 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro em cada região.241	
Tabela 11.4.2.1-5 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio.	246
Tabela 11.4.2.1-6 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio em cada região.....	246
Tabela 11.4.2.2-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Chumbo.	251
Tabela 11.4.2.2-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo em cada região.....	251
Tabela 11.4.2.2-3 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cobre.	256
Tabela 11.4.2.2-4 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cobre em cada região.256	
Tabela 11.4.2.2-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Níquel.....	261
Tabela 11.4.2.2-6 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Níquel em cada região.261	

Tabela 11.4.2.2-7 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cádmio.....	265
Tabela 11.4.2.2-8 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cádmio em cada região.....	265
Tabela 11.4.2.2-9 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Arsênio.	270
Tabela 11.4.2.2-10 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Arsênio em cada região.....	270
Tabela 11.4.2.2-11 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cromo	274
Tabela 11.4.2.2-12 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cromo em cada região.....	274
Tabela 11.4.2.3-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Fósforo.	279
Tabela 11.4.2.3-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo em cada região.....	279
Tabela 11.4.3-1 - 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 31/03/2023) – medianas mensais	281
Tabela 11.4.3-1 - Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da sedimentos para a série de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) – medianas mensais.....	282
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 chuva 2022/2023.....	295
Tabela 12.3-2 - Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para a chuva 2022/2023.....	296

Lista de Anexos

- ANEXO I - Planos de Monitoramento
- ANEXO II - Caracterização geral da área de estudo
- ANEXO III - Garantia e Controle de Qualidade - QAQC
- ANEXO IV - Gráficos Boxplots, Tabelas de estatísticas descritivas, resultados dos testes estatísticos
 - ANEXO IV A - Boxplots Rio Paraopeba
 - ANEXO IV B - Boxplots Tributários
 - ANEXO IV C - Tabelas de estatísticas descritivas
 - ANEXO IV D - Resultados dos testes estatísticos
- ANEXO V - Tabelas de Variação de concentração
- ANEXO VI - Mapas temáticos da bacia
 - ANEXO VI A - Mapas *baseline*
 - ANEXO VI B - Mapas VMP
 - ANEXO VI C - Tabelas de frequência de aproximação de *baseline*
- ANEXO VII - Concentrações máximas dos parâmetros nos pontos de captação
- ANEXO VIII - Mapas de Sedimentos
- ANEXO IX - Análise da qualidade da água superficial e sedimentos nas regiões 2D e 3

1. Introdução

A Arcadis Logos S.A. (Arcadis Brasil) foi contratada pela VALE S.A. (Vale) para assessorar no processo de armazenamento em banco de dados, validação e avaliação dos resultados analíticos contemplados no “Plano de Monitoramento Emergencial da Qualidade da Água e Sedimento (Plano Emergencial)”. Os dados analisados neste relatório utilizaram como referência as versões 24, 25, 26 e 27 (Anexo I) do referido plano (VALE, 2022; 2023), cuja execução vem ocorrendo desde a data de 25/01/2019 e o plano é atualizado conforme necessidades específicas. Destaca-se, por fim, protocolo da versão 27 do plano no dia 30/03/2023, através da Carta C.EXT.0335/2023. Na **Tabela 1-1** é apresentado resumo das principais alterações por plano.

Tabela 1-1 Tabela resumo das alterações dos planos de monitoramento PME.

Resumo das revisões/alinhamentos dos planos de monitoramento		
Versão	Revisão/Alinhamento	Data
27	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atualização da coordenada do ponto PT-61; ▪ Exclusão do ponto PT-47E 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
26	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inserção dos pontos PT-59, PT-60, PT-61 e PT-62 na malha amostral do PME a partir do dia 28/02/2023, para as matrizes ASUP e SE, com frequência mensal, em atendimento a proposição da AECOM feita através do Relatório de Auditoria 46 (60612553-ACM-DM-ZZ-RP-PM-0046-2022) e da NT Nº 60612553-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0028-2022. 	17/02/2023
25	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alteração da frequência dos pontos de monitoramento do PME para o período chuvoso, conforme informado nas cartas C.EXT. 1090/2022 e 1091/2022, nas erratas C.EXT. 1105/2022 e 1106/2022, e aceite do órgão através do Ofício FEAM/GERAI nº.142/2022 e do Memorando IGAM/GEMOQ. Nº 142/2022. 	14/10/2022

Resumo das revisões/alinhamentos dos planos de monitoramento		
Versão	Revisão/Alinhamento	Data
24	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inserção de coordenadas alternativas (1 e 2) para a matriz ASUP no ponto PT-48, durante o período de estiagem ou em momentos em que não houver condições de se navegar até o ponto. ▪ Inserção de nota sobre coleta em coordenada alternativa, durante o período de estiagem ou em momentos em que não houver condições de se navegar até o ponto, para a matriz SE do ponto PT-48. ▪ Inclusão do ponto JRB-02 na malha amostral do PME, para as matrizes de água superficial e sedimento com frequência semanal, em atendimento ao proposto pela AECOM no Relatório 60622935-ACM-DM-ZZ-RP-PM-0031-2022 (julho/2022). 	18/08/2022

O presente documento, denominado Relatório de Fechamento de Ciclo de Qualidade da Água Superficial e Sedimentos apresenta uma análise sistêmica da evolução dos resultados analíticos da qualidade da água e de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba até o a jusante do reservatório de Três Marias na confluência entre rio São Francisco e rio Abaeté.

Objetiva-se a análise das alterações nos resultados analíticos em comparação ao *baseline* de dados históricos da região ao longo do período compreendido entre janeiro/2019 e março/2023, com foco nos períodos sazonais de chuva. Ademais, visa por meio de diversos formatos de apresentação dos resultados, a interpretação e a proposição de hipóteses sobre a influência do rompimento da barragem B1, e galgamento de material das barragens B4 e B4-A e dos fatores externos sobre as alterações específicas na qualidade da água e sedimentos.

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 se baseia 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.

Recentemente, por solicitação da equipe da AECOM, o parâmetro Fósforo foi adicionado às avaliações em detalhe da qualidade das águas e sedimentos, por uma possível relação das alterações das suas concentrações com o rejeito. Importante ressaltar que após o rompimento da barragem foi observado um 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, porém com variações ao longo dos diferentes períodos sazonais avaliados. O estudo GEOENVIRON (2019) apontou a presença de baixos conteúdos de Fósforo no rejeito, assim como o estudo de ARCADIS (2020) sobre a caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba. Ainda, o projeto ENTIRE (2022), através de modelagem de Fósforo em água superficial, indicou relação das concentrações com o rejeito. Dessa forma, o Fósforo foi avaliado de forma mais detalhada para identificação de seu comportamento espaço-temporal no rio Paraopeba em função do rompimento da barragem.

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. Dessa forma, visando um melhor entendimento sobre o comportamento do Fósforo no rio Paraopeba após o rompimento da barragem, 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 promoveram atenuações dessas concentrações sem a observância de alterações nos valores desses parâmetros para além do ponto de monitoramento PT-21, tendo este ponto, a partir da terceira semana de maio/2019, atingido as condições de *baseline* na água, marcando, portanto, o limite da região impactada pela pluma. Já em relação à evolução dos sedimentos, a chuva/2019 registrou concentrações altas para Mn, Fe, Pb, Ni, Cu, 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 da barragem B1, e galgamento de material das barragens 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 de 2019 alteraram pontualmente o comportamento dos teores destes elementos, como foi notado em maio e em setembro de 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 de 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 de 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 de 2019. Importante destacar que todos esses elementos estavam presentes na bacia antes mesmo do rompimento da barragem 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 Al apresentou concentrações mais elevadas na porção centro-norte da bacia, haja vista as características litológicas regionais contendo metassedimentos do Grupo Bambuí e granitoides sin-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.

No tocante aos sedimentos de fundo, comparando-se o período de chuva 2019/2020 com o período de chuva/2019, observou-se que todos os parâmetros analisados apresentaram variações significativamente inferiores e superiores nesse período, e que, somente para o parâmetro Cobre, não foram observadas diferenças significativamente superiores entre esses períodos, mostrando assim, diferenças significativamente inferiores e, por vezes, não foram observadas diferenças significativas nas concentrações.. Neste período, e semelhante aos anteriores, as regiões 1A e 1B, que 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. Neste período sazonal, os resultados dos índices químicos composicionais também mostraram redução nos índices IRS 1 e IRS 2 em toda a bacia neste mesmo período (ARCADIS, 2021a), incluindo as amostras localizadas entre a confluência do Ferro-Carvão com o rio Paraopeba até a região 1B, apesar de manterem ainda característica química composicional de rejeito, enquanto, após o PT-15, a característica do sedimento foi classificada como natural.

Ao final de março de 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 de 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, desde o 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 é inferior aos meses anteriores reportados quando as amostragens ainda eram realizadas diariamente.

No mesmo período, para os sedimentos, quando comparado com a estiagem de 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 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 ciclo de 2019 e foi 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 galgamento de material das barragens B4 e B4-A.

Sequencialmente, o período de estiagem de 2021 foi marcado por uma redução da pluviometria em relação ao período de estiagem anterior. Com a diminuição das chuvas na bacia do rio Paraopeba, aliada às reduções dos níveis de água e escoamento superficial, há 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 reflexos de alterações de condições físico-químicas que alcançam 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 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 já proporciona 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. Para os 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 compara-se com os períodos chuvosos dos anos anteriores. Com relação aos sedimentos de fundo, o ciclo de chuva 2021/2022 também não mostrou comportamento diferente dos já observados nos períodos de chuva anteriores.

Em relação ao período de estiagem/2022, este se caracterizou por um novo estágio de diminuição da pluviometria, dos níveis de água e escoamento superficial para a bacia, porém foi possível perceber que a fase de recessão hidrológica típica do período apontou 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 de 2019 na região mais impactada do ribeirão Ferro Carvão. Os teores de Turbidez, também, mostraram aumento considerável dos valores em relação à estiagem de 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 de 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 analitos analisados. Os teores dos elementos traço se mantiveram aproximados a ligeiramente maiores em 2022 quando comparados com a estiagem de 2021, salvo oscilações pontuais entre as regiões. Por fim, reforça-se que as diferenças nas concentrações entre os períodos de estiagem de 2021 e 2022 deu-se, principalmente, em decorrência da influência das precipitações no sistema, em especial as 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 Al, apresentou manutenção dos teores na região Ferro-Carvão e leve redução até região 1B. O P, de modo geral, mostrou valores baixos, com manutenção ou redução dos valores em relação à estiagem de 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 a 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 deu-se, principalmente, em decorrência da influência das precipitações no canal fluvial, em especial as chuvas intensas de 2021/2022, que acabou por influenciar a dinâmica morfológica e sedimentológica do rio.

Por fim, objeto principal de discussão do presente documento, o 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 mais recente, percebe-se que as chuvas foram menos volumosas, em geral, quando comparadas ao período chuvoso 2021/2022.

Verifica-se 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 distintos períodos (ARCADIS, 2020c).

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.

Assim sendo, em síntese, entende-se que, para águas superficiais, as alterações e os comportamentos observados no tempo e no espaço ao longo do rio Paraopeba, estiveram

associadas tanto aos rejeitos depositados na calha do rio e mais evidentes nos trechos mais proximais à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (Região 1A e 1B), como, também, às contribuições das variações sazonais (chuva e estiagem) e da resposta hidrológica da bacia como um todo. Esta esteve sujeita a condições hidrológicas muito díspares entre si ao longo do monitoramento, com períodos de alta e baixa pluviosidade/vazão e, assim, com potencial de ressuspensão de material (rejeitos + sedimentos) acomodado na calha do rio, além de arrastes hidráulicos (escoamento superficial) de sedimentos naturais da área de drenagem da bacia como um todo. Com exceção da região Ferro-Carvão, região 1A e da região 1B (trechos mais afetados), à medida que se atinge os trechos fluviais mais distais (regiões 2A e 2B) do rio Paraopeba, nota-se comportamento com padrões mais próximos à condição bacinal, inclusive, em comparação com o trecho de montante não impactado.

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

- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a março/2021). Abril/2021;
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a junho/2019). Julho/2019;
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a setembro/2020). Outubro/2020;
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a março/2021). Maio/2021;
- Relatório de Fechamento de Ciclo da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba (janeiro/2019 a setembro/2022). Outubro/2022.
- Relatório trimestral da qualidade da água superficial e sedimentos de outubro/novembro/dezembro (01/10/2019 a 31/12/2019), de janeiro de 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 nº 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 março/2023). PMQS-Três Marias. Atendimento ao Ofício nº 65/2019/AA-CD-ANA, Agência Nacional de Águas;
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a setembro/2021). Dezembro/2021;
- Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimento – Relatórios mensais (junho/2022 a fevereiro/2023);
- Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba. Fechamento de Ciclo (janeiro/2019 a março/2022). Dezembro/2022.

3. Premissas gerais

As premissas gerais adotadas ao longo das análises para elaboração do Relatório de Fechamento de Ciclo de Qualidade da Água Superficial e Sedimentos (25/01/2019 a 31/03/2023) são de grande relevância para leitura dos resultados analíticos e realização de análises técnicas, além de delimitar o alcance, possíveis limitações dos resultados e o recorte/contexto da presente discussão.

Cabe destacar que as premissas específicas para cada item de análise do presente relatório são apresentadas em subitens específicos correspondentes às metodologias.

3.1. Recorte dos Dados

As informações apresentadas e discutidas neste relatório incluem os resultados analíticos do período de 25/01/2019 a 31/03/2023 disponibilizados pelos laboratórios ALS/Corplab, Bioagri e SGS-Geosol em um formato de banco de dados. Ademais, vale destacar que os resultados analíticos para os parâmetros monitorados para água superficial e sedimentos apresentam dados até o dia 10/04/2023, destaca-se que no Anexo I é apresentado a frequência e N amostral por ponto de todo monitoramento.

Para uma melhor compreensão dos resultados ao longo do trecho de interesse do rio Paraopeba, foram definidos, para o presente documento, três períodos sazonais considerando-se as seguintes condições:

- Período de chuva de 2018/2019: entre os meses de outubro de 2018 e março de 2019;
- Período de chuva de 2019/2020: entre os meses de outubro de 2019 e março de 2020;
- Período de chuva de 2020/2021: entre os meses de outubro de 2020 e março de 2021;
- Período de chuva de 2021/2022: entre os meses de outubro de 2021 e março de 2022;
- Período de chuva de 2022/2023: entre os meses de outubro de 2022 e março de 2023.

3.2. Caracterização da Área de Estudo

A caracterização da área de estudo toma como alcance mais abrangente a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, com maior enfoque para a Circunscrição Hidrográfica (CH) Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba (SF3). A área de estudo contemplada por este relatório divide-se em sete regiões de interesse, Montante, Ferro Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C, as quais são exploradas em detalhe, em função das alterações de qualidade das águas superficiais ora observadas.

Embora seja localizado no rio Paraopeba em ponto de montante à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, o ponto PT-01 foi inserido, para fins de análise, na área afetada (Região 1A), uma vez que a mancha de rejeitos que transladou no ribeirão Ferro-Carvão apresentou energia suficiente para avançar no sentido de montante e atingir o mesmo. Entende-se, dessa forma, que o ponto PT-01 está localizado em trecho de acomodação de rejeito.

Da mesma forma, em acordo à solicitação do Igam através do Memorando 13385556, os resultados do ponto de monitoramento PT-13 anteriores ao dia 13 de maio de 2019, foram desconsiderados devido à amostragem em local não representativo, em função de limitações de acesso.

A região entre o reservatório da UHE Retiro Baixo e UHE Três Marias está sendo monitorada de forma mais detalhada desde o início do período chuvoso em janeiro/2019, apesar de não se ter evidências da relação direta desta região com o rompimento, conforme apresentado no Relatório de Fechamento de Ciclo (Arcadis, 2019).

A breve caracterização da área de estudo (Anexo II), com exceção dos dados obtidos no âmbito do monitoramento de água superficial e sedimentos, toma como base dados secundários, obtidos a partir da literatura e de fontes de dados oficiais aplicáveis para cada temática abordada, no período de dados disponíveis e relevantes à análise.

3.3. Caracterização do Rejeito

A composição dos rejeitos das barragens B1, B4 e B4-A tem referência nos resultados da amostragem realizada pela Geoenviron (2019) no âmbito da caracterização química global fase I. Em resumo, o rejeito possui em sua composição uma predominância de óxido de Ferro e sílica, em maiores proporções (>90%), seguida pelos óxidos de alumínio e manganês, em proporções menores que 2,5% e 1,0%, respectivamente. Os demais elementos químicos presentes no rejeito apresentam proporções ainda menores. No Anexo II é apresentado a caracterização do rejeito.

3.4. Campanhas de Monitoramento

Desde 25/01/2019, todo o escopo de monitoramento é preconizado por um plano, que se atualiza à medida que surgem eventuais adequações no escopo. Atualmente, o plano de monitoramento encontra-se na versão 27 (Anexo I), na versão atual, além dos alinhamentos feitos em planos anteriores, houve atualização da coordenada do ponto PT-61 (córrego Laranjeira) para a posição geográfica Latitude -20,127340° / Longitude -44.147002°, destaca-se que a amostragem referente ao mês de março (08/03/2023) ocorreu na coordenada corrigida. Em atendimento a Carta Ger. Executiva de Reparação nº C.EXT 0148/2023, que versa sobre a proposta de realocação do ponto PT-47-E para o Programa de Monitoramento das Obras Emergenciais (PMO), em referência ao Auto de Fiscalização nº 61.250/2019 e Nota Técnica AECOM NT N.º 60612553-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0028-2022, exclui-se o referido ponto

do plano de monitoramento do Programa de Monitoramento Emergencial (PME). Esta versão do plano traz ainda uma atualização das coordenadas alternativas dos pontos PT-52, PT-07 e PT-09 para as coletas das matrizes água superficial e sedimentos.

Baseado na “Avaliação da Rede de Monitoramento – PME/PMQS – Revisão da frequência, malha amostral e escopo analítico”, protocolado por meio da carta C.EXT. 1118/2021 (SEI nº 33774875), protocolou-se a proposta de alteração da frequência dos pontos do PME, em virtude do período de estiagem, conforme informado na carta C.EXT. 0272/2023 enviada ao Igam pela Vale S.A., em que se atualiza a frequência dos pontos deste programa, iniciando em 01/04/2023.

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; 2020; 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* pertencentes a cada uma das regiões. É importante destacar que alguns pontos da VALE estão mais próximos aos pontos do IGAM: 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.

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
1A	BP068	PT-01; PT-13*; PT-09; PT-02; PT-05
1B	BP070, BP072	PT-03; PT-14; PT-48; PT-15

Região	Baseline	Pontos VALE
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, devido à amostragem em local não representativo, em função de limitações de acesso.

Em relação *baselines* sazonais históricos para análises dos tributários, foram utilizados os pontos da rede do Igam localizados mais próximos a cada tributário (**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 discretização entre os Limites de Quantificação (LQ) das análises realizadas por diferentes laboratórios, e pelo fato de que para muitos analitos os resultados são inferiores ao LQ, adotou-se como premissa utilizar à padronização do menor valor de LQ.

Para a análise exploratória dos dados, o método de substituição simples pelo próprio valor do LQ foi adotado. Esse método de substituição também é empregado pelo órgão ambiental Igam e utilizado na área ambiental para tratamento de dados censurados segundo Carvalho (2003) e Christofaro & Leao (2014).

Em casos de avaliações estatísticas inferenciais, o LQ é tratado de forma diferente. Primeiramente, é realizada a padronização do valor não-quantificado, considerando o valor mais restritivo (menor LQ) reportado pelos laboratórios (REIMMAN et al. 2008). Os valores definidos por estes tipos de dados são determinados em condições diferentes das amostras analisadas e muitas vezes não englobam a dispersão global do procedimento analítico. O método de substituição passa a ser o valor do LQ já padronizado pela metade do seu valor. O intuito dessa substituição é distinguir os valores não-quantificados e quantificados.

Para a avaliação dos percentuais de violação aos limites legais de classe de enquadramento no caso da água superficial e dos percentuais de resultados acima dos valores orientadores no

caso dos sedimentos, não foram considerados os analitos que apresentaram 100% dos resultados inferiores ao LQ.

Destaca-se que nos gráficos o LQ do *baseline* não é padronizado, enquanto para a série de monitoramento da Vale é feita 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 os meses de outubro/2022 a março/2023, no **Anexo III**.

3.8. Situação da pluma original

Ao longo do ano de 2019, especificamente durante os meses de estiagem considerado, a pluma original, ora contida no reservatório da UHE Retiro Baixo, dissipou-se em função de sedimentação, diluição e outros fatores de atenuação. No período da ocorrência da circulação de inverno (desestratificação térmica) do ano de 2019, no entanto, foram verificadas oscilações de concentrações associadas ao citado fenômeno. De toda maneira, a referida condição de dissipação pôde ser observada para os meses de julho, agosto e início do mês de setembro/2019, cujos teores da maior parte dos parâmetros retomaram a condições similares ou inferiores ao *baseline* (IGAM).

Importante constar que a pluma é uma frente de deslocamento 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 aquático.

Na **Tabela 3.8-3** podem ser visualizadas as datas de passagem da pluma original pelos pontos de monitoramento ao longo do rio Paraopeba. Nota-se que a pluma alcançou o ponto de monitoramento PT-21 no dia 08/03/2019 e se dissipou ao longo do período de estiagem de 2019.

Tabela 3.8-3 - 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

Pontos de monitoramento	Data de passagem da pluma
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 no presente estudo, para cada um dos pontos anteriormente listados, 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 nº 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 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 a referência 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).

4. Caracterização hidrológica

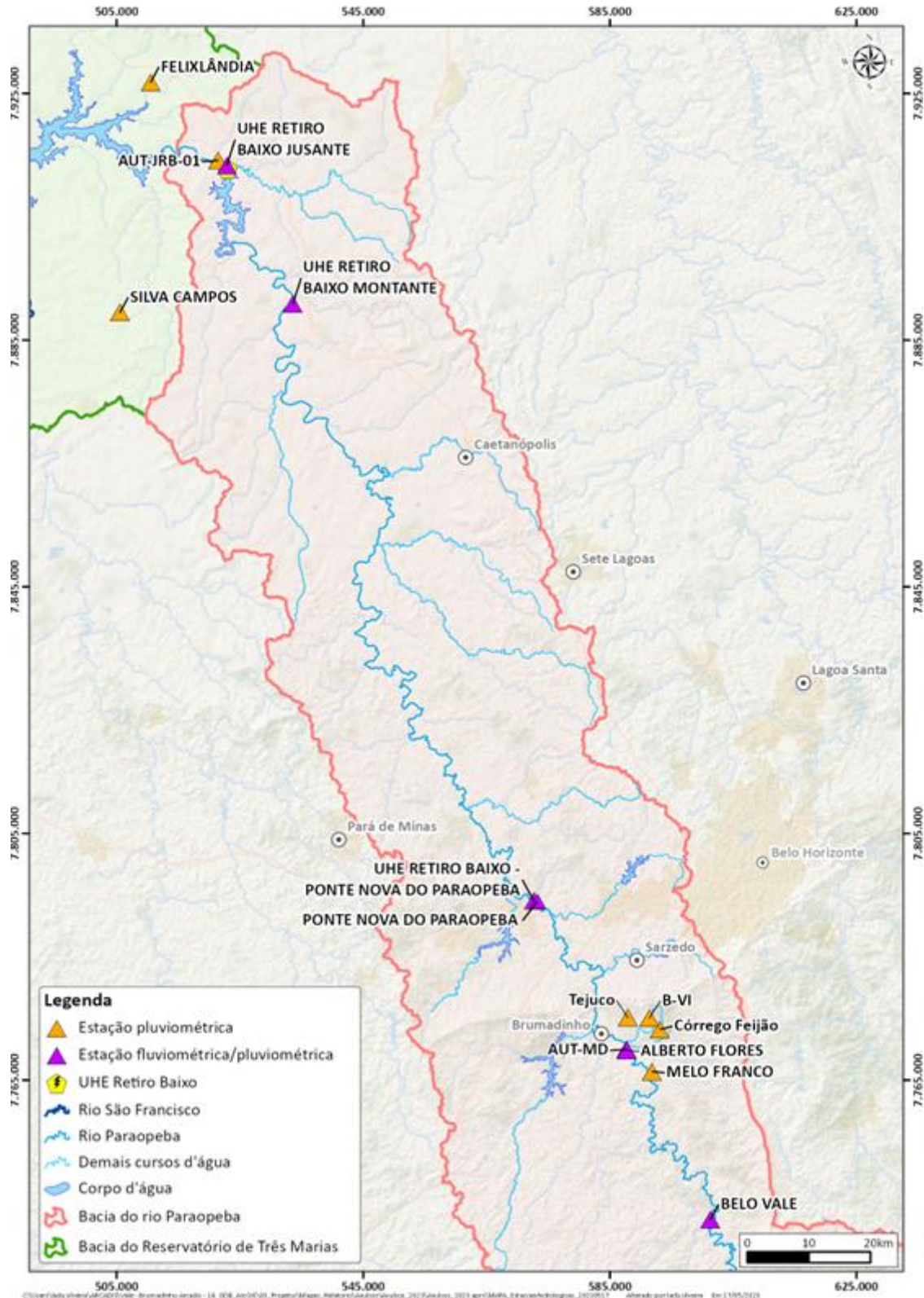
4.1. Contextualização

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. 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

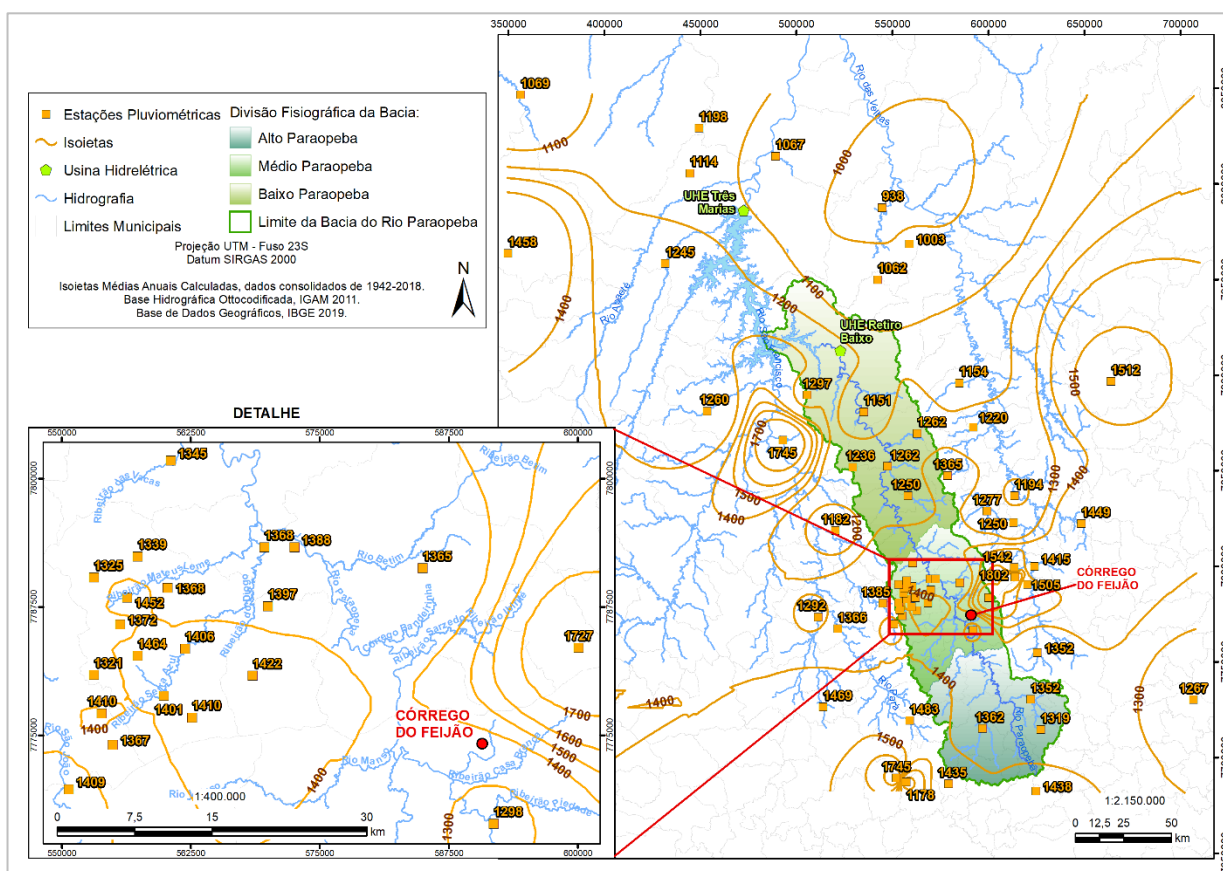
Figura 4.1-1 Estações fluviométricas e pluviométricas localizadas na região de interesse



Fonte: 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 31/03/2023)		CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3
		Folha 46 / 373

Tabela 4.1-2 Vazões médias mensais, Q_{7,10}, Q₉₅ e Q_{mlt} (m³/s) na calha principal do rio Paraopeba

Região Bacia	Código	Nome	Vazões (m ³ /s)															Intervalo de dados
			Q7,10	Q95	Qmlt	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.

Para uma melhor compreensão do comportamento pluviométrico e fluviométrico ao longo do trecho de interesse do rio Paraopeba, foram levados em conta, para o presente documento, cinco períodos sazonais chuvosos, considerando-se as seguintes condições:

- Período de chuva de 2018/2019: entre os meses de outubro de 2018 e março de 2019;
- Período de chuva de 2019/2020: entre os meses de outubro de 2019 e março de 2020;
- Período de chuva de 2020/2021: entre os meses de outubro de 2020 e março de 2021;
- Período de chuva de 2021/2022: entre os meses de outubro de 2021 e março de 2022;
- Período de chuva de 2022/2023: entre os meses de outubro de 2022 e março de 2023.

4.2. Rio Paraopeba

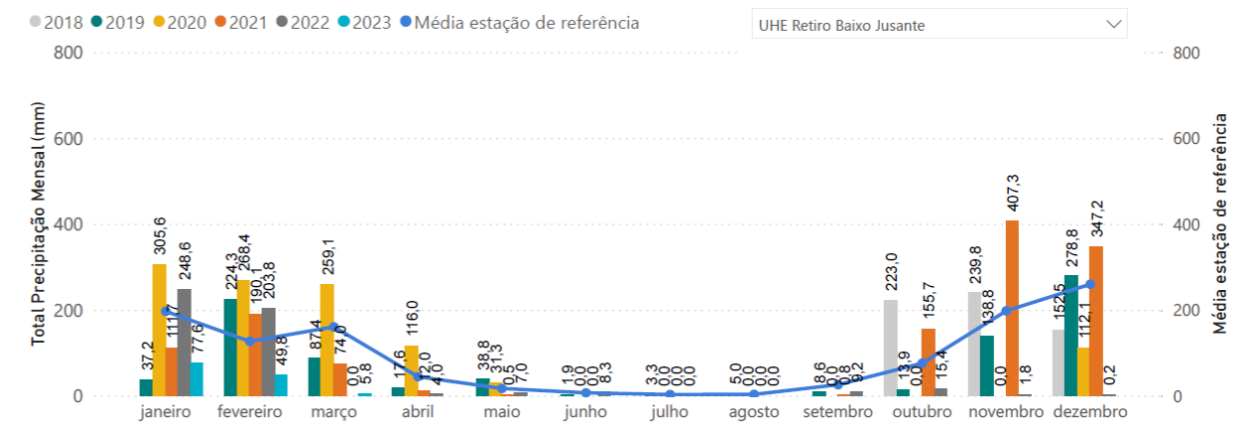
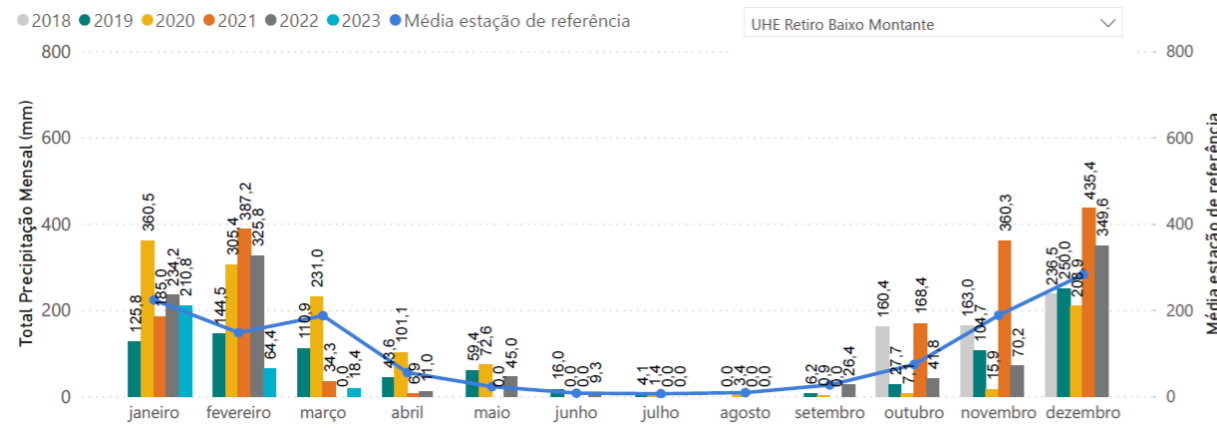
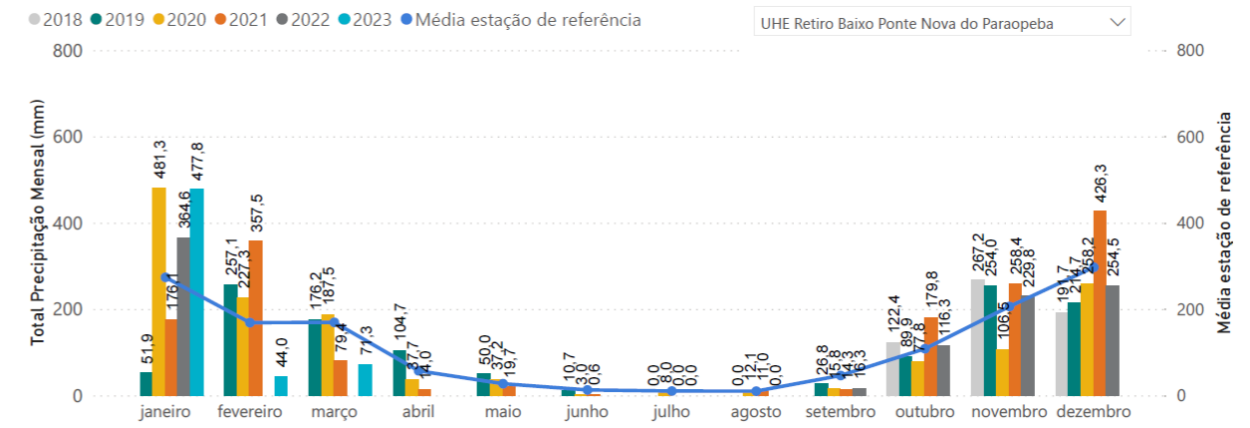
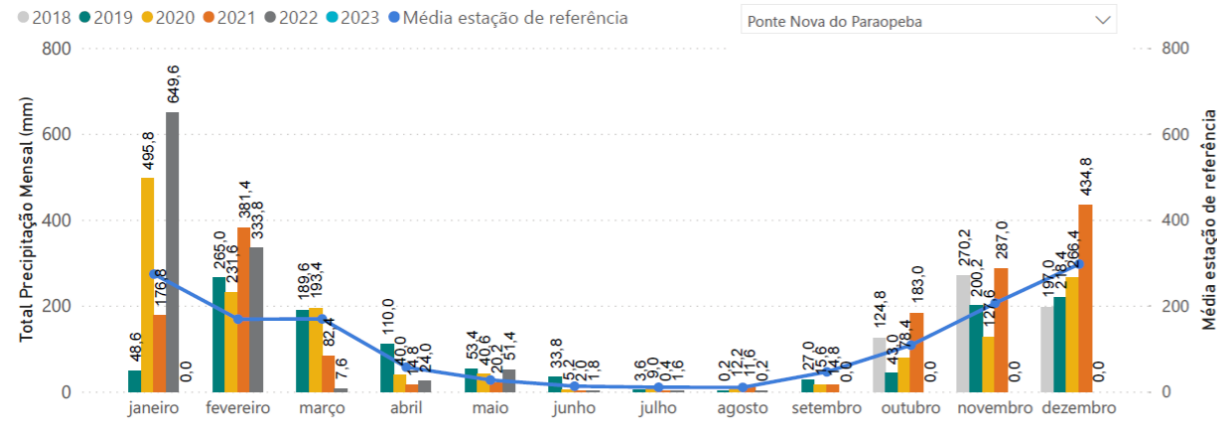
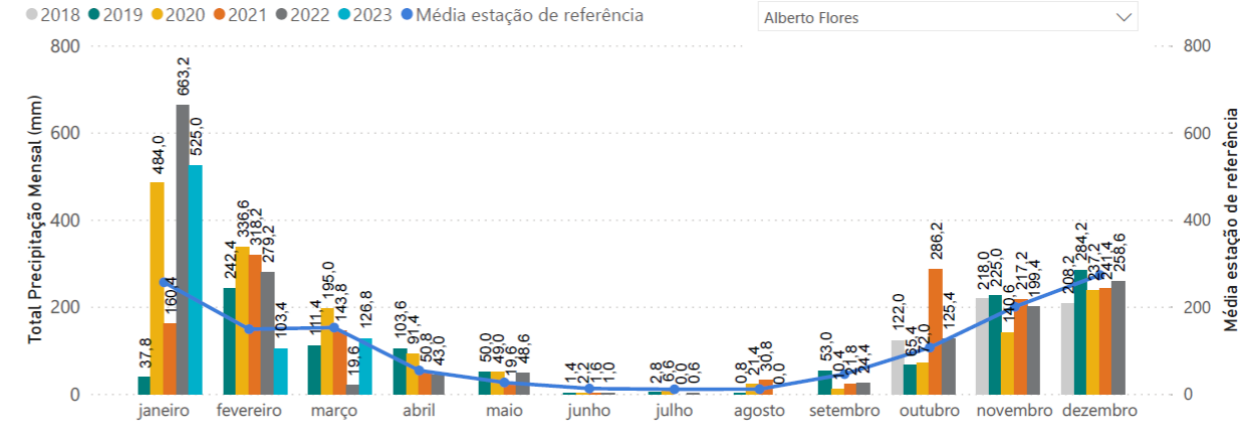
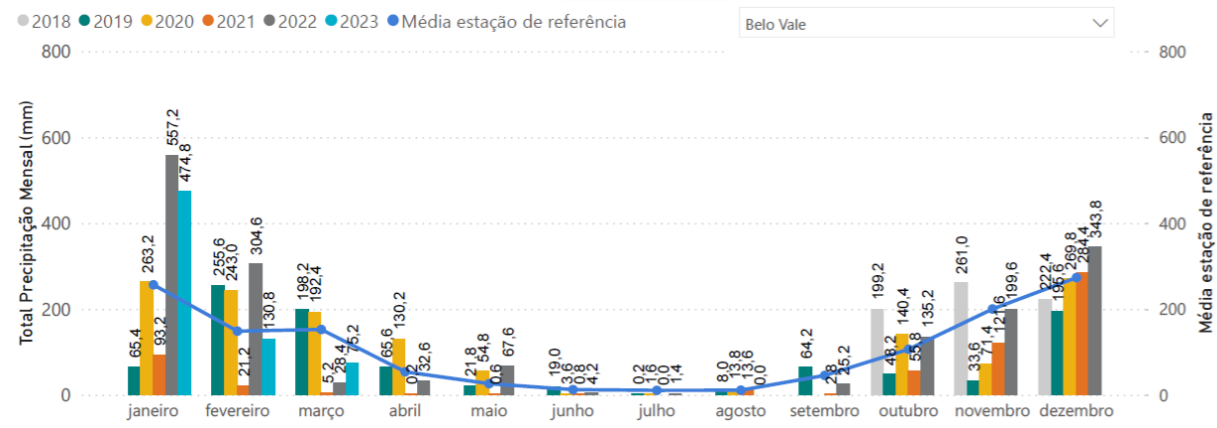
Foram comparados os totais mensais acumulados de precipitação (mm) desde outubro de 2018, utilizando os registros de chuva das estações pluviométricas localizadas ao longo do rio Paraopeba: Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante. Esses dados foram comparados com as médias mensais históricas de precipitação (m) 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 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
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: ANA, 2023b.

Em termos gerais, os gráficos anteriores mostram as variações temporais típicas das precipitações na região sudeste, com maior incidência de chuvas entre os meses de outubro e março, seguidos por uma redução gradual nos meses seguintes até setembro. Janeiro se destaca como o mês de maior precipitação na maior parte da bacia, seguido por fevereiro, com uma 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 e 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. À medida que a estiagem avança, os níveis e as vazões fluviais diminuem, com maior estabilidade hidrodinâmica, e as contribuições difusas praticamente desaparecem. Isso resulta em uma condição de redução progressiva das concentrações dos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo.

Importante pontuar, para a presente avaliação, que a estação Ponte Nova do Paraopeba parou de reportar dados gerais em dezembro/2020, retornando seu funcionamento no dia 31/08/2022 de forma contínua, com exceção em alguns dias alternados e em horários pontuais. Destaca-se que, devido às fortes chuvas que ocorreram a partir de 08/01/2022, a estação parou novamente de reportar os dados, retornando apenas ao final do mês de agosto/2022 com registros de níveis e vazões, mas ainda persistindo a ausência de dados pluviométricos. Da mesma maneira, a estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, localizada na mesma seção fluvial, no mesmo período, também apresentou paralisação das operações, retomando seus registros ao final de julho/2022 para nível e chuva e, em meados de setembro, para vazões. Por vezes, também, a estação UHE Retiro Baixo Jusante apresentou registros nulos de chuva, sendo possível utilizar a estação telemétrica AUT_JRB-01, operada pela Clean/Vale e localizada a cerca de 1,6 km a jusante, para a qual se verificou a ocorrência de precipitação. Sendo assim, vale reforçar que os dados pluviométricos das estações são passíveis de falha, como já indicado 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.

Posto isso, destacam-se as precipitações de grande intensidade de janeiro de 2022, sendo esse mês marcado por um evento pluviométrico, ocorrido especialmente entre os dias 07/01 e 13/01, que atingiu um período de recorrência (TR) equivalente a 1000 anos quando discretizado para três dias de duração. Ademais, no período 2021/2022, as chuvas ocorreram em maior monta desde o mês de outubro/2021 (mais chuvoso dos últimos onze anos), reverberando para

o comportamento fluviométrico/hidrodinâmico no período de estiagem/2022. Os meses chuvosos do período 2022/2023, por outro lado, foram mais atenuados que o mesmo período sazonal anterior, mas ainda compreende magnitude relevante e aproximada aos totais observados para o período 2019/2020. Peculiarmente, percebeu-se antecipação das condições de estiagem para o período chuvoso 2022/2023, uma vez que, em fevereiro/2023, houve substancial redução das chuvas com claro aspecto de recessão hidrológica, sendo esta confirmada ao longo de todo o mês de março/2023 na maior parte da bacia.

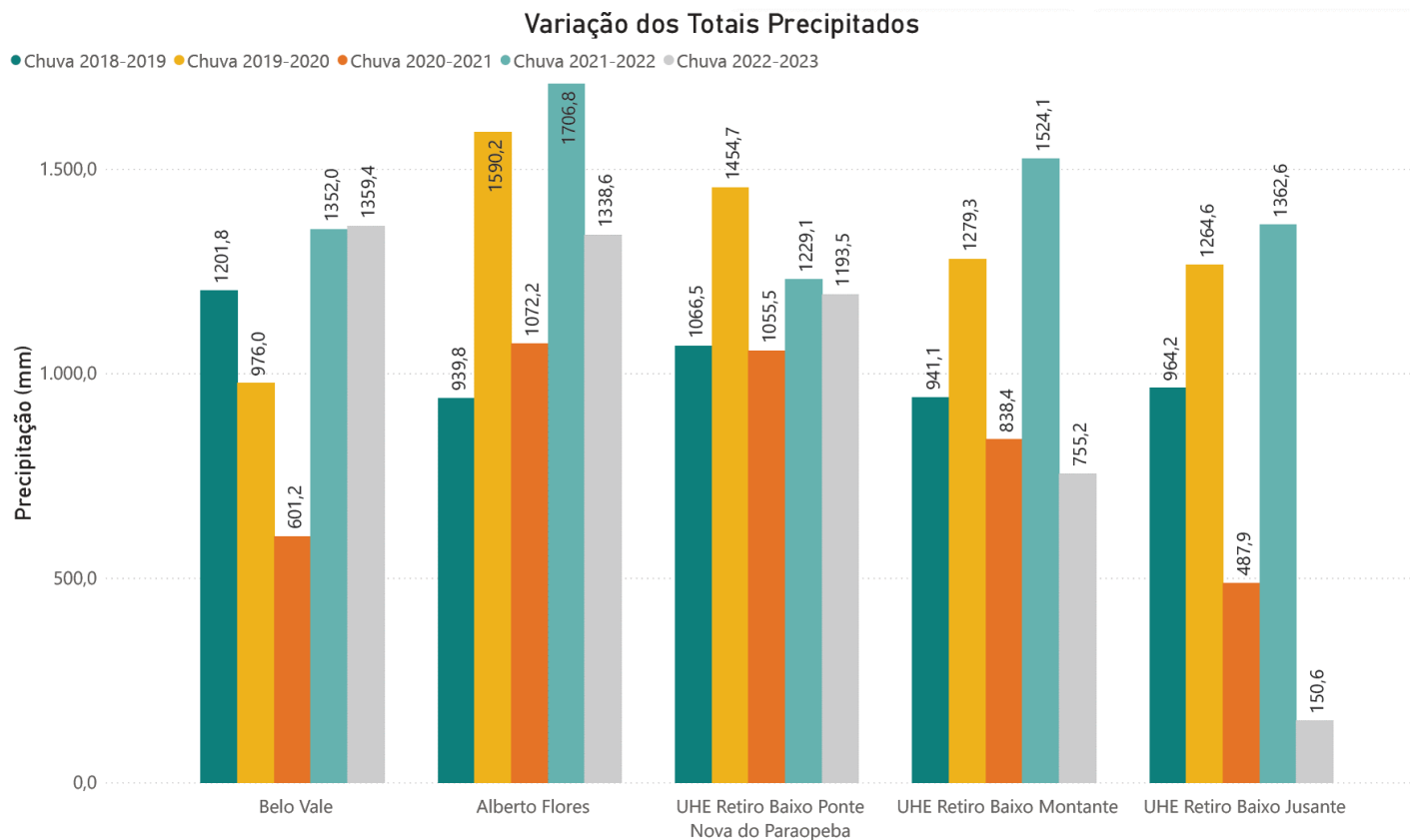
Complementarmente, no **Gráfico 4.2-2**, é apresentado o histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva 2018/2019 a 2022/2023.

Como um comportamento mais abrangente, tendo em vista as peculiaridades espaciais de uma grande bacia de característica oblonga, é possível detectar que, nos quatro anos de monitoramento desde o rompimento da Barragem B-I, os volumes precipitados são mais expressivos nos períodos chuvosos de 2019/2020 e 2021/2022, com destaque para este último, e com menores registros reportados para os períodos 2018/2019 e 2020/2021. Para o período chuvoso (2022/2023), especificamente, seus registros indicaram chuvas totais acumuladas com ordem de grandeza variando entre 2019/2020 e 2021/2022, o que aponta também considerável pluviosidade.

No âmbito espacial, é possível notar que as precipitações foram mais volumosas nas estações próximas à região de montante (Estação Belo Vale) e 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.

Vale, no entanto, mais uma vez reforçar a necessidade de avaliar com cautela os resultados registrados pelas estações de apoio, tendo em vista as eventuais falhas detectadas.

Gráfico 4.2-2 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva 2018/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



Fonte: ANA, 2023b.

A seguir, 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 (hietogramas) e nível (cotagramas) 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 e UHE Retiro Baixo Jusante e AUT_JRB-01.

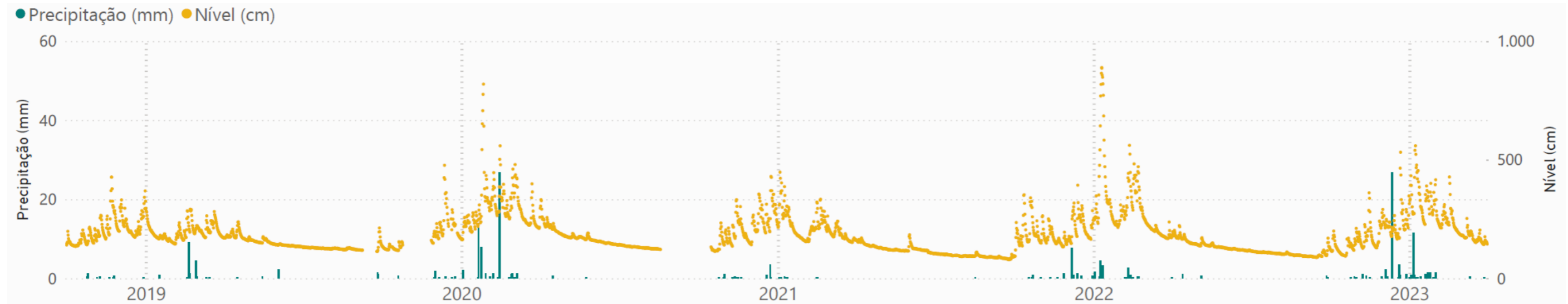
É sabido que as variações fluviométricas, especialmente nos períodos sazonais chuvosos, são aspectos hidrodinâmicos de forte influência na qualidade das águas de um corpo hídrico por meio do arraste de sedimentos via escoamento superficial na bacia, ressuspensão de material nas calhas dos cursos de água, processos erosivos e de assoreamento atrelados às variações de velocidade e nível da água. De maneira geral, observa-se um aumento na ocorrência de precipitações e nos níveis registrados a partir dos meses de outubro, com valores mais elevados e variações mais pronunciadas em janeiro, seguido de uma diminuição até março. Consequentemente, conforme esperado, juntamente com o aumento das chuvas, ocorre um aumento nos níveis registrados nas estações hidrométricas.

Embora seja evidente que os níveis e vazões estejam relacionados às precipitações ocorridas na bacia e nas regiões de influência das estações de monitoramento, é perceptível que, durante os períodos de chuva, os valores apresentados nos cotagramas se destacam significativamente. Isso pode ser observado nos meses de outubro a março nos anos monitorados, especialmente em janeiro. Um destaque especial é o mês de janeiro de 2022, que foi particularmente expressivo e resultou na falha de operação dos dispositivos hidrométricos das estações UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba e Ponte Nova do Paraopeba a partir do dia 09/01/2022.

Nesse contexto, é importante mencionar que a estação Ponte Nova do Paraopeba interrompeu o envio de dados gerais em dezembro/2020, retomando suas operações continuamente em 31/08/2022, exceto por alguns dias alternados e horários específicos. Devido às fortes chuvas a partir de 08/01/2022, a estação novamente deixou de enviar dados, retomando apenas no final de agosto/2022 com registros de níveis e vazões, mas ainda sem dados pluviométricos. Da mesma forma, a estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, localizada em seção fluvial próxima, também interrompeu suas operações no mesmo período, retomando o registro de dados de nível e chuva no final de julho/2022 e de vazões em meados de setembro/2022. Para o ano de 2023, é possível também observar um aumento nas chuvas e nos níveis, especialmente entre os dias 05 e 12/01/2023, embora em menor magnitude em comparação ao ano anterior.

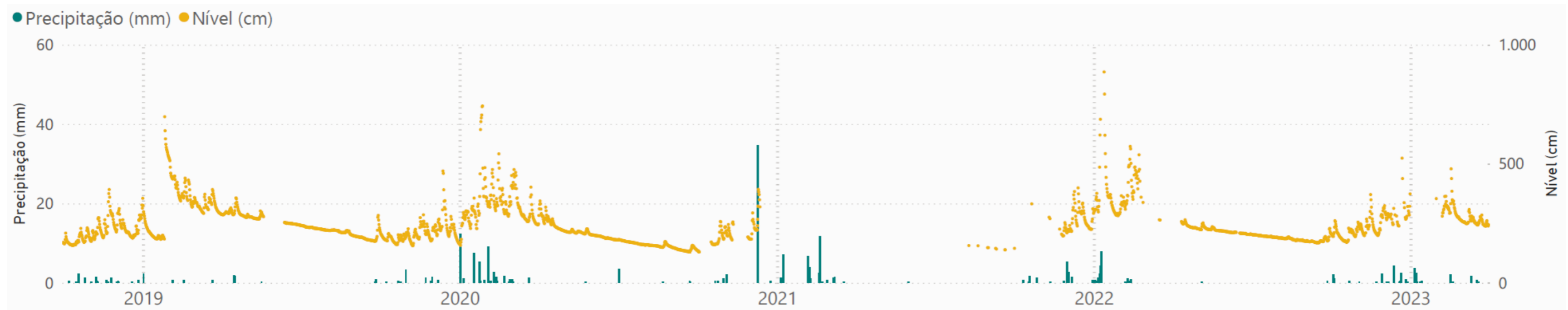
Sendo assim, os cotagramas, a seguir apresentados, têm a função específica de evidenciar a notada variação das condições hidrológicas do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais em análise. Cabe ressaltar que os resultados das vazões monitoradas não foram incluídos, dadas as inconsistências e falhas de registros observadas nas séries históricas oriundas de prováveis alterações nas tendências das curvas-chaves.

Gráfico 4.2-3 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação Belo Vale



Fonte: ANA, 2023b.

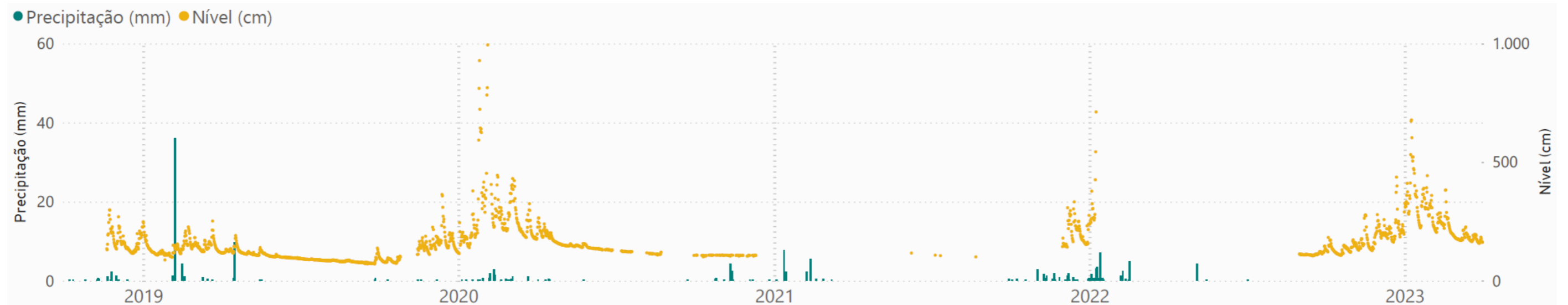
Gráfico 4.2-4 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação Alberto Flores



*Não há registro de nível no mês de novembro/2020 nos dias 11/11 a 26/11 e de 12/12/2020 a 25/11/2021, com exceção para alguns horários em dias alternados de forma pontual. Não há registro de nível no mês de janeiro/2023 nos dias 06/01 a 09/01, 12/01 a 16/01, 19/01 a 23/01 e 27/01 a 30/01 e no mês de fevereiro/2023 nos dias 02/02 a 06/02.

Fonte: ANA, 2023b.

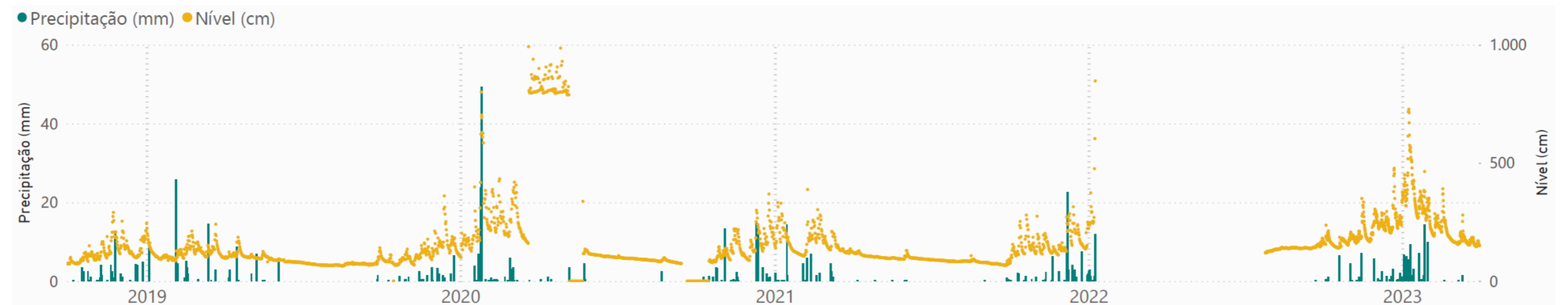
Gráfico 4.2-5 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação Ponte Nova do Paraopeba



Fonte: ANA, 2023b.

*Não há registro de nível entre 11/12/2020 e 30/11/2021, com exceção de alguns registros esporádicos nesse intervalo. Também, não há registro de nível entre 09/01/2022 e 31/08/2022. Não há registro de precipitação na estação a partir de setembro/2022.

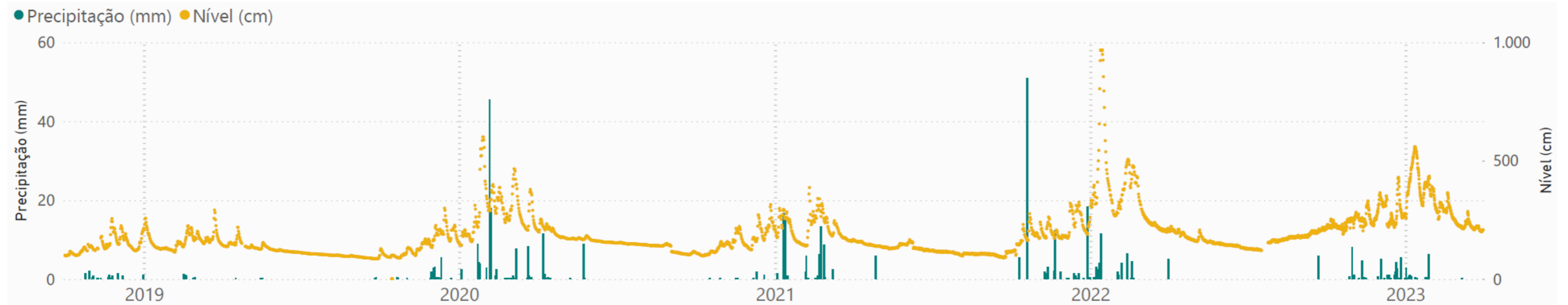
Gráfico 4.2-6 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023)* na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba



Fonte: ANA, 2023b

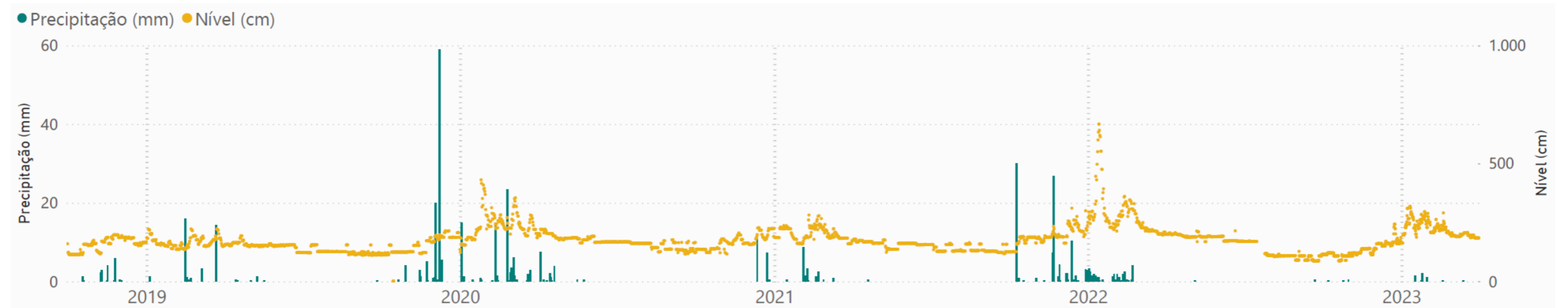
*Não há registros de nível entre 09/01/2022 e 25/07/2022. Os registros de precipitação foram paralisados a partir de 09/01/2023 e retornaram em 27/09/2022.

Gráfico 4.2-7 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação UHE Retiro Baixo Montante



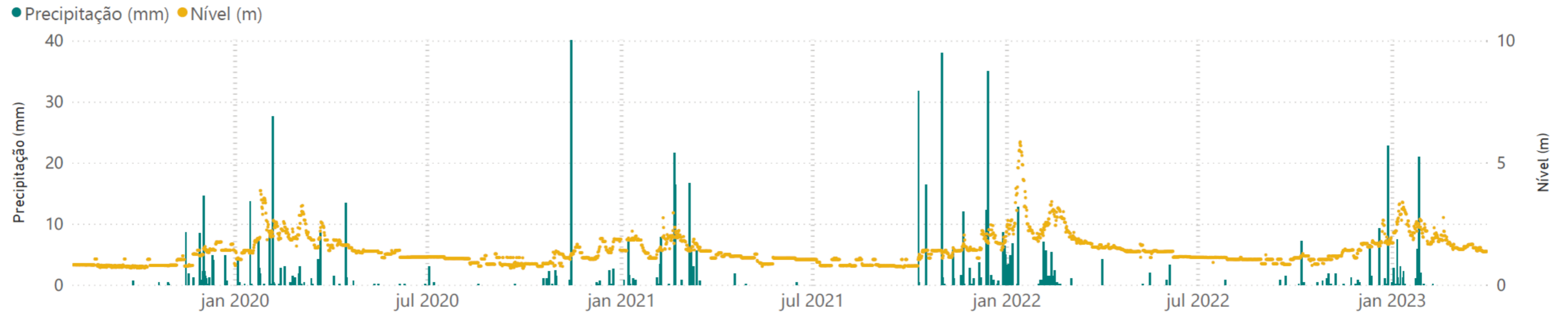
Fonte: ANA, 2023b.

Gráfico 4.2-8 Chuvas e nível do período de 01/outubro (2018) a 31/março (2023) na estação UHE Retiro Baixo Jusante



Fonte: ANA, 2023b.

Gráfico 4.2-9 Chuvas do período de 01/agosto (2019)* a 31/março (2023) na estação AUT_JRB-01



Fonte: Clean Environmental Brasil, 2023¹.

*Nota: A data corte não compreende o período chuvoso de 2018/2019 devido à data de início de transmissão dos dados na estação AUT_JRB-01.

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.

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.

Nos **Gráficos 4.2-10** são apresentadas as variações das vazões vertidas, turbinadas e defluentes (soma das vertidas e turbinadas) da usina de Retiro Baixo durante os diferentes períodos chuvosos. Em resumo, pode-se observar que as vazões vertidas durante o período chuvoso de 2022/2023 estão mais distribuídas ao longo do tempo e, em termos de magnitude, apresentam valores aproximados aos observados no período de 2019/2020. Já o período chuvoso de 2021/2022 se destacou pelo pico expressivo de vazões vertidas em janeiro/2022, diferenciando-se dos demais períodos.

O comportamento predominante das vazões defluentes, em termos de média e mediana, é de aumento gradual entre os meses de outubro e janeiro, seguido de uma redução até março, como é esperado para os períodos chuvosos da região. De modo geral, as médias dos valores não diferem muito dos respectivos valores medianos nos diferentes períodos chuvosos, exceto para o mês de janeiro/2022, no qual os picos de vazões observados nessa época contribuíram para um aumento médio discrepante.

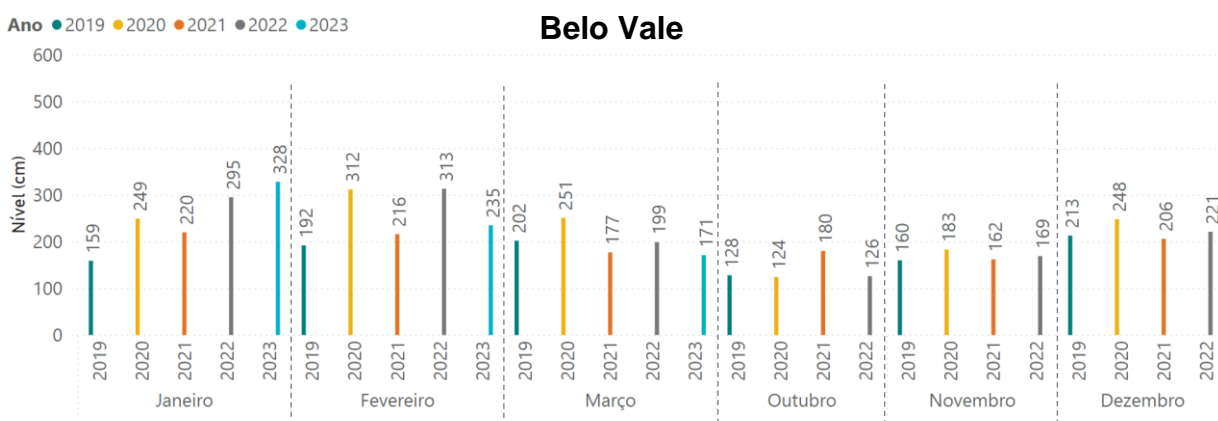
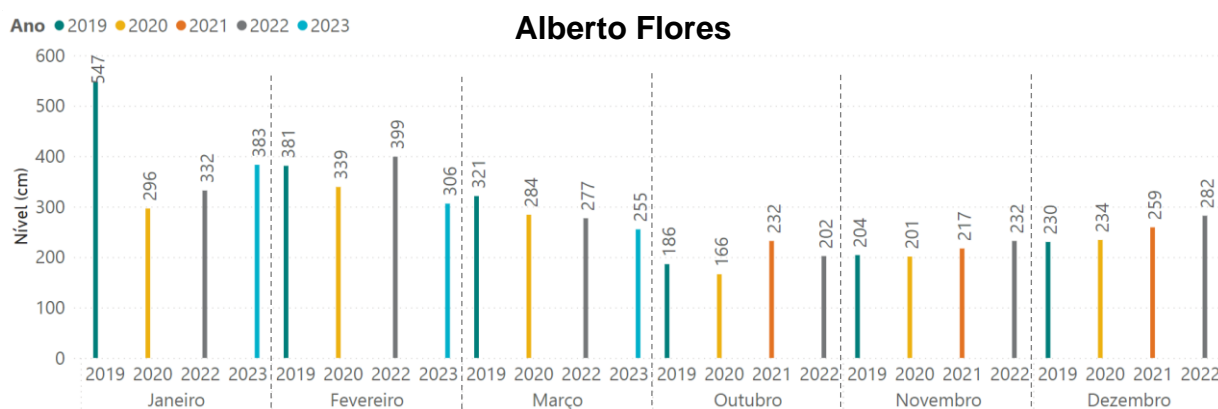
Gráfico 4.2-10 Operação da UHE Retiro Baixo nos períodos de chuva tendo em vista as vazões vertidas, turbinadas e defluentes

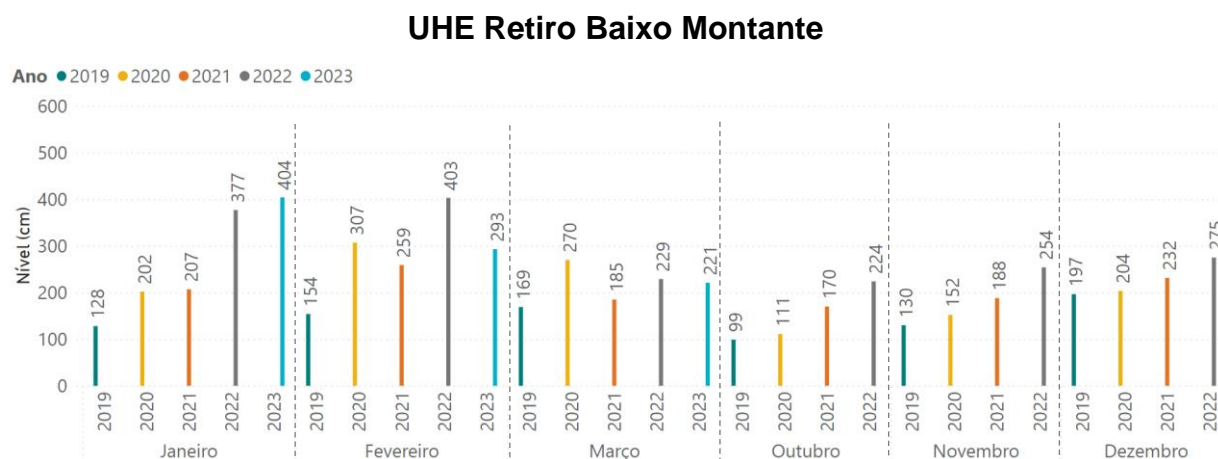
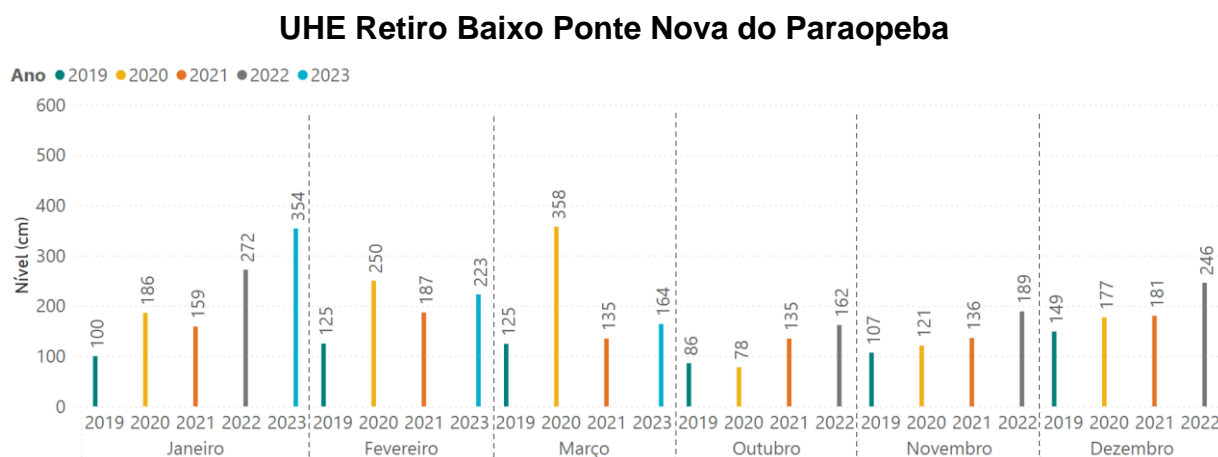
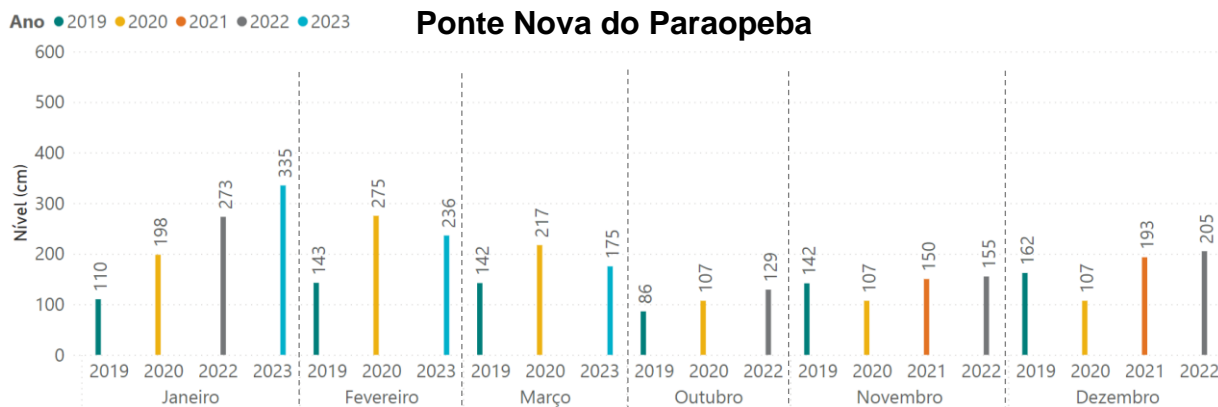

Fonte: ANA, 2023a.

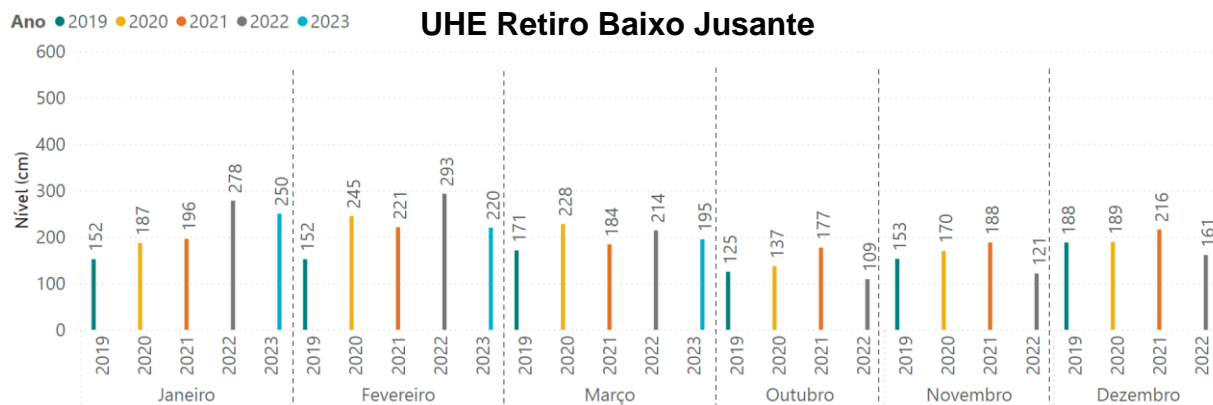
Por fim, no **Gráfico 4.2-11**, é apresentado o histórico de variação das medianas de nível/cota fluvial durante os períodos chuvosos nas respectivas estações analisadas. De modo geral, verifica-se que as maiores medianas, de 2019 a 2023, tem ocorrência predominante nos meses de janeiro e as menores nos meses de outubro, representando, respectivamente, os meses de máximas vazões e o início do aumento das mesmas.

Ao analisar apenas os meses de janeiro do histórico, nota-se um padrão de aumento gradual do nível mediano em grande parte das estações. No entanto, é importante destacar as falhas de registro observadas nas estações UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba e Ponte Nova do Paraopeba a partir de janeiro/2022, o que pode levar a uma subestimação dos efeitos das precipitações nesse período. É importante levar em consideração essas falhas ao interpretar os dados e avaliar os impactos das chuvas durante esse período específico.

Gráfico 4.2-11 Variação de nível/cota nos períodos de chuva nas estações fluviométricas do rio Paraopeba





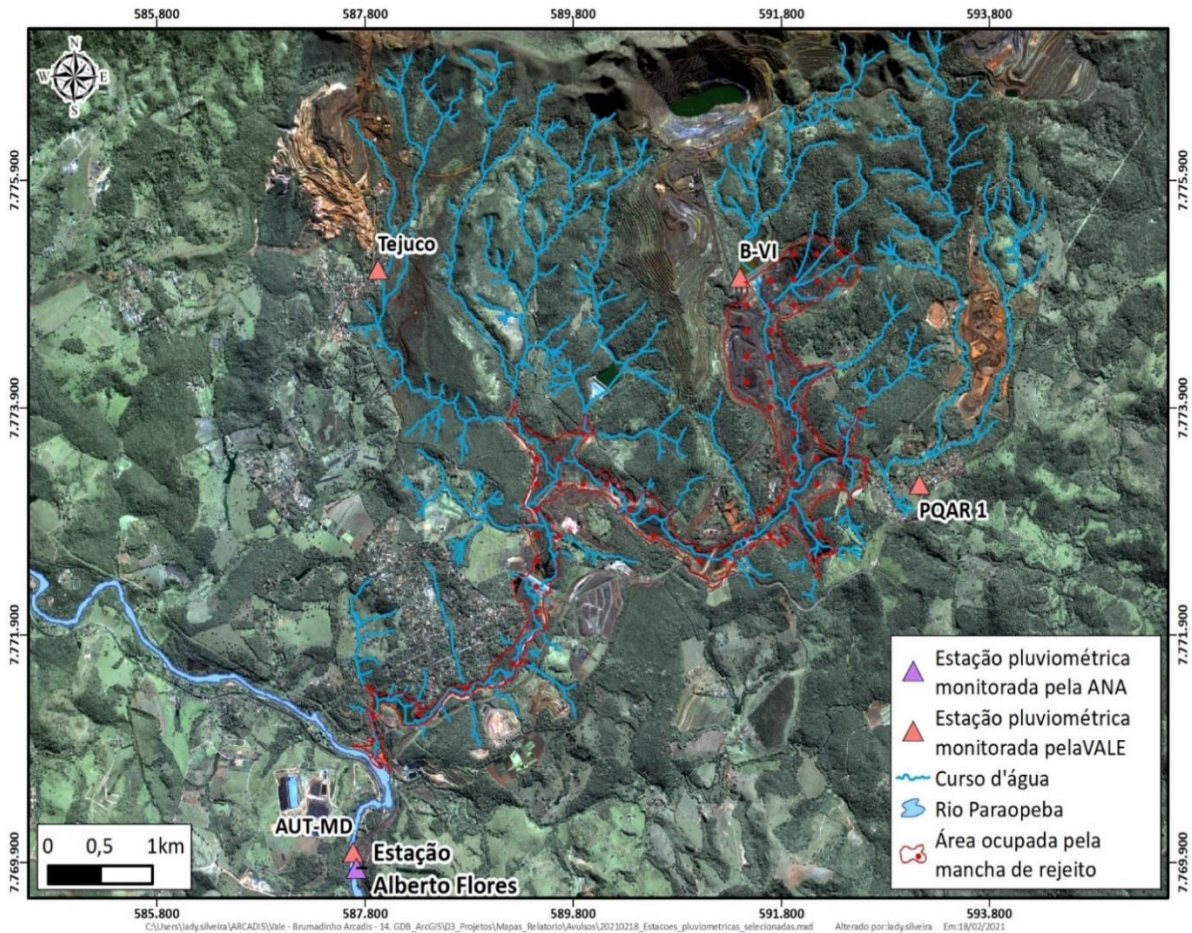


Fonte: ANA, 2023a.

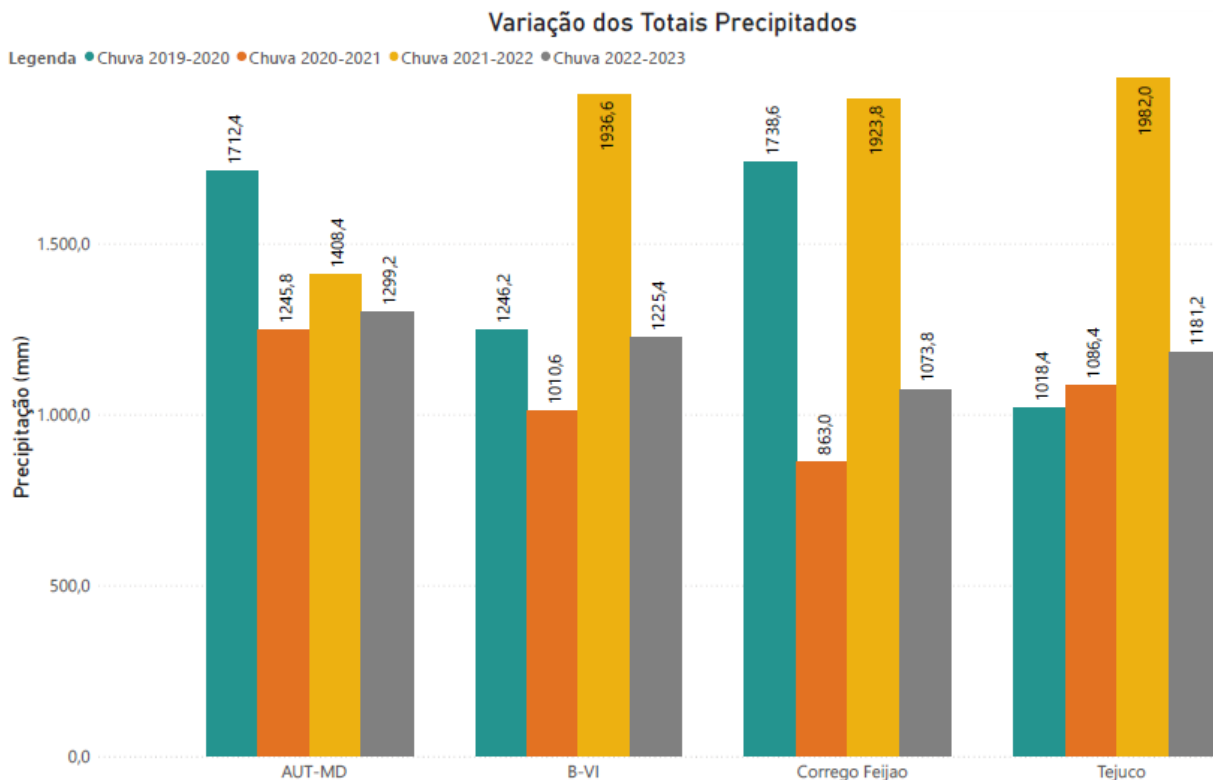
4.3. Ribeirão Ferro-Carvão

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, Córrego Feijão (PQAR1), Barragem VI e Tejuco monitoradas pela VALE. 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 chuva de 2019/2020 a 2022/2023. Verifica-se redução dos volumes precipitados comparando-se os períodos de chuva de 2021/2022 e 2022/2023 para todas as estações de monitoramento, com reduções mais evidentes nas estações B-VI, Córrego Feijão e Tejuco. Para a maior parte das estações, os menores registros acumulados ocorreram na chuva de 2020/2021, com exceção da estação Tejuco, para a qual os menores valores foram observados na chuva 2019/2020.

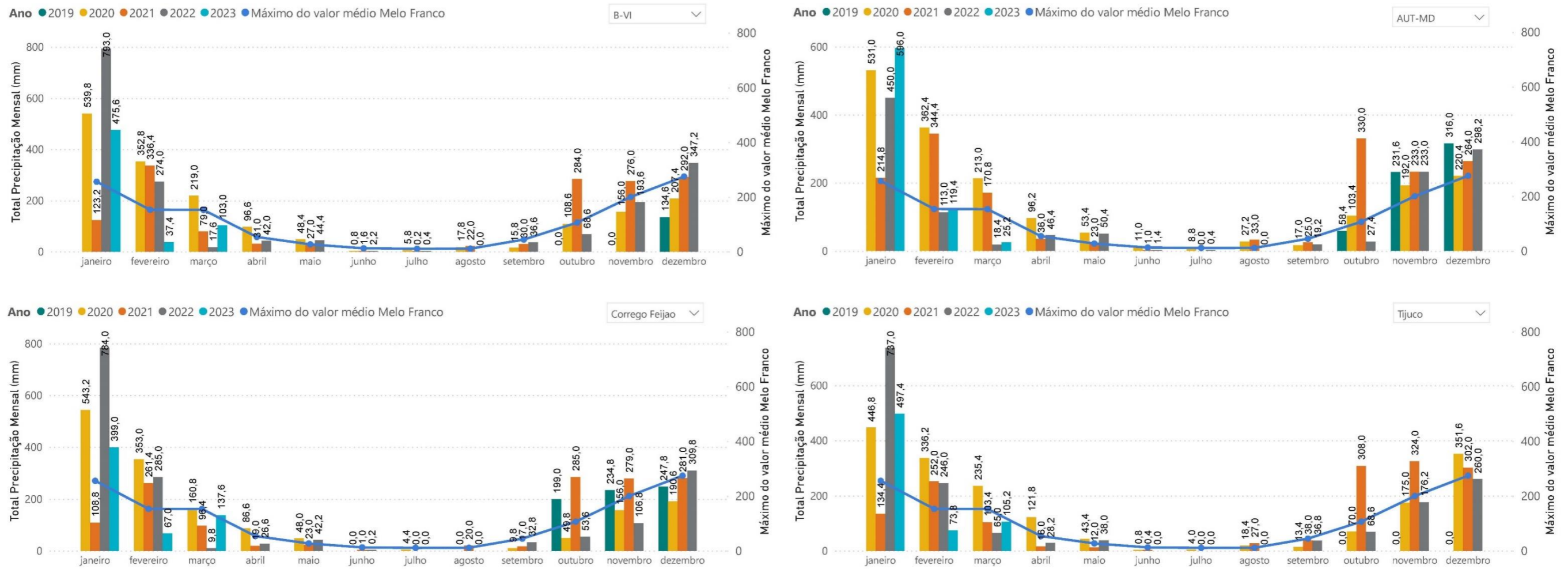
Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva de 2018/2019 a 2022/2023


Fonte: 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 chuvoso de 2022/2023 foram superiores às médias mensais da estação Melo Franco no mês de janeiro em todas as estações. Em relação aos demais meses, os valores verificados na chuva 2022/2023 também foram superiores em relação à média em novembro e dezembro na estação AUT-MD e apenas em dezembro nas estações B-VI e Córrego Feijão. Destaca-se que a estação AUT-MD apresentou um comportamento divergente das demais estações, registrando volumes de chuva em janeiro/2023 e fevereiro/2023 superiores aos observados em janeiro/2022 e fevereiro/2022. De forma geral, as maiores variações nos volumes mensais ocorrem nos meses de outubro, que marca o início do ano hidrológico, e janeiro, tradicionalmente caracterizado por fortes e frequentes precipitações. Nos demais meses do período chuvoso, as variações nos volumes acumulados são menos significativas, embora ainda estejam presentes.

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

Sabe-se 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 profundidade. Por outro lado, nos períodos de estiagem, com a redução das vazões e maior estabilidade hidrodinâmica, reduzem-se os aportes de sedimentos e se atenuam os teores dos parâmetros de qualidade da água, em especial aqueles mais característicos da bacia.

Analisado o período chuvoso de 2022/2023, percebe-se que de modo geral as chuvas ocorreram em maior monta na porção mais a montante e central da bacia, com redução nas porções mais distais e mais baixas. Apesar de terem ocorrido alguns eventos mais críticos, principalmente durante o mês de janeiro, observando o acumulado total do período mais recente, percebe-se que as chuvas foram menos volumosas na generalidade, quando comparadas ao período chuvoso 2021/2022, embora similares com o comportamento do período 2019/2020.

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 chuvoso 2022/2023, indicando reduções mais acentuadas para os meses de fevereiro e março.

5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de chuva 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 chuva 2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, tendo em vista o *baseline* sazonal (chuvoso) do citado corpo hídrico.

5.2. Metodologia

5.2.1. Estatística descritiva e inferencial

Neste item, serão analisados os resultados dos parâmetros majoritários (Manganês total, Manganês dissolvido, Ferro total, Ferro dissolvido, Alumínio total, Alumínio dissolvido e Turbidez), além dos parâmetros Fósforo total e Chumbo ao longo do tempo e do espaço nos períodos de chuva.

A avaliação mais detalhada dos parâmetros Fósforo total foi incluída pelo fato do citado elemento ter sido constatado na composição química do rejeito (GEOENVIRON, 2019), embora em valores baixos se comparados ao elemento prioritário manganês e, também, nos testemunhos de sondagem de sedimentos amostrados no rio Paraopeba (ARCADIS, 2020c). Entretanto, não foi possível associar diretamente a elevação das concentrações de Fósforo total e dissolvido na água às contribuições do rejeito, considerando esta ocorrer de forma mais clara em função de outros fatores inerentes ao uso e ocupação do solo da região onde a bacia está inserida. Ainda assim, em água superficial, a avaliação deste parâmetro se torna relevante visto que o fósforo, como nutriente limitante, pode favorecer processos de eutrofização em condições específicas. Importante, no entanto, destacar sobre a mobilidade e a biodisponibilidade desse elemento nas condições ambientais em que os rejeitos e sedimentos se encontram. Isso porque a fração inorgânica particulada, majoritariamente presente na água, não está biodisponível para assimilação dos organismos aquáticos.

Os demais elementos traço, com exceção do chumbo (analisado à parte), apresentaram concentrações majoritariamente baixas e pouco variáveis ao longo dos períodos monitorados, sendo que, na chuva 2022/2023, ocorreram violações pontuais apenas para cádmio total, cobre dissolvido, cromo 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).

Previamente à análise descritiva e inferencial dos resultados do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água nos períodos de chuva, 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 resultados dos parâmetros majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de chuva 2022/2023. 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 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 chuva 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 chuva entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de chuva (chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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 IV-D**. Neste mesmo anexo, consta a comparação espacial, por região, para cada período chuvoso separadamente (comparação espacial chuva/2019, chuva 2019/2020, comparação espacial chuva 2020/2021, comparação espacial chuva 2021/2022 e comparação espacial chuva 2022/2023).

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 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 (CHRISTOFARO e 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 a curvatura de Sen's slope (SEN, 1968), é usada para calcular a magnitude das tendências (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, 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. Detalhes das alterações por ponto estão disponíveis no **Anexo I**.

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 5.2.2.1** 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 5.2.2.2** 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 5.2.2.3** apresenta as concentrações medianas mensais, com espaçamento padronizado do tempo.

Figura 5.2.2-1 Série temporal de manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos)

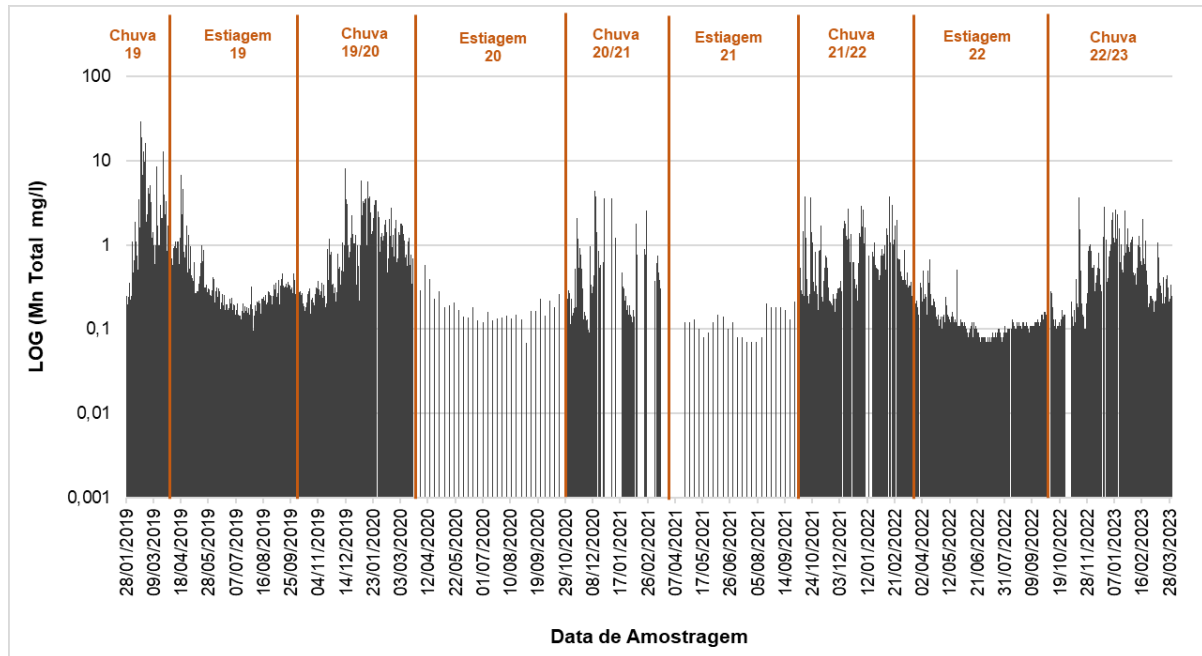


Figura 5.2.2-2 Série temporal de manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos)

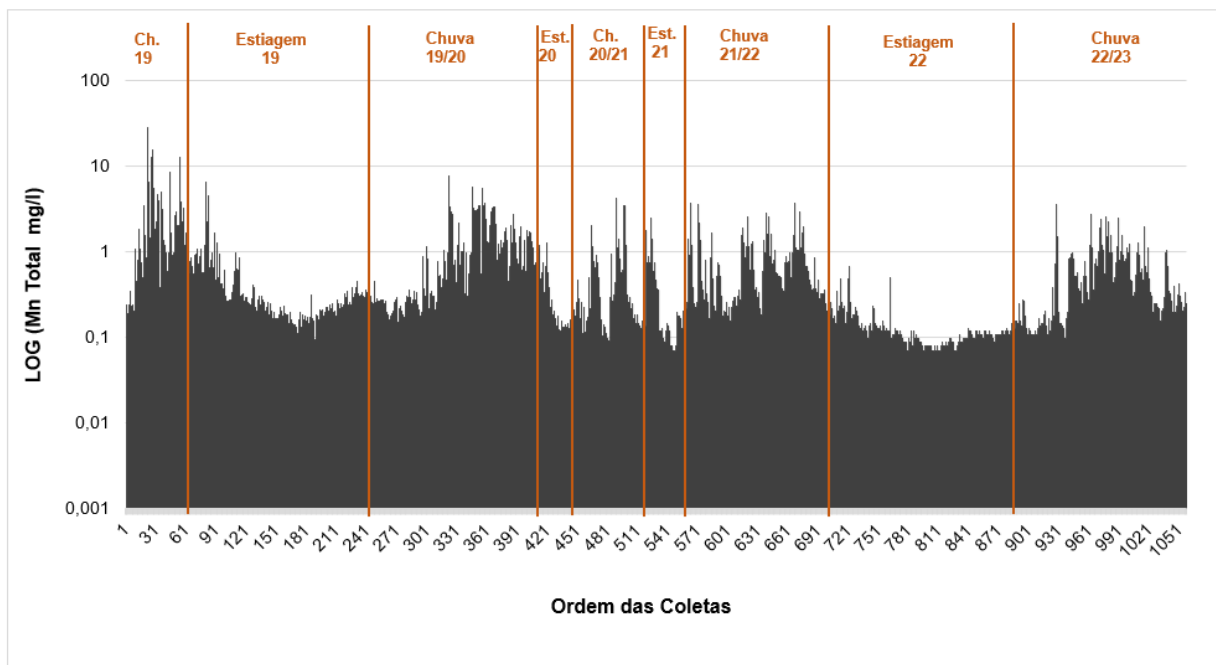
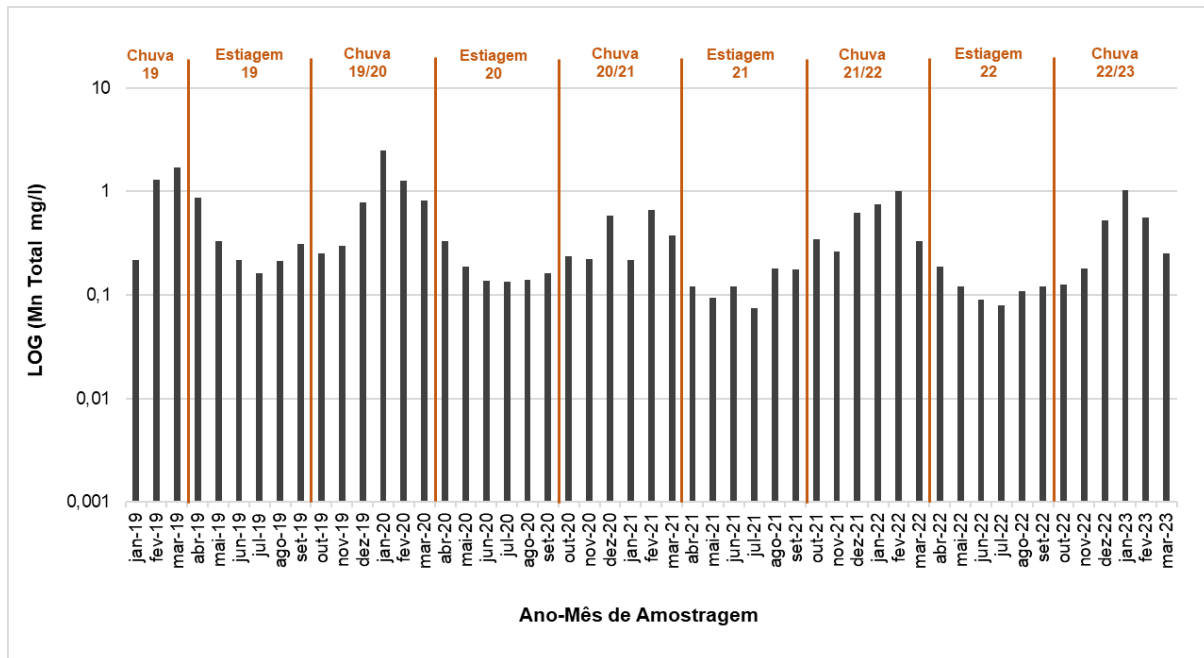


Figura 5.2.2-3 Série temporal de manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais)



Portanto, observa-se que a aplicação do teste de tendência temporal aos dados brutos apresenta fragilidade. Isso porque a maior densidade de dados em 2019 contribui mais para os resultados do teste do que os dados dos anos posteriores.

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, Fósforo total e Chumbo 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 quatro 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 chuva 2022/2023, 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 (H0) de que não há diferença significativa dos resultados entre os períodos

de chuva e de estiagem; e da hipótese alternativa (HA) 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 ≤ 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 chuvosos separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de chuva. 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 estiagem monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2022 (ARCADIS, 2022b).

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

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 chuvosos 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023.

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, correspondem aos valores máximos dos pontos pós-rompimento e referentes ao Plano de Monitoramento para a bacia do rio Paraopeba, em suas respectivas regiões. Essa avaliação exprime a condição mais crítica para o trecho, em termos de qualidade da água. As cores utilizadas refletem o resultado dessa avaliação.

Os mapas/tabelas estão discretizados da seguinte forma:

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

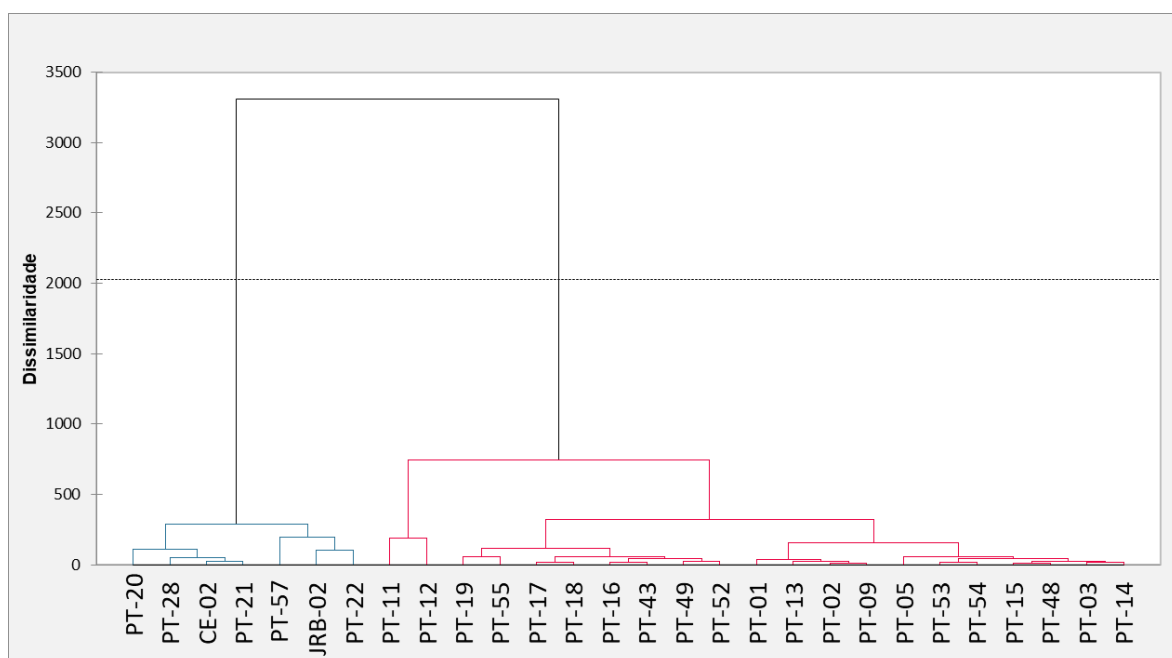
5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Análise de Cluster

À semelhança dos resultados obtidos no último Fechamento de Ciclo, com dados até a estiagem/2022, a análise de agrupamento (*cluster*) para água superficial (**Figura 5.3.1**), com a inclusão dos dados do período de chuva 2022/2023, indicou a manutenção de dois grandes agrupamentos: (i) Vermelho: pontos de monitoramento localizados a montante da UHE de Retiro Baixo e (ii) Azul: pontos localizados a partir de Retiro Baixo. Estes últimos pontos são mais distais ao trecho mais afetado pelo rompimento e, em geral, apresentam teores mais baixos dos parâmetros monitorados, bem como maior aproximação à condição de *baseline* do corpo hídrico.

Conforme indicado nos estudos “DISPERSÃO DE REJEITOS NA CARGA DE FUNDO DO RIO PARAOPEBA 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 PARAOPEBA E RESERVATÓRIOS DE RETIRO BAIXO E TRÊS MARIAS” (ARCADIS, 2021d) e corroborados pelas notas técnicas nº 20/IGAM/GEMOC/2021 (IGAM, 2021) nº 32/IGAM/GMHEC/2021 (IGAM, 2021a), não há indícios de que os rejeitos tenham ultrapassado o reservatório da UHE de Retiro Baixo. Logo, não foi possível identificar a interferência dos rejeitos provenientes da barragem B1 na qualidade das águas no trecho localizado a jusante do reservatório de Retiro Baixo, onde os resultados dos parâmetros monitorados estiveram, em geral, inferiores inclusive aos do trecho a montante que não sofreu impacto do rompimento da barragem.

Figura 5.3-1 Dendograma da análise de Cluster para a matriz água superficial



Observa-se a distribuição dos pontos com comportamento similar nos agrupamentos formados, corroborando, na maior parte dos casos, com as regiões inicialmente estabelecidas (Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C). No grupo vermelho, nota-se maior proximidade entre os pontos localizados no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), seguidos dos pontos localizados na região 2A e Montante (PT-19, PT-55, PT-17, PT-18, PT-16, PT-43, PT-49 e PT-52,) e, por fim, entre pontos localizados nas regiões 1A, 1B e pontos iniciais da região 2A (PT-01, PT-13, PT-02, PT-09, PT-05, PT-53, PT-54, PT-15, PT-48, PT-03 e PT-14). Destaca-se que, em termos de localização, o PT-52 foi o que mais se destoou, uma vez que apresentou comportamento similar e mais próximo aos pontos da região 2A, o que pode ser um indicativo de que os pontos mais distais ao trecho mais afetado e, assim, ao rompimento, já tendem a se aproximar de uma condição mais natural do corpo hídrico e sem afetação.

Por outro lado, no agrupamento azul ficaram os pontos localizados a partir de Retiro Baixo, compreendendo tanto aqueles localizados no reservatório da UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21), quanto aqueles localizados a jusante da UHE Retiro Baixo (PT-57, CE-02, JRB-02 e PT-22). Importante destacar que a qualidade das águas desse trecho, localizado a jusante da UHE Retiro Baixo, apresenta influência de contribuições distintas das demais regiões, o que reforça 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, Chumbo total e Fósforo total) agregados para cada período sazonal de chuva 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. Os gráficos *Boxplots* desses e dos demais parâmetros, por ponto de monitoramento, podem ser consultados no **Anexo IV-A**. No **Anexo IV-C**, 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 discutidos neste presente item. No **Anexo IV-D**, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência.

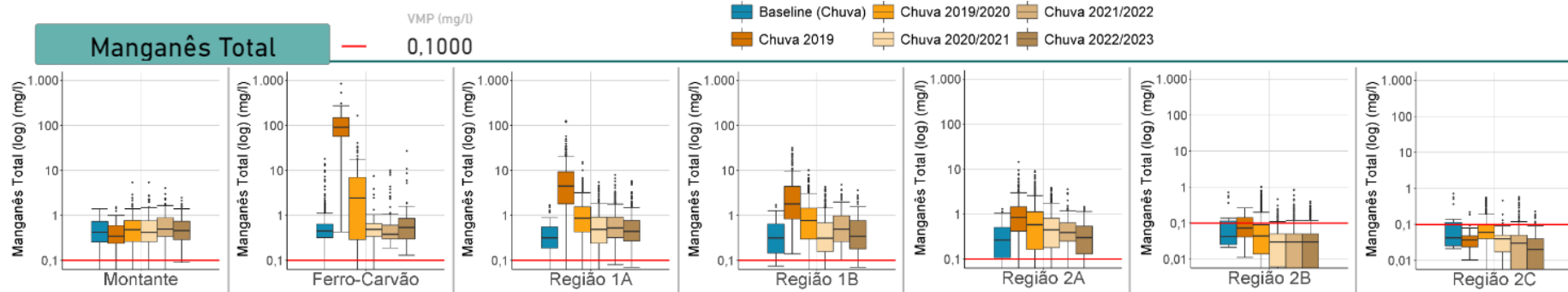
Ressalta-se, para fins de consulta, que os resultados dos períodos de estiagem constam no último relatório de Fechamento de Ciclo protocolado, referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2022 (ARCADIS, 2022b).

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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023)

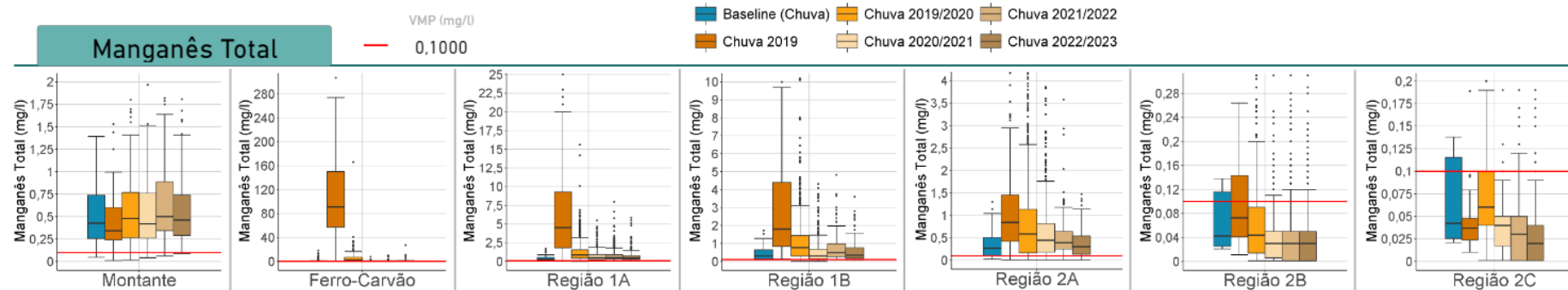
para esses parâmetros. Já na **Tabela 5.3.2.1-2** e na **Tabela 5.3.2.1-4**, são apresentados os resultados do teste de comparação temporal em cada região.

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



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

Gráfico 5.3.2.1-2 Boxplots Manganês total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Manganês total

	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

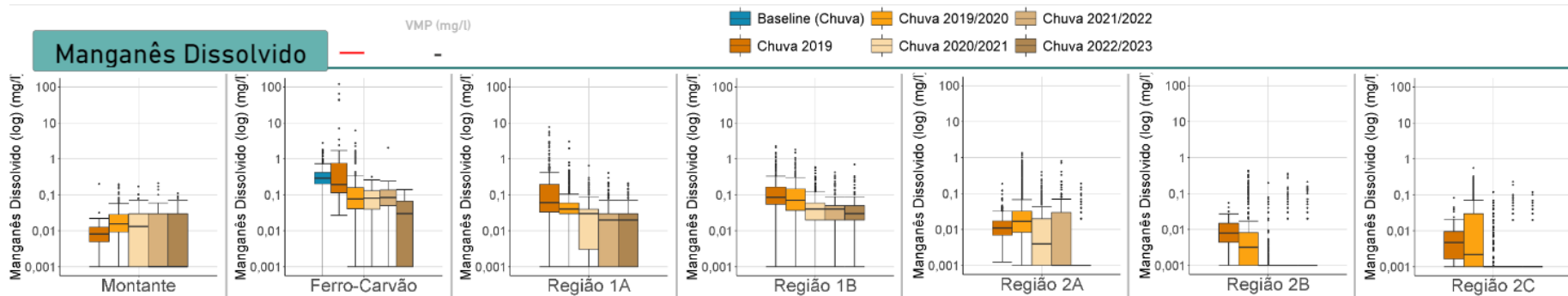
Tabela 5.3.2.1-2 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região

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

Legenda:

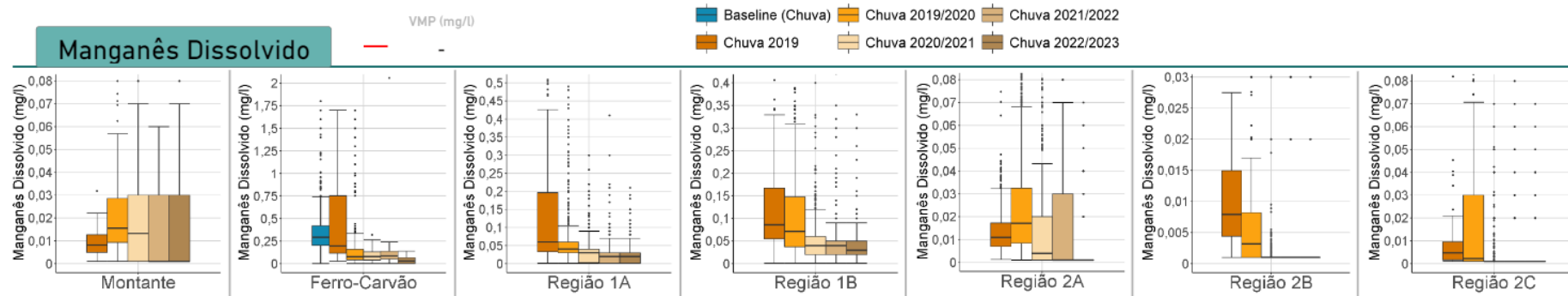
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e o período climático anterior (p-valor do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (p-valor do teste de 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Manganês dissolvido

	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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	<	~	~	~	<	<	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	<	<	<	<	<	<	<
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	<	<	<	<	<	<	<
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	<
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	<	<	~	<	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	<	<	<	<	<	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	<
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	<	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	>	<	<	>	<	~
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19 X Ch. Baseline	~	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondentes 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 galgamento das barragens B4 e B4-A, como também a montante. As respostas diferenciadas entre os períodos sazonais são observadas 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 impulsionam o arraste e a ressuspensão de materiais depositados no leito do rio Paraopeba e/ou carregados de forma difusa das áreas de contribuição adjacentes, resultando em um aumento nas concentrações de Manganês total. Consequentemente, durante os períodos de chuva, as concentrações desse analito apresentam maior variabilidade e níveis mais elevados, com prevalência de resultados acima dos limites legais desde a região de montante até o final da região 2A, tanto antes quanto depois do rompimento.

Em termos espaciais, considerando todos os períodos de chuva em conjunto, as concentrações de Manganês total registradas no ribeirão Ferro-Carvão foram significativamente mais altas do que aquelas observadas em todas as regiões do rio Paraopeba, indicando uma relação com a natureza dos rejeitos presentes nesse trecho fluvial. Além disso, foi possível observar que os teores desse parâmetro foram significativamente mais elevados nas regiões mais impactadas 1A e 1B em comparação com a região não impactada a montante. A partir da região 2A, as concentrações mostraram-se significativamente mais baixas, sem diferença estatística em relação à região Montante, o que pode indicar que trechos mais distais estão retornando a condições mais próximas ao comportamento natural da bacia. Esse padrão, descrito anteriormente, assemelha-se ao que foi relatado no Relatório de Fechamento de Ciclo do período chuvoso anterior, bem como na análise de Cluster (item 5.3.1), em que o ponto PT-52 está situado no grupo de pontos da Região 2A.

Levando-se em conta a comparação entre os diferentes períodos de chuva, verifica-se, em linhas gerais, predominância de comportamento de estabilidade (ausência de diferença significativa) e redução frente aos períodos pretéritos.

Na Região Montante, o período chuvoso de 2021/2022 apresentou uma elevação notável em comparação com os anos precedentes, inclusive em relação ao *baseline*. Esse aumento sugere uma influência significativa das chuvas mais intensas nesse intervalo sobre a qualidade da água, mesmo em trechos fluviais não impactados. Nos demais períodos analisados, englobando 2022/2023, constatou-se uma predominância de similaridade nos teores de Manganês total nessa região, mantendo-se em consonância com o *baseline* sazonal.

No ribeirão Ferro-Carvão, é notória a redução a partir das chuvas de 2019 e similaridade estatística entre os períodos chuvosos seguintes, principalmente a partir de 2020/2021, no qual há igualdade estatística ao *baseline* desse trecho.

Para as regiões 1A e 1B, mais afetadas pelo rompimento, o comportamento ao longo do tempo foi muito aproximado entre os diferentes períodos comparados, com teores mais elevados no período chuvoso de 2019, seguindo-se por redução sucessiva até as chuvas de 2020/2021 quando ocorreu elevação significativa em 2021/2022. Já no período chuvoso 2022/2023, notou-se atenuação frente ao período sazonal anterior e igualdade a 2021/2022. Da mesma forma, notam-se resultados estatísticos aproximados com os respectivos resultados de *baseline*, indicando retomada das condições naturais do rio Paraopeba nesses dois trechos no último período chuvoso.

No tocante à região 2A, verificou-se redução progressiva e significativa das concentrações de Manganês total desde as chuvas de 2019/2020, com similaridade entre os períodos 2021/2022 e 2020/2021 e, novamente, redução para 2022/2023, igualando-se também ao *baseline* do trecho.

Para as regiões seguintes (2B e 2C), com atenuação expressiva dos teores frente aos demais trechos de montante, em função da influência do reservatório de Retiro Baixo, foi possível verificar predominância de redução significativa ao longo tempo e teores significativamente inferiores ao *baseline* de referência a partir do período chuvoso de 2020/2021.

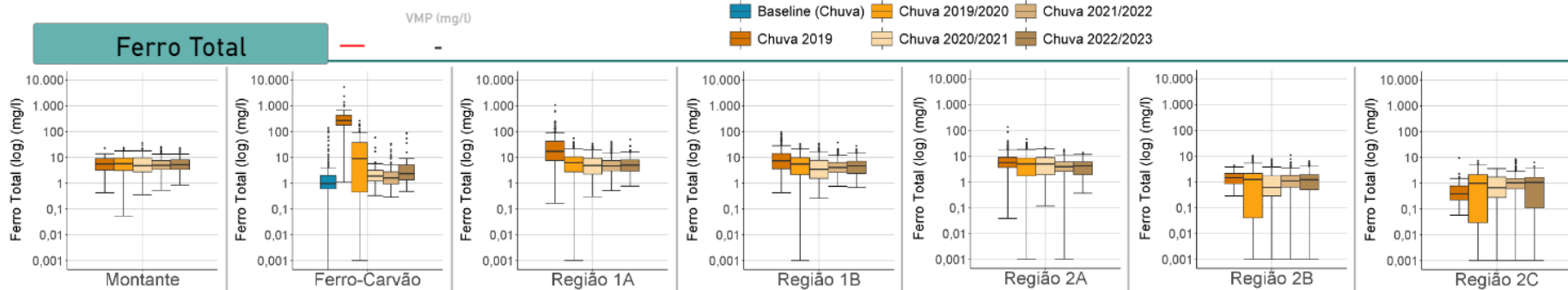
No que tange ao Manganês dissolvido, seus teores são expressivamente mais reduzidos que as frações totais, indicando uma evidente predominância das frações particuladas nas chuvas. Em geral, a comparação espacial, englobando todos os períodos chuvosos, incluindo 2022/2023, indica comportamento de variação relativamente aproximado ao observado para a fração total, com concentrações superiores no ribeirão Ferro-Carvão se comparadas às concentrações registradas nas demais regiões monitoradas no rio Paraopeba.

Em termos de comparação temporal, em âmbito geral, ao considerar cada um dos períodos de chuva comparados separadamente, nota-se predominância de comportamento de redução sucessiva ao longo do tempo, com semelhança estatística entre os períodos chuvosos 2022/2023 e 2021/2022 nas regiões Montante, 1A e 1B. Para as regiões 2A e 2B, ocorreu redução no período mais recente e, para a região 2C, ao contrário, foi indicada estabilidade. Vale ressaltar que não há *baseline* disponível para fins comparativos, exceto para a região Ferro-Carvão para a qual os resultados dos períodos chuvosos subsequentes indicam teores predominantemente inferiores.

5.3.2.2. Ferro total e dissolvido

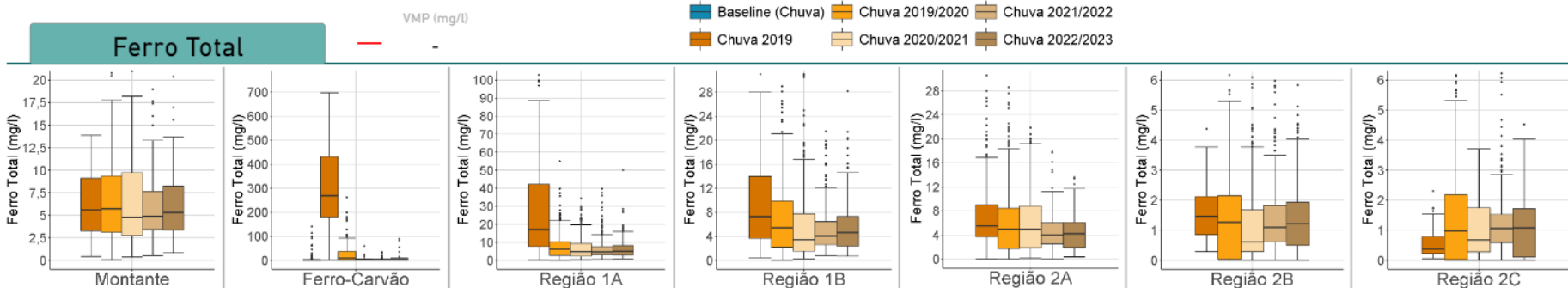
No conjunto entre o **Gráfico 5.3.2.2-1** e o **Gráfico 5.3.2.2-4** são apresentados os *Boxplots* dos parâmetros Ferro total e dissolvido, respectivamente. Na **Tabela 5.3.2.2-1** e na **Tabela 5.3.2.2-3** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro total

	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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	<	~	<	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	<	~	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	~	<	<	~	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondentes 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa

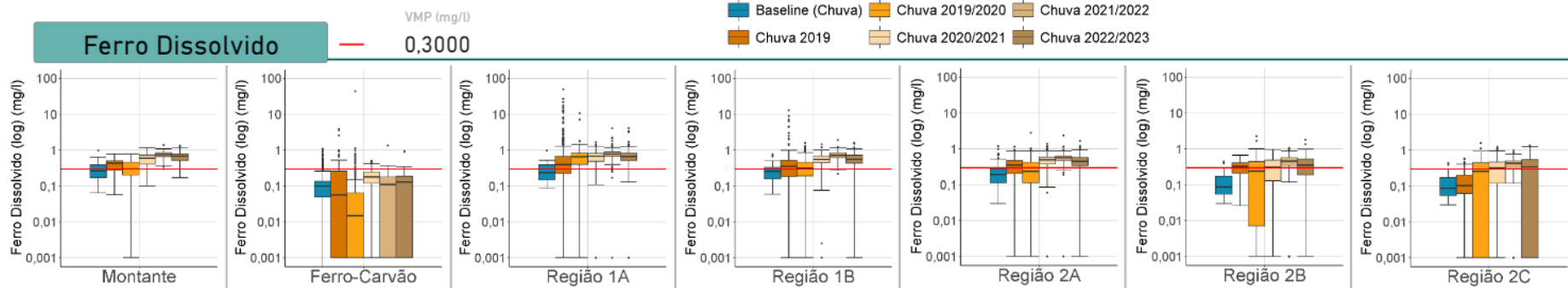
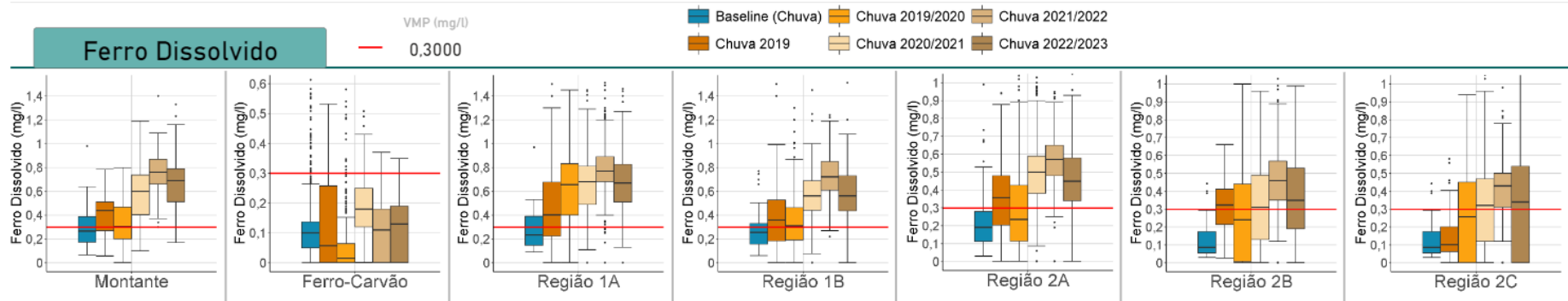


Gráfico 5.3.2.2-4 *Boxplots* Ferro dissolvido para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável



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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro dissolvido

	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 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	<	<	<	<	<	<
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	<	>	>	~	<	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	~	>	>	>	>	~	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	<	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	>	>	~	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	>	>	>	>	~	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 19/20 X Ch. 19	~	~	>	~	<	<	~
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	~	~	>	>	>	~	~
Ch. 19 X Ch. 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 no rejeito e é parte da matriz geológica da região. Ele é significativamente influenciado pela sazonalidade, com concentrações mais altas durante os períodos chuvosos em comparação com os períodos de estiagem. Isso ocorre devido à predominância de frações particuladas quando chove, resultando no carreamento de sedimentos da bacia por meio do escoamento superficial. Além disso, durante os períodos chuvosos, a ressuspensão de materiais depositados no leito fluvial é aumentada devido a condições hidrodinâmicas mais intensas nesse período.

Observa-se, de maneira espacial, que na região Ferro-Carvão, as concentrações de Ferro total na água superficial são estatisticamente mais baixas em comparação com as regiões Montante, 1A, 1B e 2A. Essa diferença pode ser atribuída, provavelmente, à influência das atividades de contenção e restauração realizadas no leito desse curso de água ao longo do tempo. Essa característica pode ser comprovada pela redução significativa dos teores de ferro total durante os períodos chuvosos de 2019 e 2019/2020, e essa condição tem se mantido até 2022/2023.

A análise estatística indica que a região 1A se encontra semelhante à região Montante e vem apresentando redução ou estabilidade ao longo do tempo, o que pode sinalizar uma retomada de condições próximas à natural por se tratar de trechos contíguos, embora não haja *baseline* pra Ferro total para o rio Paraopeba. A região 1B, também considerada como uma das mais afetadas pelo rompimento, aponta concentrações significativamente inferiores à própria região Montante e se iguala estatisticamente à região 2A, a partir da qual se verifica comportamento de atenuação ao longo das regiões seguintes, evidenciando redução progressiva dos teores no decurso do espaço. No âmbito temporal, há predominância de estabilidade, na bacia como um todo, mas também de redução no decorrer dos períodos chuvosos analisados. Indicações de elevações ocorreram de forma pontual (2021/2022) nas regiões mais distais, 2B e 2C, com estabilidade no período chuvoso 2022/2023.

O comportamento do parâmetro Ferro na fração dissolvida não se assemelha ao observado para a fração total. Diferentemente, seus teores apresentam prevalência de aumento sucessivo ao longo do tempo em todas as regiões, com redução apenas para o período chuvoso 2022/2023 frente a 2021/2022. Em linhas gerais, há um distanciamento progressivo das condições de *baseline*, inclusive para a região Montante não afetada. Tal característica não é evidenciada, no entanto, para a região Ferro-Carvão, onde predominam teores mais baixos de Ferro dissolvido em relação a todas as demais regiões do rio Paraopeba, como também estabilidade temporal e similaridade estatística com o *baseline*.

A mobilização de metais, isto é, a transferência de metais da fase sólida (como solos, sedimentos, ou rejeitos de mineração) para a fase líquida (como corpos d'água) é regida, em geral, pela forma em que o metal está presente em fase sólida e a estabilidade química das fases envolvidas. A estabilidade, por sua vez, relaciona-se com a solubilidade mineral, incluindo a interrelação entre solubilidades, frente às condições geoquímicas do meio aquoso, principalmente pH, e potencial redox (Eh) no caso dos elementos redox-sensíveis.

Ainda, diversos podem ser os fatores que controlam a solubilização dos metais, na água como os fatores geológicos e o intemperismo de rochas contribuem para a desagregação e acúmulo de sedimentos em planícies de inundação e a composição do material desagregado que fica disponível ao transporte. Nos períodos de chuvas, o escoamento superficial numa bacia hidrográfica aumenta o transporte de sedimentos para os cursos d'água e, como consequência, a turbidez e a concentração de metais, entre outros materiais escoados para o sistema aquático também aumentam.

Os fatores químicos, físico-químicos, geológicos, pedológicos não regulam exclusivamente a disponibilidade do Ferro na água. Os fatores antrópicos como desmatamentos e aumentos de áreas desnudas e erosivas contribuem para acelerar o carreamento de sedimentos para os rios, e disponibilizar, por exemplo, metais na água.

Verificando-se a evolução do pH, OD e temperatura ao longo do espaço e tempo tem-se que, de modo geral, o pH (**Figura 5.3.2 a**) do período de chuvas estudado de 2019 ao final do verão de 2023 variou entre 6 e 8. Entre 2019 e as chuvas de 2020/2021, o pH apresentou redução nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B até as chuvas 2020/2021, seguido de leve aumento em 2021/2022 e nova queda no pH em 2022/2023.

A temperatura da água no rio Paraopeba desde a região de Montante até a região 2B variou entre 20 C e 28C, porém percebeu-se uma diminuição na temperatura até o período das estações de chuvas de 2021/2022, seguido por aumento predominante nas chuvas de 2022/2023. Estas temperaturas quando comparadas ao *baseline* de chuvas evidenciaram a tendência de queda da temperatura neste período todo (**Figura 5.3.2 b**).

Em relação ao OD, ele manteve o caráter aeróbico no rio, porém, percebeu-se que ele foi menor que o *baseline* no período de 2019 até as chuvas de 2020/2021 desde a região Montante até 2B. Após este período constataram-se que algumas regiões apresentaram aumentos e ficaram com valores até maiores que o *baseline* de chuvas como na região Montante (2022/2023) e na região 2A a partir de 2021/2022 (**Figura 5.3.2c**).

Em relação ao Fe total dissolvido, ele pode aparecer em diferentes formas como a solúvel (Fe 2+) e a mais insolúvel (Fe3+) e não depende de fator controlador único como indicado acima. O Fe pode se solubilizar sob pH mais ácidos menores que 7. Constatou-se a redução do pH no período até 2021/2022 e aumento em 2022/2023 na maioria das regiões. Nestas condições de pH pouco ácido verificou-se que o Fe dissolvido aumentou nas regiões Montante, 1A, 1B, 2A até as chuvas de 2021/2022. Nas chuvas de 2022/2023 suas concentrações foram menores em relação ao período anterior coincidindo com o aumento do pH para valores neutros ou pouco mais alcalinos deste mesmo período. A temperatura mediana estava ao redor dos 25 C, que pode é um fator que pode auxiliar na solubilização do Ferro.

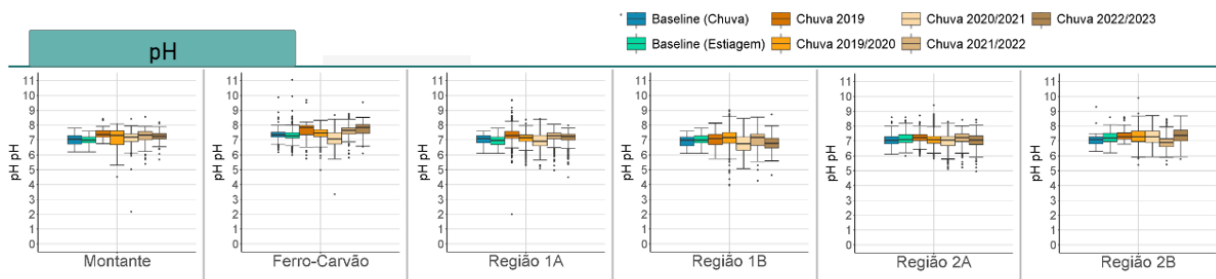
Ainda para o Ferro, a mobilidade seria controlada, em princípio, pela estabilidade geoquímica dos seus óxi-hidróxidos em contato com a água. Nestes casos, as fases termodinamicamente mais solúveis devem controlar os teores dissolvidos do metal envolvido na composição do óxi-hidróxido em contato com os corpos d'água (Stumm & Morgan, 1996). Assim, conjectura-se, por exemplo, que teores de Fe total dissolvido, em cursos d'água sobre influência do Quadrilátero Ferrífero, possam ser controlados pela solubilidade de óxidos amorfos, presentes em solos ou sedimentos fluviais oriundos daquela área de contribuição.

Um outro aspecto complementar que pode auxiliar no entendimento desse comportamento pode ser a natureza do elemento ferro associado ao rejeito, sob formas cristalinas, como o predomínio de hematita (Fe₂O₃) no caso do rompimento da barragem ou outros óxidos cristalinos. Minerais cristalinos tem menor potencial de solubilização relativa em água, quando

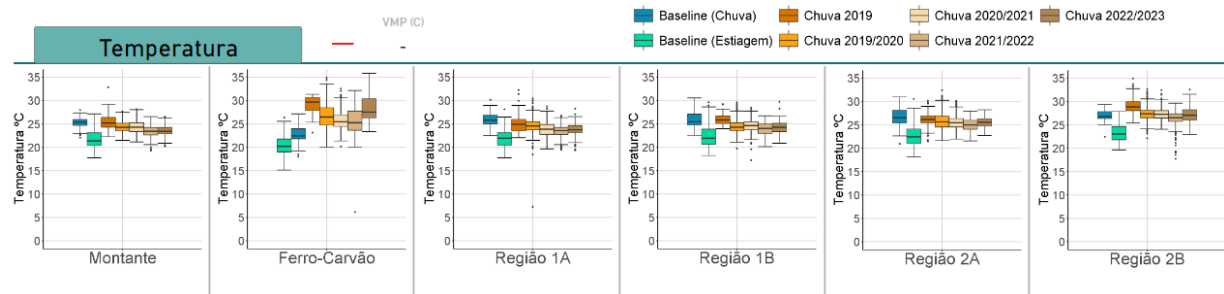
comparados aos amorfos, visto que a tensão superficial relativa destes últimos é maior e possibilita as trocas iônicas e solubilizações de íons. Uma possibilidade de isso estar ocorrendo é ao ver os resultados do Ferro dissolvido da região do Ferro-Carvão em relação as demais regiões avaliadas que demonstrou uma menor solubilização. Dentro do escopo deste projeto não é possível afirmar as fases minerais que os materiais estão envolvidos, somente conferir uma possibilidade. Por fim, os óxidos e hidróxidos de ferro coloidais e amorfos, com maior poder de solubilidade em meio aquoso, apresentam-se móveis e capazes de maiores interações (água-sedimento).

Figura 5.3.2- Evolução dos parâmetros físico-químicos no tempo e no espaço em relação aos períodos sazonais de chuva para A) pH; B) temperatura e C) oxigênio dissolvido.

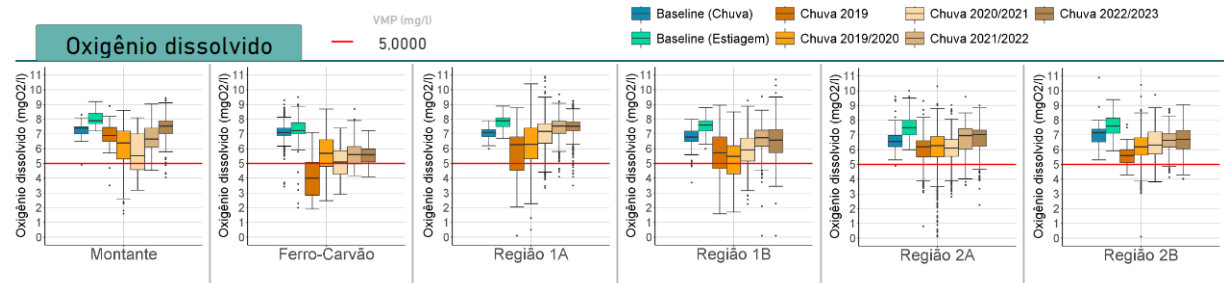
A)



B)



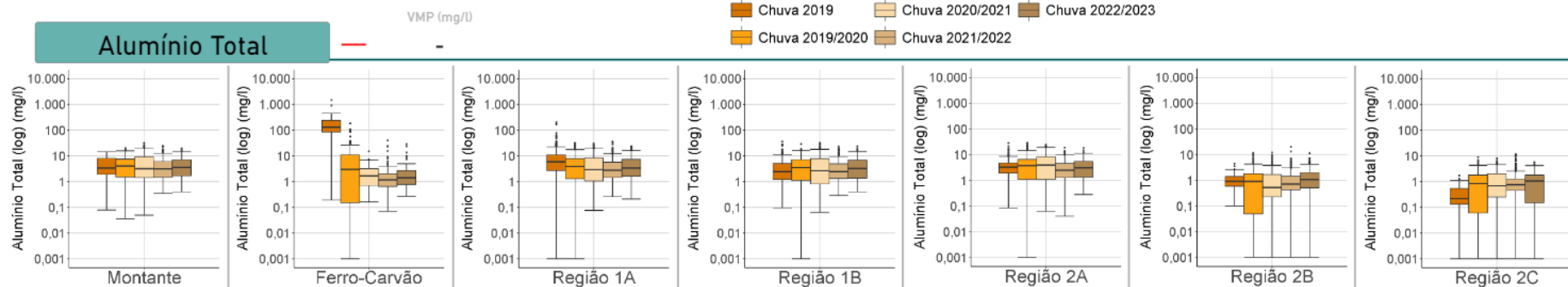
C)



5.3.2.3. Alumínio total e dissolvido

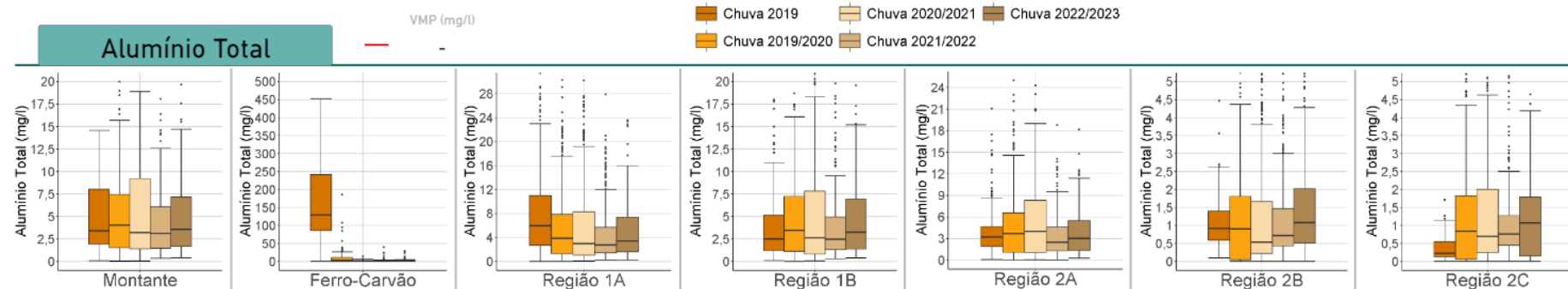
Entre o **Gráfico 5.3.2.3-1** e o **Gráfico 5.3.2.3-4** são apresentados os *Boxplots* dos parâmetros Alumínio total e dissolvido, respectivamente. Na **Tabela 5.3.2.3-1** e na **Tabela 5.3.2.3-3** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio total

	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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	>	~	~	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	~	~	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	<	~	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	~	~	~	>	~	>
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	~	<	~	>	<	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch. 19 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondentes 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala fixa

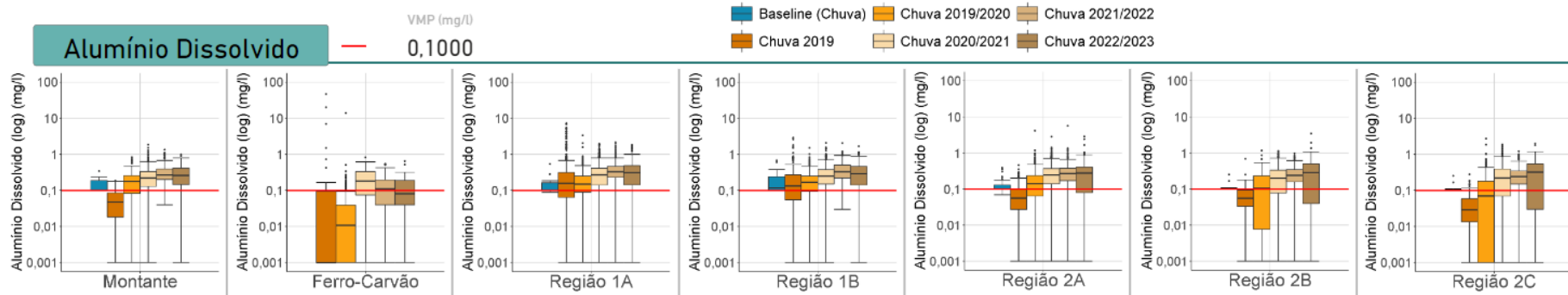
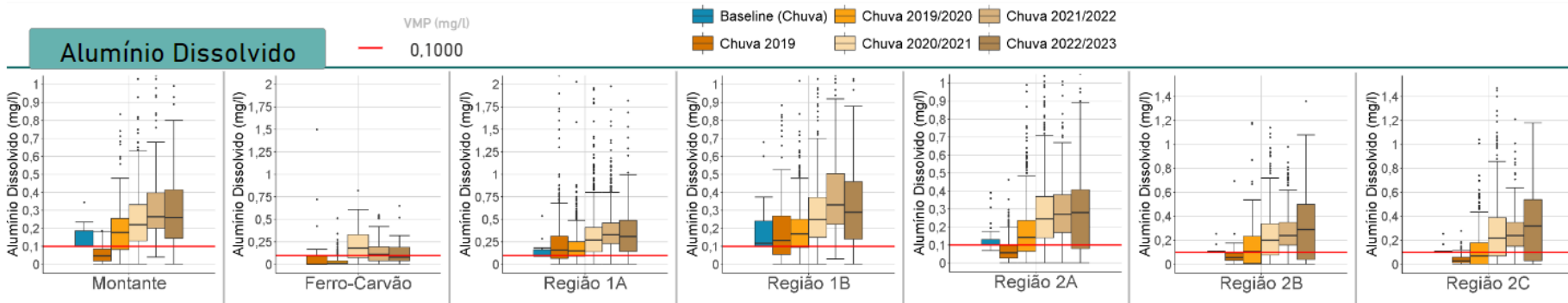


Gráfico 5.3.2.3-4 *Boxplots* Alumínio dissolvido para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável



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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio dissolvido

	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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	<	~	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	<	~	>	~	~	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	NA	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	<	>	>	>	>	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	NA	>	>	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	NA	>	>	>	>	>	>
Ch. 19/20 X Ch. 19	~	>	~	~	>	>	>
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	NA	>	~	~	>	~	~
Ch. 19 X Ch. Baseline	NA	~	>	~	~	~	~

NA Ausência de resultados em determinado período OU Teste não aplicado pois 100% dos resultados são correspondentes 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)

Da mesma forma que observado para o Ferro total, os teores de Alumínio total nas regiões Montante, 1A, 1B e 2A são significativamente mais altos em comparação com a região Ferro-Carvão. As regiões Montante e 1A mostram semelhança em seus níveis de concentração, seguidas por reduções sucessivas até a região 2C. No entanto, é importante destacar que a região 1B e a região 2A apresentam similaridade estatística.

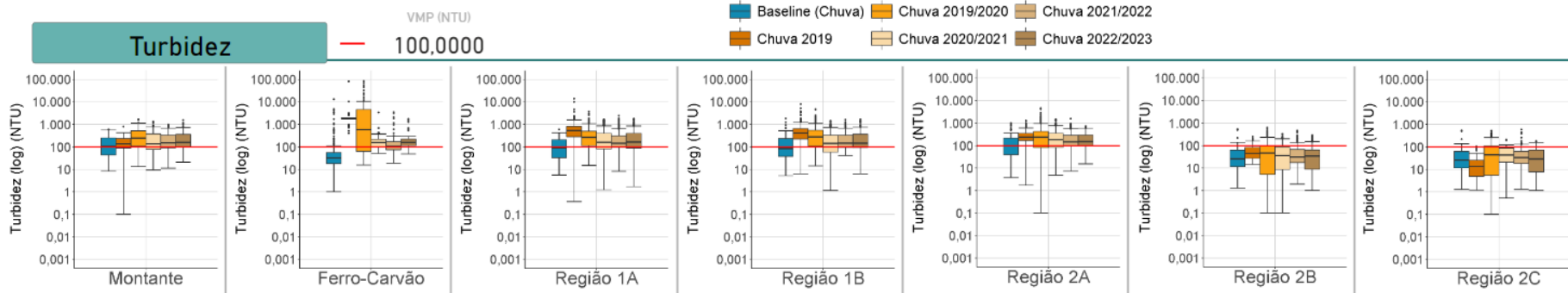
Do ponto de vista temporal, a maior parte das regiões avaliadas demonstra um comportamento estável em relação aos teores de Alumínio total ao longo do tempo. A exceção é observada no aumento das concentrações na região 1A durante o período chuvoso de 2022/2023. Além disso, há incrementos sucessivos a partir de 2020/2021 na região 2B. Já na região 2C, após elevações progressivas até o período de 2020/2021, as concentrações se mantêm estáveis até 2022/2023.

Em relação às frações dissolvidas de alumínio, assim como o ferro dissolvido, todas as regiões apresentam concentrações mais altas do que a região Ferro-Carvão. A região 1A possui níveis superiores à região Montante, seguida por uma redução na região 1B, que se iguala à região Montante. Posteriormente, observa-se uma redução progressiva ao longo da maior parte das outras regiões do rio Paraopeba. Quanto à variação ao longo do tempo, há uma predominância de aumento em toda a bacia, incluindo a região Montante que não foi impactada. No entanto, é possível perceber condições de estabilidade a partir do período chuvoso de 2020/2021. Especificamente para as regiões 1A e 1B, observa-se uma redução em 2022/2023 em comparação com o período 2021/2022. Com exceção da região Ferro-Carvão, para a qual não há *baseline* monitorado, todas as outras regiões apresentam níveis significativamente mais altos do que os *baselines* correspondentes durante os períodos chuvosos analisados.

5.3.2.4. Turbidez

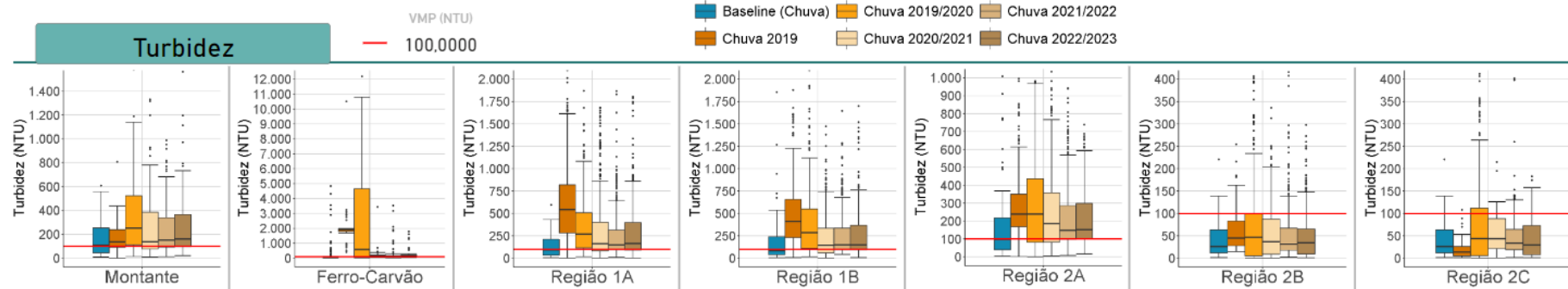
No **Gráfico 5.3.2.4-1** e no **Gráfico 5.3.2.4-2** são apresentados os *Boxplot* do parâmetro Turbidez. Na **Tabela 5.3.2.4-1** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Turbidez

	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 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	~	<
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	~	~	~	~	<
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	<	<	<	<	<	<
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	~	~	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	<	<	<	<	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	<	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	~	<	<	<	<	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	~
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	>	<	<	~	~	>
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 19 X Ch. 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 nos parâmetros de manganês e ferro nas respectivas frações totais, é fortemente afetado pela sazonalidade. Geralmente, os níveis de Turbidez são mais elevados durante os períodos chuvosos em comparação com os períodos de estiagem. É importante ressaltar que essas variações sazonais podem ocorrer devido a diferentes fatores, além do rompimento, que podem contribuir para a Turbidez da água.

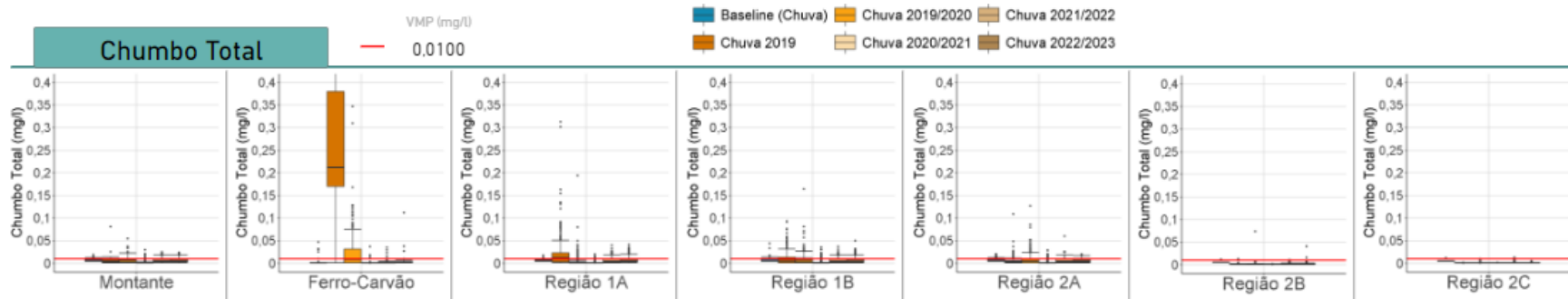
Especialmente, os resultados de Turbidez registrados indicam que todas as regiões apresentam teores inferiores à região Ferro-Carvão. Na região 1A, as concentrações são significativamente superiores à região Montante, seguidas de estabilidade e redução para as regiões mais a jusante. A partir da região 2B, sob influência do reservatório de Retiro Baixo e com as mudanças das condições hidráulicas de escoamento, os teores de Turbidez são mais reduzidos e significativamente inferiores aos demais trechos fluviais a montante. Essa condição se mantém na região 2C, localizada após o reservatório de Retiro Baixo, sem diferença significativa em relação à região 2B, evidenciando a capacidade de sedimentação e retenção de sólidos no interior do reservatório e consequente influência na qualidade da água nos pontos de jusante.

No âmbito temporal, notam-se condições de estabilidade e redução das concentrações desde o período chuvoso 2019/2020. A partir do período 2021/2022, os teores se estabilizaram para todas as regiões, exceto para a região 2C, onde se notou atenuação. Ainda pode ser pontuado que os resultados se encontram superiores ao *baseline* na maior parte do rio Paraopeba, inclusive em Montante e no ribeirão Ferro-Carvão. Semelhanças estatísticas com as condições naturais são observadas apenas nas regiões 2B e 2C.

5.3.2.5. Chumbo Total

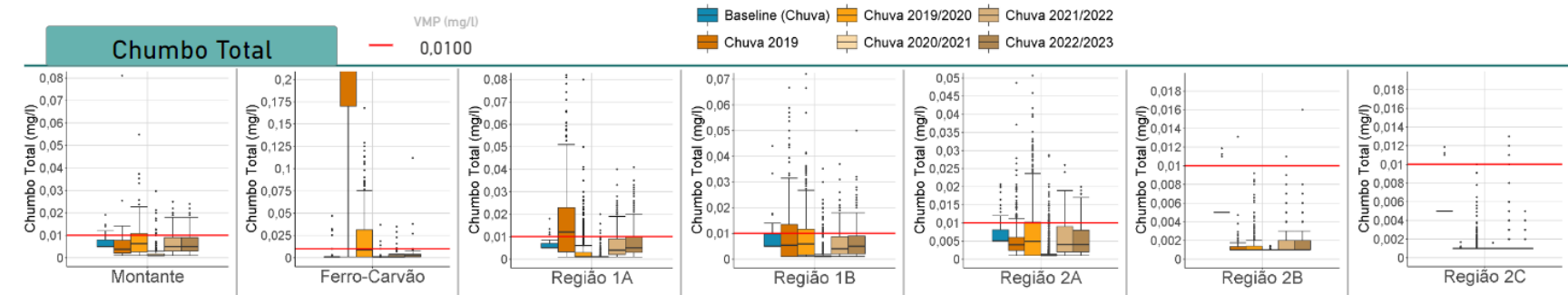
No **Gráfico 5.3.2.5-1** e no **Gráfico 5.3.2.5-2** são apresentados os *Boxplots* do parâmetro Chumbo total. Na **Tabela 5.3.2.5-1** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva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

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



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

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



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

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

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

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	>	~	>	~	~	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	>	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	<	~	>	~	~	~	>
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	<	<	<	<	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	<	<	<	<	<	~
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	>	<	<	<	<	<	<
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	~	<	~	~	~	>
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	>	>	~	>	>	~	~
Ch. 19 X Ch. 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 Chumbo total não é um marcador principal e é influenciado por contribuições diversas, não necessariamente relacionadas ao rompimento, com destaque para sua variabilidade nos períodos chuvosos. Com isso, vale destacar que em todos os períodos e regiões, incluindo os períodos de estiagem, a maioria das amostras apresentaram resultados pouco variáveis e inferiores ao VMP, tal como em relação aos *baselines* respectivos. Vale destacar, também, a presença de resultados *outliers*, principalmente nos trechos mais afetados (Região 1A e 1B), o que poderia indicar comportamento pontual não recorrente.

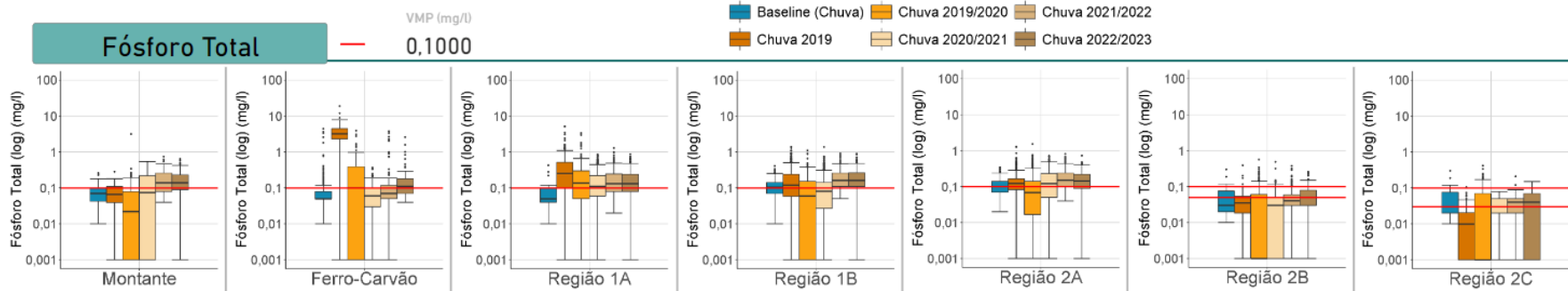
Em termos espaciais, considerando todos os períodos de chuva conjuntamente, as concentrações de Chumbo total registradas no ribeirão Ferro-Carvão foram iguais ou inferiores àquelas registradas às demais regiões localizadas no rio Paraopeba. É possível observar, também, que seus teores foram significativamente mais reduzidos na região 1A, mais afetada, quando comparada à região Ferro-Carvão e, ademais, à região Montante (não impactada), por exemplo. Na região 1B, já em trecho também de grande influência das ocupações urbanas, percebe-se incremento dos teores, que se igualam estatisticamente ao trecho de Montante e Ferro-Carvão. No decorrer do espaço, há redução progressiva das concentrações até a região 2C.

Levando-se em conta a comparação entre os diferentes períodos de chuva, verifica-se, em linhas gerais, predominância de comportamento de estabilidade e aumento frente aos períodos pretéritos, com destaque para os períodos mais recentes a partir de 2020/2021. Importante ponderar que essas diferenças estatísticas indicadas de incremento, podem ser justificadas pela alteração do limite de quantificação do método analítico. No período de 2021/2022, o LQ reduziu, permitindo identificar maior variação de resultados quantificados frente ao período 2020/2021.

5.3.2.6. Fósforo total

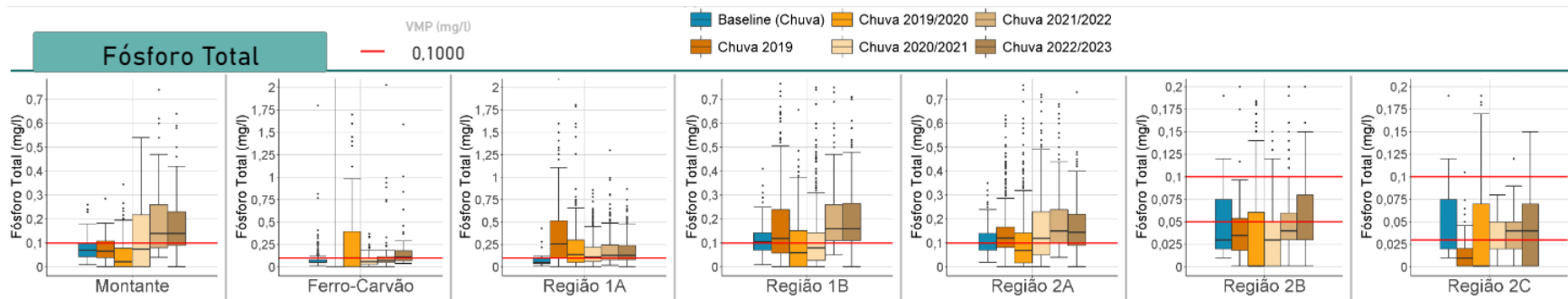
No **Gráfico 5.3.2.6-1** e no **Gráfico 5.3.2.6-2**, é apresentado os *Boxplots* do parâmetro Fósforo total. Na **Tabela 5.3.2.6-1** são apresentados os resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Fósforo total e, na **Tabela 5.3.2.6-2**, são apresentados os resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.

Gráfico 5.3.2.6-1 *Boxplots* Fósforo total para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 5.3.2.6-2 *Boxplots* Fósforo total para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, escala ajustada e variável



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

Tabela 5.3.2.6-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Fósforo total.

	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 5.3.2.6-2 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	>	>	>	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	>	~	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	<	>	<	>	>	>	>
Ch. 22/23 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	>	>	>	>	>	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	>	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 19	<	>	<	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	<	>	~	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19	<	~	<	<	~	~	>
Ch. 20/21 X Ch. Baseline	>	~	>	<	~	~	~
Ch. 19/20 X Ch. 19	<	<	<	<	<	<	~
Ch. 19/20 X Ch. Baseline	>	<	>	<	<	<	<
Ch. 19 X Ch. 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-se todos os períodos chuvosos simultaneamente, a região Montante se apresenta similar estatisticamente à região Ferro-Carvão, seguida de incremento dos teores na região 1A e atenuação para a região 1B. Embora haja mais uma elevação na região 2A, as demais regiões seguintes apresentam comportamento de redução sucessiva. 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. 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 que diz respeito à região do ribeirão Ferro Carvão, mais afetada pelo rompimento da barragem, observam-se concentrações significativamente mais elevadas no ano de 2019, indicando associação com o rompimento (contribuição do rejeito, arraste de materiais como solo, matéria orgânica de origem vegetal etc.). Tal condição também pode ser notada para a região 1A, no mesmo período pós rompimento. Para ambos os casos, verifica-se redução significativa no período chuvoso seguinte (2019/2020). Nos demais períodos, as concentrações oscilam, o que indicaria a contribuição de outras fontes de fósforo além do rejeito, com especial atenção para as fontes difusas (drenagem de áreas urbanas e agrícolas), quando da ocorrência de chuvas.

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 da barragem, 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.

Ressalta-se que os resultados discutidos para este analito corroboram, em parte, com os apresentados no projeto Entire (ENTIRE, 2022), 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. Os resultados da modelagem indicaram que as concentrações de Fósforo total aumentaram acima das condições pré-rompimento, principalmente no trecho entre o ribeirão Ferro-Carvão e o barramento da termelétrica de Igarapé. Além disso, as concentrações de Fósforo total foram mais elevadas durante a estação chuvosa do que durante a estação seca. Após o barramento da UTE Igarapé, somam-se outras influências da bacia, como agricultura, ocupação urbana, efluentes e mineração. Entretanto, ressalta-se que, mesmo nas regiões mais afetadas (Ferro Carvão até 1B), é importante discriminar as outras fontes de fósforo oriundas da própria área de drenagem da bacia.

De toda maneira, nota-se que elevações para Fósforo total vêm ocorrendo desde as chuvas de 2020/2021 e de forma generalizada em toda a bacia, incluindo-se a região Montante. No período chuvoso 2022/2023, por outro lado, ocorreu estabilidade frente a 2021/2022.

5.3.3. Análise de tendência temporal

Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados na **Tabela 5.3.3-1** considerando a série completa de dados (todos os períodos sazonais de chuva e de estiagem desde 25/01/2019 até 31/03/2023) e, na **Tabela 5.3.3-2**, para a série de chuva (todos os períodos de chuva, desde 2019 até 2023). 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 podem ser consultados no **Anexo IV-D**. Ademais, como complemento, os resultados e discussões referentes às séries de estiagem podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (25/01/2019 a 30/09/2022) (ARCADIS, 2022b).

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, 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 indicada a existência de tendência de elevação.



	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 105 / 373

Tabela 5.3.3-1 - 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 31/03/2023) – 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↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	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↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Alumínio Total	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST
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↑
TRAÇOS																												
Chumbo Total	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
OUTROS																												
Fósforo Total	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 106 / 373

Tabela 5.3.3-2 - Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) – 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↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	
Manganês Dissolvido	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	
Ferro Total	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	
Alumínio Total	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	ST	T↑	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	
Turbidez	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
TRAÇOS																													
Chumbo Total	ST	T↓	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST
OUTROS																													
Fósforo Total	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	

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

5.3.3.1. Manganês total e dissolvido

Tendo em vista a aplicação do teste de tendência temporal aos dados medianos mensais para o parâmetro Manganês em suas frações total e dissolvida, é possível verificar predominância de tendência de redução ou ausência de tendência para a série completa de dados nos pontos distribuídos nas diferentes regiões. O mesmo comportamento pode ser indicado para a aplicação do teste limitado apenas aos períodos chuvosos consecutivos.

Para Manganês total, nota-se ausência de tendência na região Montante, diferentemente da fração dissolvida, com comportamento de redução nesse trecho. Maior prevalência de redução ocorre para as regiões 1A, 1B e início da região 2A (até o ponto PT-54), onde prevalece estabilidade até novamente ser apontada redução no PT-55, já próximo ao remanso do reservatório de Retiro Baixo. Neste trecho (região 2B), a tendência de redução permanece em todos os pontos do reservatório e em boa parte da região 2C. Na fração dissolvida, em grande parte sob tendência de redução, estas se apresentam mais distribuídas ao longo do rio Paraopeba em ambos os recortes de aplicação do teste. 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, a aplicação do teste indica predomínio de tendência de estabilidade, com indicações de redução em alguns pontos das regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, tanto para a série completa de dados quanto apenas ao recorte restrito aos períodos chuvosos.

No que diz respeito ao Ferro dissolvido, nota-se, ao contrário, tendência de aumento, predominante nos trechos do rio Paraopeba, desde a região Montante, principalmente para a série completa dos dados, com destaque para as regiões 1B e 2A e, em menor monta, para a região 1A. Esta, por sua vez, apresentou tendência significativa de redução em relação ao Ferro total, e tendência de elevação na fração dissolvida, no recorte de dados limitado aos períodos chuvosos.

5.3.3.3. Alumínio total e dissolvido

Com relação ao parâmetro Alumínio total, o comportamento no recorte que considera todos os períodos sazonais aponta predominância de ausência de tendência na maior parte da bacia do rio Paraopeba. Exceção pode ser verificada para a região 2A, onde se observa tendência de elevação a partir do ponto PT-17 que reverbera esse comportamento até o início do reservatório de Retiro Baixo (PT-20). Por outro lado, quando são considerados apenas os períodos chuvosos sucessivos, a tendência de aumento das concentrações é pontual e restrita apenas a alguns pontos isolados (PT-19 e PT-22).

Vale pontuar que, na região 2A, mais extensa, há uma variedade de unidades geológicas quando se observa o mapa geológico regional da bacia do rio Paraopeba (CPRM, 2019),

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, e que no mapa geológico se verifica aflorar nas proximidades do PT-18. Regionalmente, predominam os metassedimentos da Formação Serra de Santa Helena constituídos por metassilito/metargilito, metaarcósios esverdeado a acinzentado quando fresco, mas com diversas cores de alteração, variando de amarelado a rosado. A mineralogia básica dessas rochas compõe-se de argilas, mica, feldspato ((Na,K Ca), (Al) (Si,Al)Si₂₋₃O₈), quartzo, serpentina, acessórios como anfibólios, magnetita (Fe₂O₃), óxidos e também há os aluviões que estão presentes ao longo da planície de inundação do rio. Assim como ocorre na região montante, o produto do intemperismo de rochas ou condição pedogenética ou ainda o uso do solo permite a disponibilização de materiais para a água superficial.

Ademais, Campos, L (2018) estudou os filossilicatos das formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade e verificou índices de variação composicional distintos, os quais atribuiu que houve variação da rocha fonte. Segundo estudos levantados por Campos, L. (2017), a caulinita, illita, clorita e esmectitas, são os argilominerais que constituem os pelitos, quer como partícula detrítica condicionada pelo contexto tectônico e condições deposicionais quer como espécie autigênica formada a partir de reações no sítio deposicional ou serem resultantes de transformações de um mineral precursor. Esses argilominerais são hidratados e possuem alumínio e ferro em sua composição.

Em relação ao Alumínio dissolvido, mantem-se predominância de tendência de aumento significativo para a série completa e ausência ou indicativo de elevação para a série de estiagem, inclusive no ponto de montante não afetado, o que pode indicar uma condição inerente a própria bacia.

5.3.3.4. Turbidez

Ao se analisar a série completa de dados, nota-se predomínio de ausência de tendência, e de tendência significativa de redução nas regiões mais afetadas Ferro-Carvão, 1A e início da 1B. Considerando-se apenas os períodos chuvosos, intensifica-se a predominância de ausência de tendência com reduções pontuais ainda na região Ferro-Carvão (PT-11), 1A (PT-02) e, por outro lado, elevação nos pontos PT-19 (região 2A) e PT-22 (região 2C).

5.3.3.5. Chumbo total

Quanto ao analito Chumbo total, é possível verificar predominância de ausência de tendência ao longo do corpo hídrico, com indicativos de redução no PT-11 (Ferro Carvão) na série completa e de chuva. No que diz respeito à elevação, tendência significativa foi detectada somente na série restrita aos períodos chuvosos, nos pontos PT-01 e PT-13 (região 1A) e JRB-02 (região 2C).

5.3.3.6. Fósforo total

O analito Fósforo total também indica predominância de ausência de tendência ao longo do rio Paraopeba, com ocorrência de tendências variadas em pontos específicos. Para a série completa dos dados, os indicativos de redução ocorreram no 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). Já na série de chuva, foi apontada tendência de redução nos pontos PT-52 (montante) e PT-17 (Região 2A).

Em termos de elevação, tendência significativa foi detectada na série completa de dados apenas na região 1A (PT-19 e PT-02), enquanto na série de chuva, houve indicativo somente no PT-02. A variabilidade das concentrações deste parâmetro ao longo das regiões pode ser justificada pelas diferentes fontes de poluição, sejam elas difusas ou pontuais, ao longo da bacia, o que pode contribuir para a não detecção de tendência temporal ao longo da série histórica.

5.3.4. Mapas temáticos - *baseline*

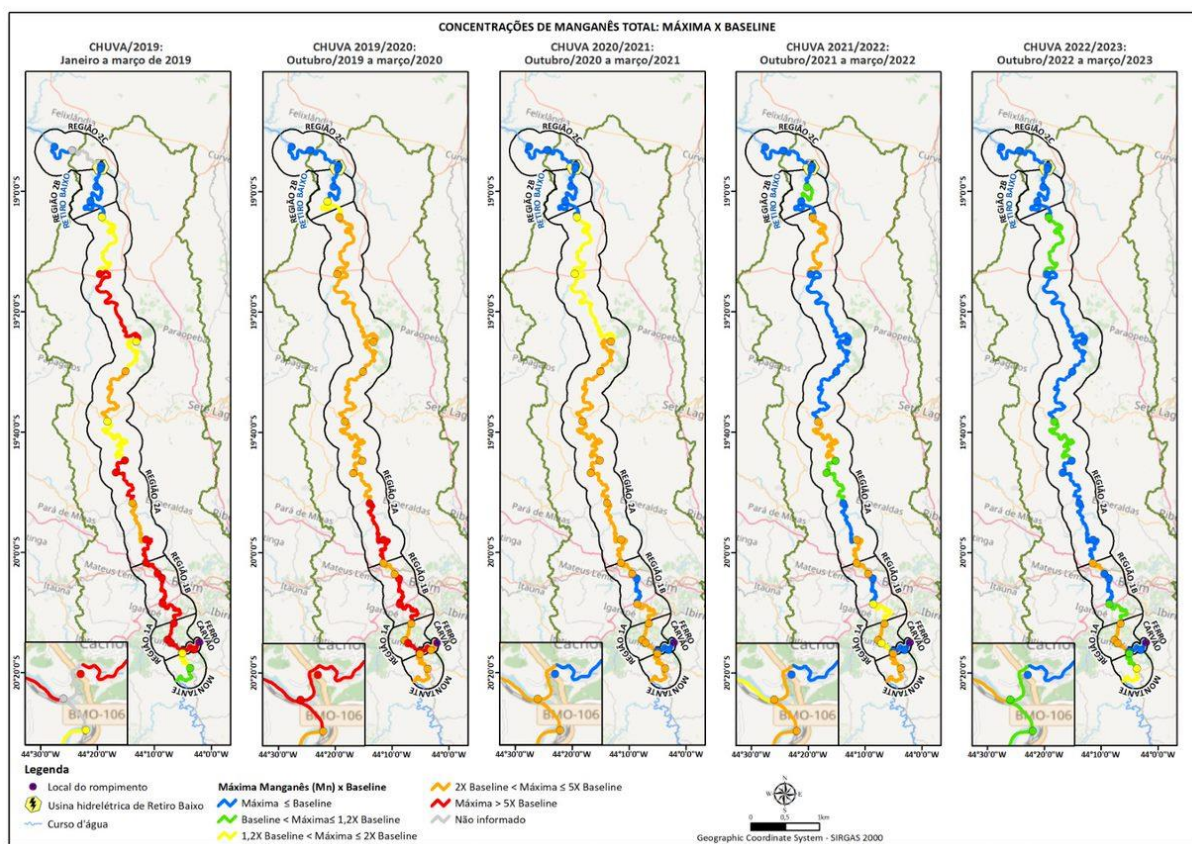
Os resultados para Manganês total (**Figura 5.3.4-1**) indicam que houve manutenção e atenuação expressiva de suas concentrações máximas ao longo dos períodos sucessivos de chuva em todas as regiões monitoradas. Essa avaliação acrescenta uma camada adicional às diversas análises, com distintas métricas, 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. Compreende-se, no entanto, que tais eventos podem ser considerados atípicos, o que pode estar relacionado a comportamentos peculiares do corpo hídrico, influenciados por condições hidrometeorológicas singulares ou extemporâneas ou intervenções antrópicas pontuais.

Na chuva/2019, entre as regiões Ferro-Carvão e 2A houve predomínio de concentrações máximas superiores a 5 vezes o valor do *baseline*. No ciclo chuvoso seguinte, 2019/2020, essa condição de afastamento manteve-se recorrente, porém já foi possível observar atenuação das concentrações nos pontos localizados no final da região 2A, com predomínio de concentrações máximas entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline*. No período de chuva 2020/2021, a condição de atenuação das concentrações máximas se estendeu nas regiões do ribeirão Ferro Carvão até 2A, com a maior parte dos pontos das referidas regiões com concentrações entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline*, destacando-se as melhores condições ao final da região 2A, com pontos com concentrações de Mn total até 1,2 vezes maiores que a condição do *baseline* chuvoso. No período chuvoso 2021/2022, marcado pelos elevados volumes pluviométricos, observou-se novamente atenuação ou manutenção das concentrações máximas, ao longo de toda bacia, com alguns pontos da região 2A apresentando valores máximos abaixo *baseline* pela primeira vez ao longo de todo monitoramento. Por fim, no período chuvoso atual,

2022/2023, em geral, os resultados máximos permaneceram similares ou menores que os observados no período chuvoso anterior, exceto, no PT-09, localizado na região 1A, que apresentou aumento do valor máximo, passando para a faixa de valor entre 2 e 5 vezes superior ao *baseline*. Uma vez que esta redução é vista até mesmo no ponto de montante, infere-se que as oscilações observadas no período mais recente, aparentam-se estar mais relacionadas às variações sazonais, como pode ser visto nos mapas, principalmente nas regiões mais distais do rompimento.

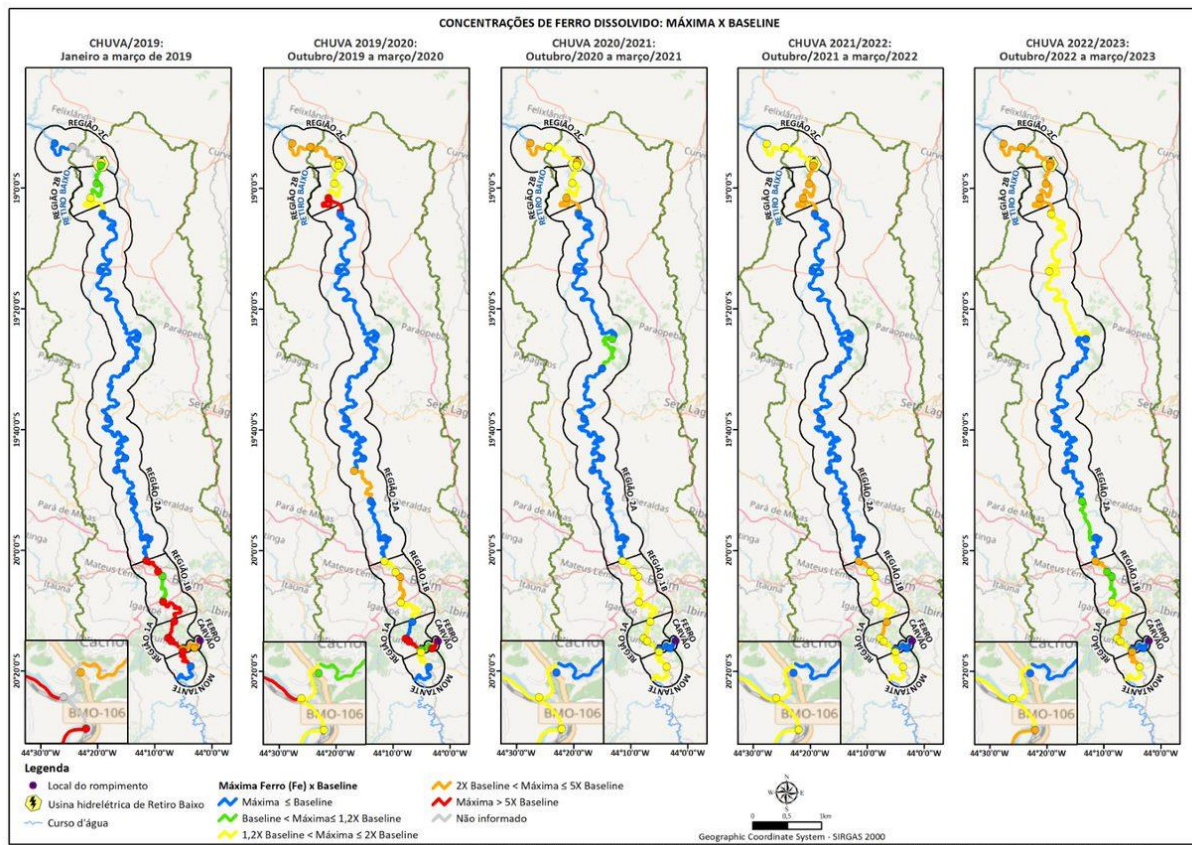
Figura 5.3.4-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do *baseline*



Para o Ferro dissolvido (**Gráfico 5.3.4-2**), em termos das concentrações máximas, observa-se que as maiores condições de afastamento ao *baseline* ao longo dos períodos de chuva sucessivos estão, de maneira geral, localizadas entre a região de Montante até a região 1B, e nas regiões 2B e 2C. No período de chuva/2019, as concentrações máximas deste parâmetro eram 5 vezes superiores ao máximo do *baseline* de chuvas, entre a região Ferro-Carvão e a região 1B. Nos períodos seguintes, 2019/2020 a 2021/2022, os menores valores máximos são observados, de maneira geral, na região Montante, Ferro-Carvão e na região 2A e, nas demais regiões, os valores encontrados são maiores que os respectivos *baselines*. No período chuvoso atual, 2022/2023, percebe-se comportamento similar aos demais, com manutenção das faixas de máximo em relação ao *baseline*, ao longo de todas as regiões, exceto no PT-01, em alguns

pontos da região 2A e na região 2C. Entretanto destacam-se valores máximos acima do *baseline* desde a região Montante.

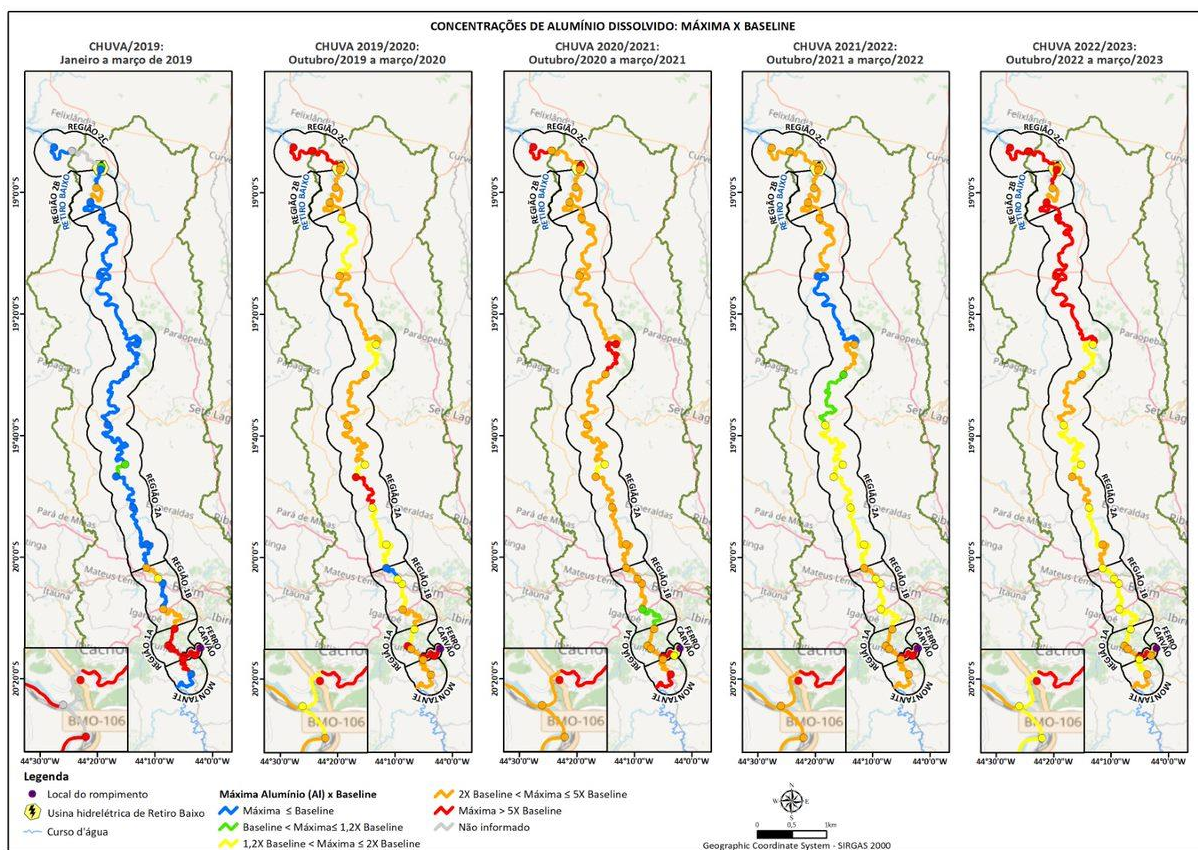
Figura 5.3.4-2 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do *baseline*



Em relação ao Alumínio dissolvido (**Gráfico 5.3.4-3**), com exceção das regiões do ribeirão Ferro-Carvão e 1A e 1B, mais afetadas, observaram-se menores condições de afastamento ao *baseline* no período de chuva/2019 em todas as demais regiões, salvo, pontualmente, em alguns pontos das demais regiões. No período de chuvoso seguinte, chuva 2019/2020, as concentrações máximas deste analito se elevaram em todas as regiões, inclusive na região de montante, com valor máximo entre 2 e 5 vezes maior que o *baseline*. Destaca-se, ainda neste período, que as regiões mais afetadas apresentaram manutenção e/ou redução dos valores máximos. No posterior período chuvoso, 2020/2021, há predomínio de valores máximos acima do *baseline*, de 2 a 5 vezes superiores, ao longo de toda região monitorada. Esse comportamento manteve-se também no período chuvoso 2021/2022, com reduções reportadas pontualmente na porção média e final da região 2A. No período de chuvas atual, 2022/2023, observa-se incremento dos máximos em relação ao período anterior, extrapolando 5 vezes o *baseline*, nos pontos finais da região 2A e nas regiões 2B e 2C. Nas demais regiões mantêm-

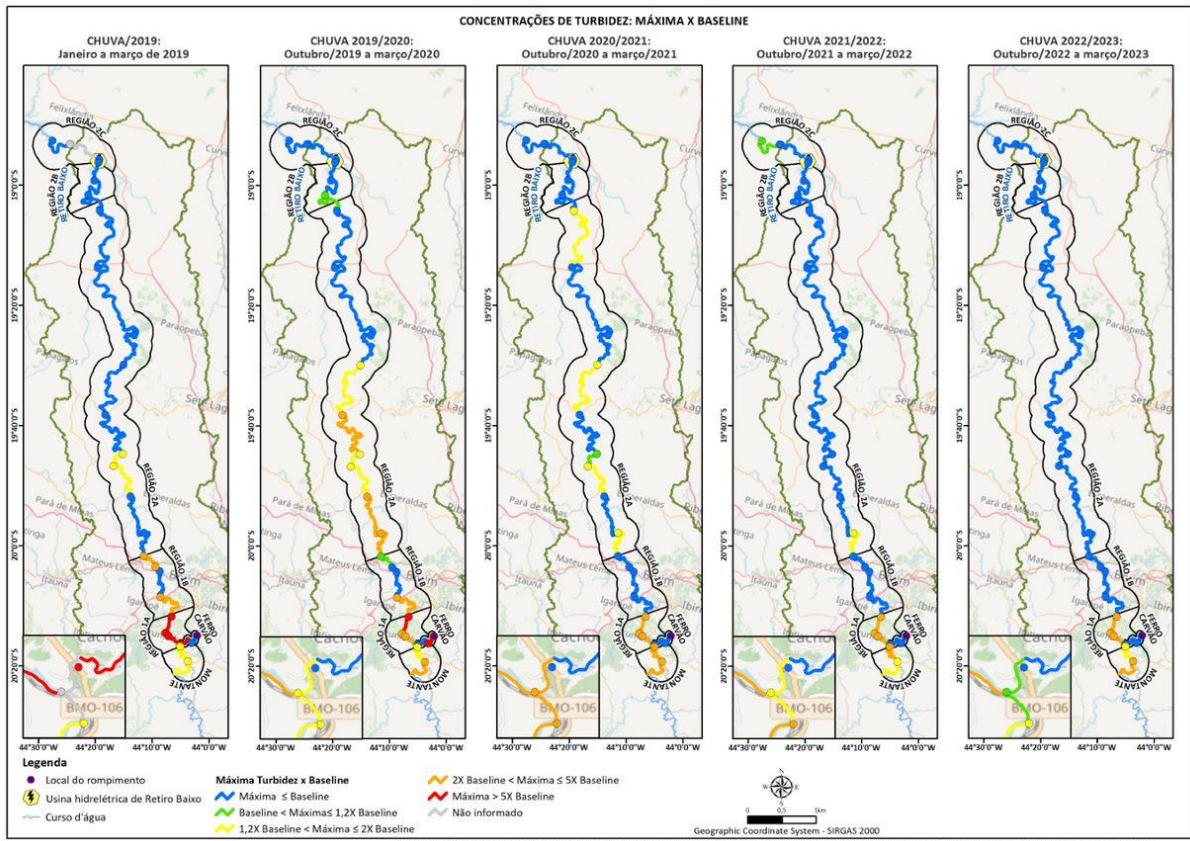
se o predomínio das concentrações máximas maiores que o *baseline*, porém nas faixas de valores superiores ao *baseline* entre 1,2 e 2 vezes, e na faixa de 2 a 5 vezes.

Figura 5.3.4-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do *baseline*



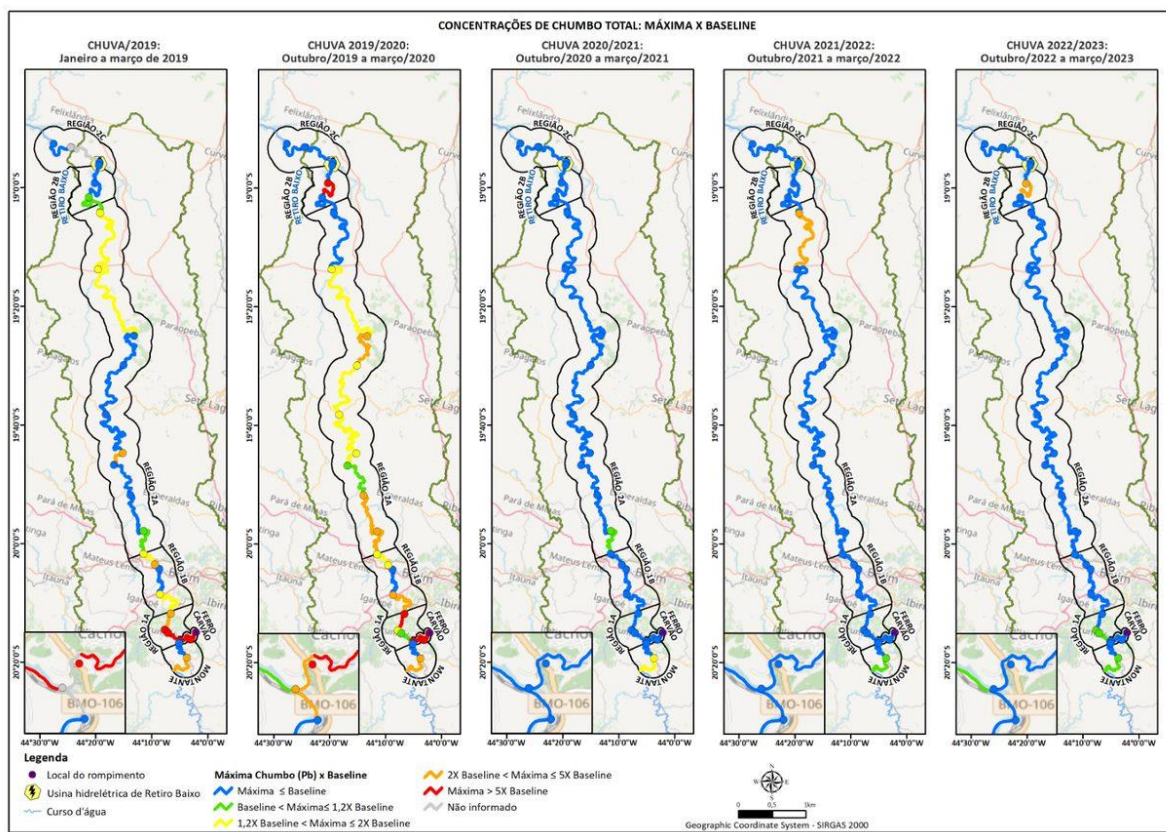
Em relação ao parâmetro Turbidez (**Gráfico 5.3.4-4**), nota-se nítida evolução da redução dos teores máximos entre os períodos de chuva, com menor afastamento aos *baselines* entre os períodos sucessivos, principalmente na região Ferro-Carvão e nas regiões mais distais ao rompimento. Nos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020, os valores máximos de Turbidez ficaram mais distantes da condição de referência nas regiões 1A e 1B, com valores mais que 5 vezes e entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline*, respectivamente. Nos períodos seguintes, na região 1A, os teores de Turbidez mantiveram-se com valores na faixa de 2 a 5 vezes maiores que o máximo do *baseline*, enquanto na 1B foram inferiores à condição de referência pré-rompimento. Enquanto nas regiões 2A e 2C, ainda eram observados, pontualmente, valores acima do *baseline*. No período mais recente, percebe-se que valores acima do *baseline* só foram observados na região Montante e na região 1A, mostrando uma relativa redução das concentrações ao longo do tempo.

Figura 5.3.4-4 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do *baseline*



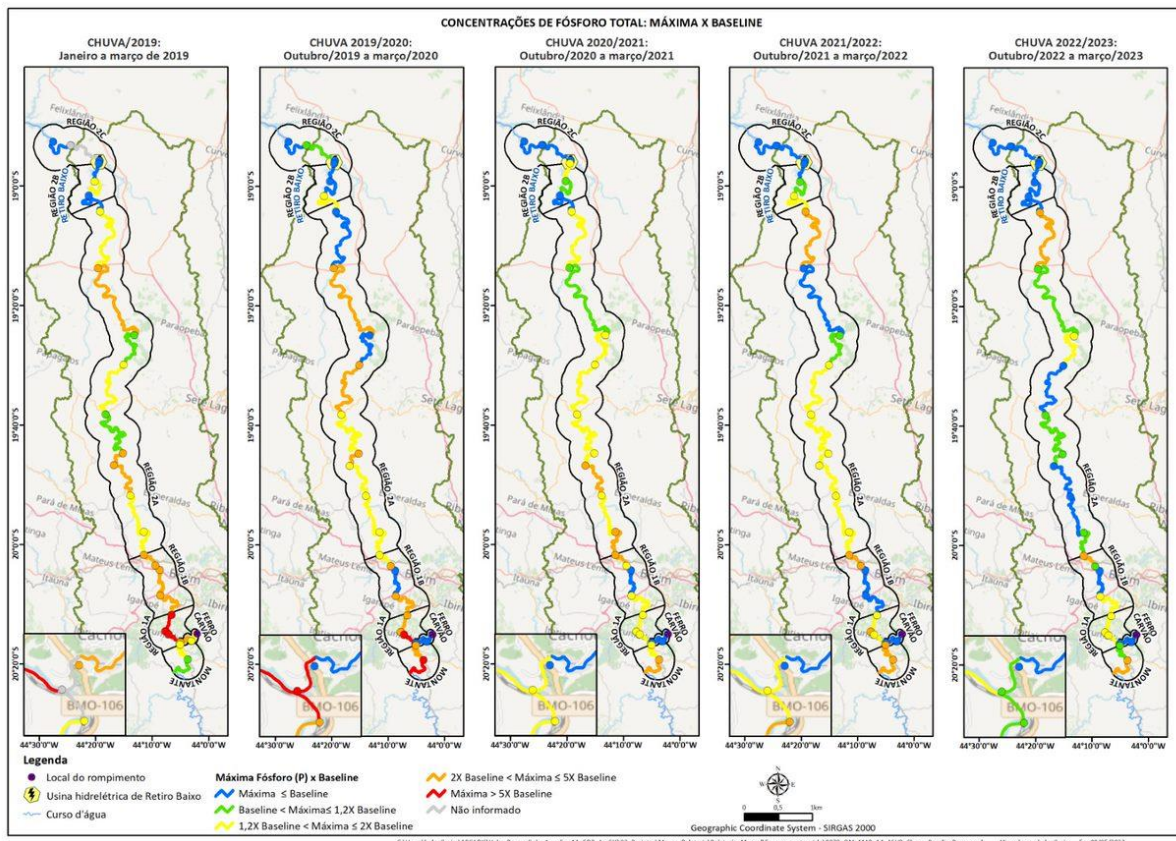
A respeito do Chumbo total (**Gráfico 5.3.4-5**), nota-se nítida redução dos teores máximos a partir do período chuvoso de 2020/2021. No período de chuva/2019, observam-se valores acima do *baseline* ao longo de todas as regiões, exceto região 2C, com os valores mais extremos observados na região Ferro-Carvão e na região 1A. No período de chuva posterior, 2019/2020, observa-se os extremos nessa mesma região e pontualmente, no PT-28, na região 2B. Ainda neste período também foi observado valores acima do *baseline* ao longo das regiões 1B e 2A. A partir do período de chuva 2020/2021, nota-se que majoritariamente ao longo de todas as regiões, exceto a região de Montante, os valores máximos de Pb total majoritariamente são inferiores que os observados na condição pré-rompimento, inclusive na região Ferro-Carvão. Sobre a região de Montante, destaca-se que esta é única região em que os valores máximos são superiores ao *baseline* desde o início do monitoramento. Por fim, a respeito do período chuvoso mais recente é observado valores acima do *baseline* pontualmente ao longo da região monitorada: no ponto de Montante, nos pontos PT-02, PT-09 e no PT-28.

Figura 5.3.4-5 Mapa de comparação dos teores máximos de Chumbo total com os máximos do *baseline*



Por fim, a respeito do analito Fósforo total (**Gráfico 5.3.4-6**), observa-se certa redução dos teores máximos a partir do período chuvoso 2020/2021 nas regiões mais afetadas. Ao longo de todo o monitoramento são observados teores acima do *baseline*, desde a região Montante até a região 2C, destaca-se que os valores mais extremos (superiores a 5 vezes o *baseline*) foram observados somente nas regiões de 1A (chuva/2019 e chuva 2019/2020) e na região Montante (chuva 2019/2020). Na região Ferro-Carvão, desde o período de chuva 2019/2020, os valores máximos são inferiores ao *baseline*. A partir da região 1B, ao longo dos períodos chuvosos de 2020/2021 e 2021/2022, são observadas oscilações dos teores máximos de P total e, em relação ao *baseline*, na maioria das vezes está entre o valor de *baseline* e 5 vezes menor que este. No período de chuva mais recente, 2022/2023, observa-se comportamento similar ao descrito anteriormente para todas as regiões, porém, com redução e, conseqüentemente, valores máximos abaixo do *baseline* nas regiões 2B e 2C.

Figura 5.3.4-6 Mapa de comparação dos teores máximos de Fósforo total com os máximos do *baseline*



5.4. Considerações

Conforme já mencionado neste documento, o rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4-A resultou em alterações na qualidade da água do rio Paraopeba, especialmente nas regiões 1A e 1B, que estão mais próximas da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Essas alterações se estenderam até o reservatório da UHE Retiro Baixo, onde, ao final do período de estiagem de 2019, houve dissipação da pluma de sedimentos em suspensão, aproximando-se das condições de referência (*baseline*). Os principais indicadores de alteração, associados ao rompimento e aos rejeitos, foram os elementos manganês e ferro. Secundariamente, o alumínio também apresentou variações significativas em seus teores, tanto no espaço quanto no tempo. Essas variações ocorreram de maneira específica, dependendo da localização geográfica ao longo do rio Paraopeba e do período de tempo analisado.

De maneira geral, para os períodos chuvosos, as análises estatísticas aplicadas indicam proximidade de comportamento para Ferro e Alumínio totais. Nas regiões analisadas do rio Paraopeba, entre Montante e 2A, verificam-se teores significativamente superiores àqueles observados para a região Ferro-Carvão. Nota-se, no entanto, para ambos os analitos, igualdade estatística entre a região Montante (não impactada) e a região 1A (mais afetada), seguido de redução sucessiva para as demais regiões analisadas a jusante, salientando as

reduções mais contundentes das regiões 2B e 2C. Em termos temporais, há notória predominância de estabilidade ou comportamento de redução das concentrações, com destaque para a significativa redução dos teores de Ferro e Alumínio totais entre as chuvas 2019 e 2019/2020.

Para Manganês total, ao contrário, os trechos avaliados do rio Paraopeba evidenciaram teores inferiores ao ribeirão Ferro-Carvão, indicando a notória influência dos rejeitos nesse tributário. Ainda do ponto de vista espacial, as regiões 1A e 1B apresentaram concentrações superiores à região Montante, corroborando suas condições de trechos mais afetados, mas sendo seguidos de atenuações sequentes no decorrer dos demais trechos fluviais. Ao longo do tempo, predomina-se comportamento de redução ou estabilidade estatística para esse analito, com exceção para o período chuvoso 2021/2022, em que as concentrações indicaram aumento frente ao período anterior (2020/2021) nas regiões Montante, 1A e 1B em função das chuvas intensas na época. Para o período mais recente (2022/2023), apontam-se condições de redução para as regiões mais afetadas (1A e 1B) e indicação de ausência de diferença significativa com seus respectivos *baselines*.

Com relação às frações dissolvidas, especialmente de Ferro e Alumínio, estas não se assemelham ao observado para as respectivas frações totais. Diferentemente, seus teores apresentam prevalência de aumento sucessivo ao longo do tempo em todas as regiões (inclusive Montante), com redução indicada apenas para o período chuvoso 2022/2023 frente a 2021/2022, principalmente para Ferro dissolvido. Em linhas gerais, há um distanciamento progressivo das condições de *baseline*, inclusive para a região Montante não afetada. Essa condição, por outro lado, não é evidenciada para a região Ferro-Carvão, onde predominam teores mais reduzidos dos referidos analitos.

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 um 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. Em termos de comparação temporal, em âmbito geral, nota-se predominância de comportamento de redução sucessiva e estabilidade ao longo do tempo.

Quanto à Turbidez, este é um parâmetro fortemente influenciado pela sazonalidade, com teores majoritariamente elevados na chuva em relação aos períodos de estiagem. A partir da região 1A, mais afetada, segue-se com estabilidade e redução para as regiões mais a jusante. A partir da região 2B, sob influência do reservatório de Retiro Baixo, seus teores são mais reduzidos e significativamente inferiores aos demais trechos fluviais a montante. No decorrer dos períodos sazonais chuvosos, notam-se condições de estabilidade e redução das concentrações desde

o período chuvoso 2019/2020. A partir do período 2021/2022, os teores se estabilizaram para todas as regiões.

Considerando-se o Fósforo total, seu comportamento é variado espacialmente com similaridade entre Montante e Ferro-Carvão e oscilações ao longo das regiões seguintes. 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.

Por fim, no tocante ao Chumbo total, as maiores concentrações são evidenciadas no ribeirão Ferro-Carvão e nas regiões de Montante, 1B e 2A, ao se analisar os períodos de chuva conjuntamente. Vale destacar que em todos os períodos e regiões, incluindo os períodos de estiagem, a maioria das amostras apresentaram resultados pouco variáveis e inferiores ao VMP, tal como os *baselines* respectivos.

Dessa forma, compreende-se que as alterações observadas ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba foram resultado tanto dos rejeitos depositados na calha do rio, especialmente evidentes nas regiões próximas à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (Região 1A e 1B), quanto das variações nas precipitações e na resposta hidrológica da bacia como um todo. A bacia do rio Paraopeba foi sujeita a condições hidrológicas bastante contrastantes durante o monitoramento, incluindo períodos de alta e baixa pluviosidade/vazão, o que teve o potencial de ressuspender materiais (rejeitos + sedimentos) depositados na calha do rio, além do arraste hidráulico de sedimentos naturais da área de drenagem da bacia. Importante pontuar, ademais, que o comportamento sazonal anterior pode ser um potencial fator de influência para o período posterior, prolongando-se seus efeitos ao longo do tempo.

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 chuva, com foco nos resultados obtidos durante a chuva 2022/2023.

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 chuva 2019 (janeiro a março), 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. Maior enfoque é dado a este último (outubro/2022 a março/2023), uma vez que se trata do período de chuva 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 30/09/2022 (ARCADIS, 2022b).

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 chuva

As análises de violação aos padrões legais foram segregadas por período sazonal de chuva, sendo eles, chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023, 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 chuva, outubro/2022 a março/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 chuva.

Tabela 6.3.1-1 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Montante

Tabela 6.3.1-2 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Ferro Carvão

Tabela 6.3.1-3 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 1A

Tabela 6.3.1-4 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 1B

Tabela 6.3.1-5 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2A

Tabela 6.3.1-6 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2B

Tabela 6.3.1-7 Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale nos períodos de chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 – Região 2C

Montante																		
-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	5	45,5 %	35	6	↓ 17,1 %	174	126	↑ 72,4 %	162	132	↑ 81,5 %	178	168	↑ 94,4 %	159	130	↓ 81,8 %
Ferro Dissolvido	38	13	34,2 %	35	24	↑ 68,6 %	174	88	↓ 50,6 %	162	135	↑ 83,3 %	178	177	↑ 99,4 %	158	151	↓ 95,6 %
Manganês Total	38	37	97,4 %	35	33	↓ 94,3 %	174	157	↓ 90,2 %	162	144	↓ 88,9 %	178	176	↑ 98,9 %	159	155	↓ 97,5 %
Turbidez	38	19	50,0 %	35	23	↑ 65,7 %	174	136	↑ 78,2 %	159	105	↓ 66,0 %	178	119	↑ 66,9 %	159	116	↑ 73,0 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	31	10	32,3 %	35	3	↓ 8,6 %	174	97	↑ 55,7 %	117	36	↓ 30,8 %	178	13	↓ 7,3 %	158	34	↑ 21,5 %
Oxigênio dissolvido	38	1	2,6 %	35	2	↑ 5,7 %	174	29	↑ 16,7 %	162	59	↑ 36,4 %	178	4	↓ 2,2 %	148	5	↑ 3,4 %
pH	38	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	10	↑ 5,7 %	161	3	↓ 1,9 %	178	4	↑ 2,2 %	159	1	↓ 0,6 %
Sólidos dissolvidos totais	33	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	158	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	38	21	55,3 %	35	16	↓ 45,7 %	174	83	↑ 47,7 %	162	101	↑ 62,3 %	178	137	↑ 77,0 %	159	110	↓ 69,2 %
Outros																		
Cianeto livre	9	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	158	0	▬ 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	158	0	▬ 0,0 %
DBO	38	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	171	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	1	↑ 0,6 %	158	0	↓ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	38	25	65,8 %	35	21	↓ 60,0 %	174	107	↑ 61,5 %	116	76	↑ 65,5 %	178	128	↑ 71,9 %	157	90	↓ 57,3 %
Fenóis Totais	38	1	2,6 %	35	0	↓ 0,0 %	174	1	↑ 0,6 %	117	0	↓ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	38	9	23,7 %	35	11	↑ 31,4 %	174	34	↓ 19,5 %	162	66	↑ 40,7 %	178	111	↑ 62,4 %	157	102	↑ 65,0 %
Nitrato	38	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Nitrito	32	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	38	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	19	1	5,3 %	35	0	↓ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	158	0	▬ 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	38	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	1	↑ 0,6 %	178	0	↓ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	38	7	18,4 %	35	6	↓ 17,1 %	174	51	↑ 29,3 %	162	9	↓ 5,6 %	178	39	↑ 21,9 %	159	32	↓ 20,1 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	117	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	25	1	4,0 %	35	0	↓ 0,0 %	174	3	↑ 1,7 %	162	1	↓ 0,6 %	178	0	↓ 0,0 %	157	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	19	1	5,3 %	35	0	↓ 0,0 %	174	2	↑ 1,1 %	162	0	↓ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	157	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	0	▬ 0,0 %	162	0	▬ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	158	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	35	0	▬ 0,0 %	174	1	↑ 0,6 %	162	0	↓ 0,0 %	178	0	▬ 0,0 %	159	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 chuva Vale			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	-	0	0,0 %	53	12	↑ 22,6 %	309	28	↓ 9,1 %	75	52	↑ 69,3 %	94	48	↓ 51,1 %	50	21	↓ 42,0 %
Ferro Dissolvido	443	48	10,8 %	53	13	↑ 24,5 %	309	21	↓ 6,8 %	75	11	↑ 14,7 %	94	4	↓ 4,3 %	50	4	↑ 8,0 %
Manganês Total	439	436	99,3 %	53	53	↑ 100,0 %	309	303	↓ 98,1 %	75	74	↑ 98,7 %	94	94	↑ 100,0 %	50	50	100,0 %
Turbidez	448	34	7,6 %	50	50	↑ 100,0 %	309	195	↓ 63,1 %	75	56	↑ 74,7 %	94	51	↓ 54,3 %	50	41	↑ 82,0 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	385	0	0,0 %	53	1	↑ 1,9 %	309	47	↑ 15,2 %	75	8	↓ 10,7 %	45	0	↓ 0,0 %	50	0	0,0 %
Oxigênio dissolvido	443	3	0,7 %	51	38	↑ 74,5 %	309	93	↓ 30,1 %	75	34	↑ 45,3 %	92	27	↓ 29,3 %	50	10	↓ 20,0 %
pH	458	1	0,2 %	52	4	↑ 7,7 %	309	3	↓ 1,0 %	75	3	↑ 4,0 %	94	1	↓ 1,1 %	49	0	↓ 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	442	2	0,5 %	53	0	↓ 0,0 %	295	0	0,0 %	75	0	0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Sólidos suspensos totais	438	25	5,7 %	53	52	↑ 98,1 %	295	142	↓ 48,1 %	75	17	↓ 22,7 %	94	23	↑ 24,5 %	50	13	↑ 26,0 %
Outros																		
Cianeto livre	-	0	0,0 %	53	11	↑ 20,8 %	309	0	↓ 0,0 %	75	0	0,0 %	93	0	0,0 %	50	0	0,0 %
DBO	438	11	2,5 %	53	4	↑ 7,5 %	308	0	↓ 0,0 %	75	2	↑ 2,7 %	94	1	↓ 1,1 %	50	0	↓ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	15	10	66,7 %	53	30	↓ 56,6 %	309	88	↓ 28,5 %	75	21	↓ 28,0 %	45	3	↓ 6,7 %	50	4	↑ 8,0 %
Fenóis Totais	50	1	2,0 %	53	1	↓ 1,9 %	309	0	↓ 0,0 %	75	0	0,0 %	93	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Fósforo Total	192	40	20,8 %	53	52	↑ 98,1 %	309	156	↓ 50,5 %	75	18	↓ 24,0 %	94	26	↑ 27,7 %	49	30	↑ 61,2 %
Nitrato	192	0	0,0 %	53	0	0,0 %	309	0	0,0 %	75	0	0,0 %	45	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Nitrito	-	0	0,0 %	53	0	0,0 %	309	0	0,0 %	75	0	0,0 %	45	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Nitrogênio amoniacal	180	0	0,0 %	53	7	↑ 13,2 %	309	0	↓ 0,0 %	75	0	0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	370	0	0,0 %	53	40	↑ 75,5 %	309	1	↓ 0,3 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Bário Total	-	0	0,0 %	53	48	↑ 90,6 %	309	4	↓ 1,3 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Cádmio Total	-	0	0,0 %	53	50	↑ 94,3 %	309	29	↓ 9,4 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	2	↑ 4,0 %
Chumbo Total	370	4	1,1 %	53	51	↑ 96,2 %	309	152	↓ 49,2 %	75	4	↓ 5,3 %	94	5	↓ 5,3 %	49	2	↓ 4,1 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	53	51	↑ 96,2 %	309	18	↓ 5,8 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	49	0	0,0 %
Cobre Dissolvido	-	0	0,0 %	53	3	↑ 5,7 %	309	1	↓ 0,3 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Cromo Total	370	0	0,0 %	53	26	↑ 49,1 %	309	3	↓ 1,0 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	1	↑ 2,0 %
Mercúrio Total	366	0	0,0 %	53	49	↑ 92,5 %	309	19	↓ 6,1 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	49	0	0,0 %
Níquel Total	-	0	0,0 %	53	51	↑ 96,2 %	309	23	↓ 7,4 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	1	↑ 2,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	53	0	0,0 %	309	1	↑ 0,3 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	0	0,0 %
Zinco Total	-	0	0,0 %	53	48	↑ 90,6 %	309	3	↓ 1,0 %	75	0	↓ 0,0 %	94	0	0,0 %	50	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																		
-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	10	3	30,0 %	358	228	↗ 63,7 %	826	565	↗ 68,4 %	802	666	↗ 83,0 %	681	657	↗ 96,5 %	542	439	↘ 81,0 %
Ferro Dissolvido	37	11	29,7 %	358	231	↗ 64,5 %	826	713	↗ 86,3 %	801	710	↗ 88,6 %	681	672	↗ 98,7 %	542	526	↘ 97,0 %
Manganês Total	37	36	97,3 %	360	355	↗ 98,6 %	826	815	↗ 98,7 %	802	751	↘ 93,6 %	680	678	↗ 99,7 %	543	529	↘ 97,4 %
Turbidez	37	15	40,5 %	327	289	↗ 88,4 %	813	640	↘ 78,7 %	790	527	↘ 66,7 %	681	463	↗ 68,0 %	543	389	↗ 71,6 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	30	11	36,7 %	252	71	↘ 28,2 %	825	329	↗ 39,9 %	462	101	↘ 21,9 %	546	25	↘ 4,6 %	543	99	↗ 18,2 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	305	94	↗ 30,8 %	821	121	↘ 14,7 %	802	36	↘ 4,5 %	680	4	↘ 0,6 %	517	10	↗ 1,9 %
pH	37	0	0,0 %	309	9	↗ 2,9 %	822	13	↘ 1,6 %	798	10	↘ 1,3 %	681	12	↗ 1,8 %	541	18	↗ 3,3 %
Sólidos dissolvidos totais	32	0	0,0 %	356	0	▬ 0,0 %	817	0	▬ 0,0 %	801	0	▬ 0,0 %	681	0	▬ 0,0 %	542	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	15	40,5 %	356	312	↗ 87,6 %	817	549	↘ 67,2 %	802	499	↘ 62,2 %	681	495	↗ 72,7 %	543	350	↘ 64,5 %
Outros																		
Benzo(a)antraceno	-	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	466	3	↗ 0,6 %	239	3	↗ 1,3 %	109	4	↗ 3,7 %	102	0	↘ 0,0 %
Benzo(a)pireno	-	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	483	2	↗ 0,4 %	239	3	↗ 1,3 %	109	5	↗ 4,6 %	102	1	↘ 1,0 %
Benzo(b)fluoranteno	-	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	483	2	↗ 0,4 %	239	3	↗ 1,3 %	109	4	↗ 3,7 %	102	1	↘ 1,0 %
Benzo(k)fluoranteno	-	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	443	0	▬ 0,0 %	218	1	↗ 0,5 %	109	0	↘ 0,0 %	102	1	↗ 1,0 %
Cianeto livre	9	0	0,0 %	251	1	↗ 0,4 %	825	1	↘ 0,1 %	462	3	↗ 0,6 %	546	0	↘ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	360	0	▬ 0,0 %	826	0	▬ 0,0 %	802	0	▬ 0,0 %	680	0	▬ 0,0 %	542	0	▬ 0,0 %
Criseno	-	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	483	3	↗ 0,6 %	238	3	↗ 1,3 %	109	4	↗ 3,7 %	102	2	↘ 2,0 %
DBO	37	0	0,0 %	252	27	↗ 10,7 %	822	5	↘ 0,6 %	462	3	↗ 0,6 %	545	2	↘ 0,4 %	543	1	↘ 0,2 %
Escherichia/Coliformes	37	35	94,6 %	252	186	↘ 73,8 %	824	603	↘ 73,2 %	462	381	↗ 82,5 %	546	479	↗ 87,7 %	540	439	↘ 81,3 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	252	1	↗ 0,4 %	825	0	↘ 0,0 %	462	0	▬ 0,0 %	546	0	▬ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	37	8	21,6 %	303	225	↗ 74,3 %	823	468	↘ 56,9 %	798	425	↘ 53,3 %	679	411	↗ 60,5 %	543	332	↗ 61,1 %
Nitrato	37	0	0,0 %	252	1	↗ 0,4 %	825	0	↘ 0,0 %	462	0	▬ 0,0 %	546	0	▬ 0,0 %	542	0	▬ 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	252	0	▬ 0,0 %	825	0	▬ 0,0 %	462	0	▬ 0,0 %	546	0	▬ 0,0 %	542	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	251	3	↗ 1,2 %	825	0	↘ 0,0 %	462	0	▬ 0,0 %	547	0	▬ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	18	2	11,1 %	352	1	↘ 0,3 %	826	1	↘ 0,1 %	802	0	↘ 0,0 %	681	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Bário Total	18	0	0,0 %	360	10	↗ 2,8 %	823	0	↘ 0,0 %	462	0	▬ 0,0 %	547	0	▬ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	37	1	2,7 %	360	40	↗ 11,1 %	826	1	↘ 0,1 %	802	1	↗ 0,1 %	680	0	↘ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	30	6	20,0 %	360	201	↗ 55,8 %	826	107	↘ 13,0 %	802	4	↘ 0,5 %	677	144	↗ 21,3 %	543	117	↗ 21,5 %
Cobre Dissolvido	12	0	0,0 %	358	19	↗ 5,3 %	826	7	↘ 0,8 %	796	0	↘ 0,0 %	681	1	↗ 0,1 %	539	3	↗ 0,6 %
Cromo Total	24	1	4,2 %	360	11	↘ 3,1 %	826	6	↘ 0,7 %	802	1	↘ 0,1 %	681	5	↗ 0,7 %	542	0	↘ 0,0 %
Mercúrio Total	18	0	0,0 %	352	14	↗ 4,0 %	826	0	↘ 0,0 %	802	0	▬ 0,0 %	680	0	▬ 0,0 %	543	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	18	0	0,0 %	360	54	↗ 15,0 %	826	4	↘ 0,5 %	802	0	↘ 0,0 %	681	2	↗ 0,3 %	543	3	↗ 0,6 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	360	0	▬ 0,0 %	826	0	▬ 0,0 %	802	0	▬ 0,0 %	681	0	▬ 0,0 %	542	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	360	11	↗ 3,1 %	826	1	↘ 0,1 %	802	1	↗ 0,1 %	681	0	↘ 0,0 %	542	3	↗ 0,6 %

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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	13	59,1 %	233	131	↓ 56,2 %	682	496	↑ 72,7 %	394	326	↑ 82,7 %	206	201	↑ 97,6 %	229	189	↓ 82,5 %
Ferro Dissolvido	76	28	36,8 %	233	136	↑ 58,4 %	682	348	↓ 51,0 %	394	354	↑ 89,8 %	206	202	↑ 98,1 %	231	215	↓ 93,1 %
Manganês Total	76	73	96,1 %	233	233	↑ 100,0 %	682	673	↓ 98,7 %	394	371	↓ 94,2 %	206	205	↑ 99,5 %	231	224	↓ 97,0 %
Turbidez	76	34	44,7 %	233	220	↑ 94,4 %	681	520	↓ 76,4 %	389	237	↓ 60,9 %	206	148	↑ 71,8 %	231	161	↓ 69,7 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	62	28	45,2 %	233	86	↓ 36,9 %	682	435	↑ 63,8 %	394	169	↓ 42,9 %	206	11	↓ 5,3 %	231	43	↑ 18,6 %
Oxigênio dissolvido	76	3	3,9 %	233	79	↑ 33,9 %	682	246	↑ 36,1 %	394	81	↓ 20,6 %	206	14	↓ 6,8 %	219	13	↓ 5,9 %
pH	76	0	0,0 %	233	7	↑ 3,0 %	681	37	↑ 5,4 %	390	41	↑ 10,5 %	206	9	↓ 4,4 %	230	8	↓ 3,5 %
Sólidos dissolvidos totais	66	0	0,0 %	233	0	— 0,0 %	655	0	— 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	230	1	↑ 0,4 %
Sólidos suspensos totais	76	30	39,5 %	233	134	↑ 57,5 %	655	329	↓ 50,2 %	394	205	↑ 52,0 %	206	146	↑ 70,9 %	231	138	↓ 59,7 %
Outros																		
Cianeto livre	28	1	3,6 %	233	0	↓ 0,0 %	682	0	— 0,0 %	393	1	↑ 0,3 %	206	0	↓ 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Cobre Total	14	0	0,0 %	233	0	— 0,0 %	682	0	— 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	229	0	— 0,0 %
DBO	76	1	1,3 %	233	24	↑ 10,3 %	675	0	↓ 0,0 %	394	4	↑ 1,0 %	206	2	↓ 1,0 %	230	7	↑ 3,0 %
Escherichia/Coliformes	76	69	90,8 %	233	187	↓ 80,3 %	682	622	↑ 91,2 %	394	373	↑ 94,7 %	205	197	↑ 96,1 %	228	200	↓ 87,7 %
Fenóis Totais	76	1	1,3 %	233	0	↓ 0,0 %	681	2	↑ 0,3 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Fósforo Total	76	38	50,0 %	233	137	↑ 58,8 %	682	247	↓ 36,2 %	394	149	↑ 37,8 %	206	158	↑ 76,7 %	231	187	↑ 81,0 %
Nitrato	76	0	0,0 %	233	1	↑ 0,4 %	682	0	↓ 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Nitrito	64	0	0,0 %	233	0	— 0,0 %	682	1	↑ 0,1 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	230	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	76	0	0,0 %	233	0	— 0,0 %	682	14	↑ 2,1 %	393	1	↓ 0,3 %	206	0	↓ 0,0 %	231	1	↑ 0,4 %
Traços																		
Arsênio Total	38	3	7,9 %	233	3	↓ 1,3 %	682	0	↓ 0,0 %	394	3	↑ 0,8 %	206	0	↓ 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Bário Total	38	0	0,0 %	233	1	↑ 0,4 %	682	1	↓ 0,1 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Cádmio Total	76	0	0,0 %	233	4	↑ 1,7 %	682	2	↓ 0,3 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Chumbo Total	76	18	23,7 %	233	75	↑ 32,2 %	682	207	↓ 30,4 %	394	25	↓ 6,3 %	206	39	↑ 18,9 %	230	49	↑ 21,3 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	233	6	↑ 2,6 %	681	0	↓ 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	230	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	26	0	0,0 %	233	9	↑ 3,9 %	682	0	↓ 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	226	0	— 0,0 %
Cromo Total	57	1	1,8 %	233	1	↓ 0,4 %	682	6	↑ 0,9 %	394	0	↓ 0,0 %	206	1	↑ 0,5 %	230	0	↓ 0,0 %
Mercúrio Total	38	0	0,0 %	233	1	↑ 0,4 %	682	0	↓ 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	0	— 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	233	16	↑ 6,9 %	682	7	↓ 1,0 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	230	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	233	0	— 0,0 %	682	0	— 0,0 %	394	0	— 0,0 %	206	0	— 0,0 %	230	0	— 0,0 %
Zinco Total	57	2	3,5 %	233	5	↓ 2,1 %	682	1	↓ 0,1 %	394	0	↓ 0,0 %	206	0	— 0,0 %	231	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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	33	15	45,5 %	408	96	↓ 23,5 %	1549	969	↗ 62,6 %	795	652	↗ 82,0 %	312	280	↗ 89,7 %	322	232	↓ 72,0 %
Ferro Dissolvido	114	21	18,4 %	408	245	↗ 60,0 %	1549	615	↓ 39,7 %	795	690	↗ 86,8 %	311	304	↗ 97,7 %	324	267	↓ 82,4 %
Manganês Total	114	87	76,3 %	408	394	↗ 96,6 %	1548	1255	↓ 81,1 %	795	708	↗ 89,1 %	312	304	↗ 97,4 %	324	261	↓ 80,6 %
Turbidez	114	57	50,0 %	408	387	↗ 94,9 %	1545	1117	↓ 72,3 %	779	540	↓ 69,3 %	310	225	↗ 72,6 %	322	241	↗ 74,8 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	93	34	36,6 %	408	92	↓ 22,5 %	1549	944	↗ 60,9 %	795	322	↓ 40,5 %	312	14	↓ 4,5 %	323	51	↗ 15,8 %
Oxigênio dissolvido	114	2	1,8 %	403	59	↗ 14,6 %	1548	201	↓ 13,0 %	795	81	↓ 10,2 %	310	21	↓ 6,8 %	315	24	↗ 7,6 %
pH	114	0	0,0 %	407	0	▬ 0,0 %	1549	5	↗ 0,3 %	793	32	↗ 4,0 %	310	6	↓ 1,9 %	320	7	↗ 2,2 %
Sólidos dissolvidos totais	99	0	0,0 %	408	2	↗ 0,5 %	1545	0	↓ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	114	55	48,2 %	408	202	↗ 49,5 %	1545	697	↓ 45,1 %	795	503	↗ 63,3 %	312	225	↗ 72,1 %	324	185	↓ 57,1 %
Outros																		
Cianeto livre	37	1	2,7 %	408	0	↓ 0,0 %	1549	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	323	0	▬ 0,0 %
DBO	114	1	0,9 %	408	0	↓ 0,0 %	1524	1	↗ 0,1 %	793	5	↗ 0,6 %	312	4	↗ 1,3 %	322	1	↓ 0,3 %
Escherichia/Coliformes	114	60	52,6 %	408	241	↗ 59,1 %	1548	802	↓ 51,8 %	791	441	↗ 55,8 %	311	140	↓ 45,0 %	323	96	↓ 29,7 %
Fenóis Totais	95	3	3,2 %	408	0	↓ 0,0 %	1548	1	↗ 0,1 %	795	0	↓ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	114	52	45,6 %	408	249	↗ 61,0 %	1549	579	↓ 37,4 %	794	439	↗ 55,3 %	312	222	↗ 71,2 %	324	224	↓ 69,1 %
Nitrato	114	0	0,0 %	408	0	▬ 0,0 %	1548	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	323	0	▬ 0,0 %
Nitrito	96	0	0,0 %	404	0	▬ 0,0 %	1548	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	319	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	114	0	0,0 %	408	0	▬ 0,0 %	1549	3	↗ 0,2 %	794	0	↓ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	323	0	▬ 0,0 %
Traços																		
Arsênio Total	57	1	1,8 %	408	0	↓ 0,0 %	1549	0	▬ 0,0 %	795	2	↗ 0,3 %	312	0	↓ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Bário Total	57	0	0,0 %	408	0	▬ 0,0 %	1549	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	114	0	0,0 %	408	2	↗ 0,5 %	1549	1	↓ 0,1 %	795	0	↓ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	114	22	19,3 %	408	45	↓ 11,0 %	1549	396	↗ 25,6 %	795	30	↓ 3,8 %	312	54	↗ 17,3 %	324	41	↓ 12,7 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	408	0	▬ 0,0 %	1549	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	67	1	1,5 %	408	0	↓ 0,0 %	1549	3	↗ 0,2 %	795	0	↓ 0,0 %	312	2	↗ 0,6 %	319	0	↓ 0,0 %
Cromo Total	75	0	0,0 %	408	1	↗ 0,2 %	1549	2	↓ 0,1 %	795	0	↓ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	57	0	0,0 %	408	1	↗ 0,2 %	1549	0	↓ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	408	2	↓ 0,5 %	1549	2	↓ 0,1 %	795	0	↓ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	323	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	408	0	▬ 0,0 %	1549	0	▬ 0,0 %	795	0	▬ 0,0 %	312	0	▬ 0,0 %	324	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	76	1	1,3 %	408	2	↓ 0,5 %	1549	5	↓ 0,3 %	795	2	↓ 0,3 %	312	0	↓ 0,0 %	324	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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	4	36,4 %	82	16	↓ 19,5 %	536	274	↑ 51,1 %	467	336	↑ 71,9 %	511	436	↑ 85,3 %	541	339	↓ 62,7 %
Ferro Dissolvido	22	3	13,6 %	82	45	↑ 54,9 %	536	232	↓ 43,3 %	467	243	↑ 52,0 %	511	422	↑ 82,6 %	541	306	↓ 56,6 %
Manganês Total	22	6	27,3 %	82	31	↑ 37,8 %	536	118	↓ 22,0 %	466	34	↓ 7,3 %	511	48	↑ 9,4 %	541	38	↓ 7,0 %
Turbidez	22	4	18,2 %	82	16	↑ 19,5 %	536	130	↑ 24,3 %	463	96	↓ 20,7 %	508	82	↓ 16,1 %	541	75	↓ 13,9 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	22	5	22,7 %	82	9	↓ 11,0 %	536	273	↑ 50,9 %	467	78	↓ 16,7 %	511	8	↓ 1,6 %	541	100	↑ 18,5 %
Oxigênio dissolvido	22	0	0,0 %	82	13	↑ 15,9 %	534	66	↓ 12,4 %	466	26	↓ 5,6 %	510	9	↓ 1,8 %	532	14	↑ 2,6 %
pH	22	1	4,5 %	82	0	↓ 0,0 %	534	9	↑ 1,7 %	467	1	↓ 0,2 %	511	7	↑ 1,4 %	537	2	↓ 0,4 %
Sólidos dissolvidos totais	19	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	534	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	22	4	18,2 %	82	2	↓ 2,4 %	534	24	↑ 4,5 %	467	27	↑ 5,8 %	511	37	↑ 7,2 %	541	16	↓ 3,0 %
Outros																		
Cianeto livre	16	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
DBO	22	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	531	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	3	↑ 0,6 %	540	0	↓ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	22	8	36,4 %	82	1	↓ 1,2 %	536	26	↑ 4,9 %	467	12	↓ 2,6 %	507	15	↑ 3,0 %	538	2	↓ 0,4 %
Fenóis Totais	22	1	4,5 %	82	0	↓ 0,0 %	534	1	↑ 0,2 %	467	0	↓ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	22	3	13,6 %	82	25	↑ 30,5 %	536	157	↓ 29,3 %	465	113	↓ 24,3 %	511	154	↑ 30,1 %	538	258	↑ 48,0 %
Nitrato	22	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	540	0	▬ 0,0 %
Nitrito	21	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	22	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	3	↑ 0,6 %
Traços																		
Arsênio Total	11	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	22	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	540	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	22	3	13,6 %	82	1	↓ 1,2 %	536	1	↓ 0,2 %	467	0	↓ 0,0 %	511	1	↑ 0,2 %	536	1	↓ 0,2 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	22	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	466	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	540	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	16	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	0	▬ 0,0 %	467	0	▬ 0,0 %	511	0	▬ 0,0 %	541	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	82	0	▬ 0,0 %	536	6	↑ 1,1 %	467	0	↓ 0,0 %	511	1	↑ 0,2 %	541	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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022			Chuva - Outubro/2022 a Março/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	4	36,4 %	101	10	↓ 9,9 %	695	273	↑ 39,3 %	445	309	↑ 69,4 %	333	278	↑ 83,5 %	368	207	↓ 56,3 %
Ferro Dissolvido	22	3	13,6 %	101	11	↓ 10,9 %	695	313	↑ 45,0 %	445	231	↑ 51,9 %	333	252	↑ 75,7 %	369	196	↓ 53,1 %
Manganês Total	22	6	27,3 %	101	3	↓ 3,0 %	694	155	↑ 22,3 %	445	4	↓ 0,9 %	363	27	↑ 7,4 %	368	12	↓ 3,3 %
Turbidez	22	4	18,2 %	101	1	↓ 1,0 %	694	193	↑ 27,8 %	442	64	↓ 14,5 %	332	47	↓ 14,2 %	369	46	↓ 12,5 %
Físico-químico																		
Cor verdadeira	22	5	22,7 %	101	0	↓ 0,0 %	695	292	↑ 42,0 %	445	44	↓ 9,9 %	333	7	↓ 2,1 %	369	50	↑ 13,6 %
Oxigênio dissolvido	22	0	0,0 %	101	15	↑ 14,9 %	693	132	↑ 19,0 %	445	53	↓ 11,9 %	334	11	↓ 3,3 %	367	11	↓ 3,0 %
pH	22	1	4,5 %	101	0	↓ 0,0 %	693	7	↑ 1,0 %	445	3	↓ 0,7 %	334	23	↑ 6,9 %	369	4	↓ 1,1 %
Sólidos dissolvidos totais	19	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	692	0	▬ 0,0 %	444	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	368	0	▬ 0,0 %
Sólidos suspensos totais	22	4	18,2 %	101	0	↓ 0,0 %	692	19	↑ 2,7 %	444	2	↓ 0,5 %	333	9	↑ 2,7 %	369	0	↓ 0,0 %
Outros																		
Cianeto livre	16	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	616	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
DBO	22	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	691	3	↑ 0,4 %	444	1	↓ 0,2 %	333	0	↓ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	22	8	36,4 %	101	3	↓ 3,0 %	695	25	↑ 3,6 %	443	3	↓ 0,7 %	331	2	↓ 0,6 %	368	1	↓ 0,3 %
Fenóis Totais	22	1	4,5 %	101	0	↓ 0,0 %	616	1	↑ 0,2 %	445	0	↓ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Fósforo Total	22	3	13,6 %	101	5	↓ 5,0 %	690	107	↑ 15,5 %	445	66	↓ 14,8 %	333	19	↓ 5,7 %	368	25	↑ 6,8 %
Nitrato	22	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	694	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Nitrito	21	0	0,0 %	100	0	▬ 0,0 %	693	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	366	0	▬ 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	22	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	444	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	367	3	↑ 0,8 %
Traços																		
Arsênio Total	11	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	361	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	652	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Cádmio Total	22	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Chumbo Total	22	3	13,6 %	101	0	↓ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	4	↑ 1,1 %	365	0	↓ 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	652	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Cobre Dissolvido	22	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	333	0	▬ 0,0 %	362	0	▬ 0,0 %
Cromo Total	16	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	688	0	▬ 0,0 %	445	0	▬ 0,0 %	363	0	▬ 0,0 %	369	0	▬ 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	101	0	▬ 0,0 %	695	1	↑ 0,1 %	445	1	↑ 0,2 %	362	1	↑ 0,3 %	368	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 chuva 2022/2023.

Parâmetro	Deliberação Normativa COPAM 08/22	VMP	Rio Paraopeba																												UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.		UHE Três Marias					Rio SF												
			Mont.		Ferro Carvão				Região 1A				Região 1B				Região 2A								Região 2B			Região 2C		Reg.2D					Região 3																		
			BP036	PT-52	FEL-COR-01	FEL-COR-03-AS	FEL-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	TM10/M07	TM30/M03	PT-23	TM35	TM40/M01	PT-29	SF054	PT-25	PT-27	PT-32		
MAJORITÁRIOS																																																					
Manganês Total	0,1 mg/l		97	97	99	100	100	100	100	96	97	96	98	97	98	97	100	91	94	95	98	100	100	93	79	93	85	63	76	82	74	82	77	15	3	3	1	5	27	4	4	50	-	-	-	-	-	35	33	33	17		
Ferro Dissolvido	0,3 mg/l		34	96	11	16	9	-	15	96	93	99	97	30	97	34	91	100	100	39	92	90	83	80	26	50	73	88	13	77	16	86	86	69	56	45	50	56	14	50	54	100	-	-	-	-	-	8	-	-	33		
Alumínio Dissolvido	0,1 mg/l		45	82	NA	NA	NA	4	77	96	76	81	80	30	80	55	83	87	100	64	80	90	75	80	45	64	69	94	36	77	55	69	69	70	61	57	58	56	36	48	62	NA	NA	-	NA	NA	-	27	17	-	20		
Turbidez	100 NTU		50	73	10	-	6	96	69	68	72	71	74	41	70	45	74	61	61	45	71	60	58	73	47	64	64	47	50	73	53	82	81	31	6	5	4	12	18	42	35	14	-	-	-	-	-	9	-	-	17		
TRAÇOS																																																					
Cádmio Total	0,001 mg/l		-	-	NA	NA	NA	8	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Chumbo Total	0,01 mg/l		18	20	1	-	1	9	-	16	21	23	22	20	20	16	26	17	6	32	23	-	-	-	-	18	14	15	13	21	14	18	18	14	-	1	-	-	-	14	-	-	NA	NA	-	NA	NA	-	-	-	-	17	
Cobre Dissolvido	0,009 mg/l		8	1	NA	NA	NA	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Cromo Total	0,05 mg/l		4	-	-	-	4	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Níquel Total	0,025 mg/l		5	-	NA	NA	NA	4	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zinco Total	0,18 mg/l		-	-	NA	NA	NA	-	-	4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
FÍSICO-QUÍMICOS																																																					
Cor Verdadeira	75 mg/l		32	22	-	-	-	-	8	10	20	19	37	19	42	22	22	6	48	19	-	17	13	32	-	12	13	35	9	42	14	20	18	17	20	10	17	23	12	12	50	-	-	-	-	-	9	-	-	17			
DBO	5 mg/l		-	-	3	-	3	-	-	-	-	1	-	-	-	-	6	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Oxigênio dissolvido	5 mg/l		3	3	1	-	0,5	29	12	5	4	-	-	6	3	10	5	7	5	6	14	17	36	3	36	38	7	-	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
pH	6 a 9		-	1	-	-	0,5	-	-	-	3	2	2	-	6	-	17	17	-	1	20	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sólidos dissolvidos totais	500 mg/l		-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sólidos suspensos totais	100 mg/l		55	69	7	3	5	50	4	60	59	65	67	41	64	37	70	52	50	42	60	50	42	47	53	64	62	38	47	64	45	61	59	9	-	-	-	-	18	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
OUTROS																																																					
Clorofila a	30 ug/l		-	-	NA	NA	NA	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Escherichia coli	1000 NMP/100ml		66	57	67	67	NA	4	12	40	45	79	88	95	90	92	96	78	83	89	88	60	50	33	66	43	46	19	53	32	39	25	24	1	-	-	-	-	36	4	-	50	-	-	-	-	-	39	-	-	17		
Fósforo Total	0,1(Lót); 0,05(Interm.); 0,03(Lênt.)		24	65	19	50	17	78	46	68	45	61	64	22	59	37	65	61	56	63	89	90	100	87	55	93	77	63	37	73	45	75	61	64	45	36	1	4	14	4	62	29	-	33	-	7	-	13	-	-	17		
Nitrogênio Amoniacal	3,7(pH<7,5) 2,0(7,5<pH<8,0) 1,0(8,0<pH<8,5) 0,5(pH>8,5)		-	-	-	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Benzo(a)pireno	0,5 ug/l		NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	3	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	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Benzo(b)fluoranteno	0,5 ug/l		NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	3	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	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Criseno	0,5 ug/l		NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	3	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	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
N coletas realizadas			38	159	212	38	208	24	26	25	29	167	174	37	148	38	23	23	18	38	167	10	12	15	38	14	26	16	38	22	38	28	181	179	181	181	139	178	22	26	26	8	9	6	4	17	6	23	6	6	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 todos os metais majoritários, e aumento para a Turbidez, no período de chuva 2022/2023 (Manganês total: 97,5%; Ferro dissolvido: 95,6%; Alumínio dissolvido: 81,8%; Turbidez: 73%) em relação ao período de chuva anterior (2021/2022) e, para todos eles, percentis mais elevados do que na condição do *baseline* sazonal (Manganês total: 97,4%; Ferro dissolvido: 34,2%; Alumínio dissolvido: 45,5%; Turbidez: 50%).

Já para os parâmetros físico-químicos, ocorreu elevação dos percentuais no período de chuva atual para Cor verdadeira (21,5%) e Oxigênio dissolvido (3,4%), destacando-se a não ocorrência de violações para ambos os parâmetros na condição do *baseline*. Para pH e Sólidos suspensos totais, a condição foi de redução das violações nos períodos de chuva de 2022/2023 em relação ao pretérito (2021/2022) e, para ambos os parâmetros, notou-se proximidade 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 2022/2023 em relação ao período de chuva 2021/2022 (57,3%), sendo este quantitativo menor que aqueles verificados nos demais períodos de chuva e *baseline*, e para o Fósforo total, têm-se um ligeiro aumento em relação ao período de chuva 2022/2023 (65%) e em relação a condição de *baseline* (23,7%). Para a DBO, as violações foram nulas ao longo de todos os períodos analisados, inclusive na condição de *baseline* sazonal, com exceção no período de chuva de 2021/2022, que apresentou aumento em relação ao período de chuva anterior.

Dentre os parâmetros traço analisados, nota-se a ocorrência de violação para o Chumbo total, com percentual equivalente a 20,1%, sendo este resultado inferior ao registrado no período anterior (2021/2022), e próximo ao percentual de *baseline* sazonal de chuva (18,4%). Vale ressaltar que alguns parâmetros categorizados como físico-químicos, traços e outros não apresentaram violações em nenhum período de chuva 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 da barragem B1, e galgamento das barragens 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. Nessa 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 chuva 2022/2023, 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 redução do percentual de violação (42%) em relação ao período de chuva anterior, porém o percentual se manteve acima do *baseline* de chuva, sendo nulo para esta região. Para o Ferro dissolvido e Turbidez, o comportamento foi de aumento das violações em relação ao período de chuva 2021/2022, equivalendo a 8% e 82%, respectivamente, ficando o Ferro dissolvido abaixo do valor de *baseline*. 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, 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 nos dois últimos períodos de chuva (100%), sendo essa magnitude já verificada em outros períodos de chuva pretéritos, inclusive no 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 da barragem na região.

Em suma, nota-se maior variabilidade no comportamento das violações no período de chuva 2021/2022 e 2022/2023 (aumento, redução e manutenção), ao passo que nos períodos pretéritos este comportamento torna-se pouco variável (predomínio de aumento ou de redução) dentro de um mesmo período de chuva.

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 disposição de material dragado. Dito isso, vale ressaltar que no período de chuva 2022/2023, as atividades ocorreram até dezembro/2022.

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 chuva 2022/2023, na região do ribeirão Ferro-Carvão, foi observada redução das violações para Oxigênio dissolvido (20%) e pH (nulo), quando comparado com o período de chuva 2021/2022. Especificamente para o pH tal percentual foi inferior ao verificado no *baseline* sazonal. Para os Sólidos suspensos totais, o comportamento foi de aumento das violações em relação ao período de chuva anterior (26%) sendo este percentual, superior ao *baseline* (5,7%). Para os demais parâmetros, houve aumento para Fósforo total (61,2%) e *E. coli* (8%), ficando este último, abaixo da condição de *baseline* sazonal. A DBO apresentou, em geral, percentuais reduzidos nos períodos de chuva considerados e, especificamente no atual, não ocorreram violações. De acordo com a **Tabela 6.3.1-2**, o analito Fósforo total, apresentou reduções consecutivas até o período de chuva 2020/2021, sendo verificado aumento das violações em 2021/2022, em função das chuvas mais expressivas inerentes a este período sazonal. No último período chuvoso (2022/2023), nota-se um menor 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 Cádmio (4%), Cromo e Níquel (2%) em suas frações totais, se comparado os dois últimos períodos de chuva, enquanto para o Chumbo total, as violações apresentaram-se inferiores aos percentuais registrados em todos os períodos de chuva pretéritos (4,1%), todavia, 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 dos períodos chuvosos, das operações de dragagem ativas nesse trecho fluvial (que cessaram a partir do dia 12/12/2022 no último período de chuva completo) e que tem influência pontual e rapidamente reversível, e das obras de reparação e manutenção do trecho a montante, Ferro-Carvão.

No período de chuva 2022/2023, verificou-se que a região 1A apresentou, para os metais majoritários, percentuais de violação mais reduzidos que no período de chuva anterior e 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 aumento das violações, inclusive em relação ao *baseline*. No âmbito espacial, têm-se todos os pontos apresentando violações em mais de 50% das amostras.

Quanto aos parâmetros físico-químicos, têm-se aumento das violações para Cor verdadeira (18,2%), pH (3,3%) e Oxigênio dissolvido (1,9%), sendo para Cor verdadeira, inferior ao *baseline* sazonal. Para os Sólidos suspensos totais, no período de chuva 2022/2023, houve redução das violações (64,5%) em relação ao período de chuva 2021/2022, e aumento em relação ao *baseline* sazonal. Este analito apresentou violações mais elevadas em todos os pontos contemplados nessa região, inclusive no ponto de *baseline* BP068. Quanto aos outros parâmetros, as reduções das violações ocorreram para *E. coli* (81,3% em todos os pontos da região), Criseno (2%, no ponto PT-13), DBO (0,2% no ponto PT-02), Benzo(a)pireno e Benzo(b)fluoranteno (1%, no ponto PT-13) e Benzo(a)antraceno (nulo). 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 que podem, eventualmente, ser fontes de vazamentos de combustíveis ou óleos lubrificantes derivados do petróleo. Aumento foi verificado para o Fósforo total (61,1%). Verifica-se, ainda, que todos esses parâmetros apresentaram percentuais de violação no último período sazonal de estiagem superiores ao *baseline* de chuva do Igam, com exceção da *E. coli*, que se apresentou inferior a essa métrica (94,6%). 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, aumento de violações foram verificadas para o Chumbo (21,5%), Cobre e Níquel (0,6%), em suas frações totais. No período de chuva 2022/2023, não ocorreram violações para o Cromo total, assim como para o Vanádio total em todos os períodos analisados.

Destaca-se que, as ocorrências dos parâmetros orgânicos podem estar relacionadas com a presença de máquinas que operam em atividades diversas a montante da área de dragagem e ao longo do rio Paraopeba. Além disso, 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). Esses cenários podem contribuir para os desvios observados, visto que todas essas atividades adjacentes podem ocasionar vazamentos de combustíveis ou óleos lubrificantes derivados do petróleo.

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, Cor verdadeira, Oxigênio dissolvido, Sólidos suspensos totais, DBO, *E.coli*/Coliformes, Fósforo total e Chumbo total. No período de chuva 2022/2023, ocorreram violações para todos os parâmetros majoritários: Alumínio dissolvido (82,50%), Ferro dissolvido (93,10%), Manganês total (97,00%) e Turbidez (69,70%) e físico-químicos: Cor verdadeira (18,60%), Oxigênio dissolvido (5,90%), pH (3,50%), Sólidos dissolvidos totais (0,40%) e Sólidos suspensos totais (59,70%), cujos percentuais de desvios, de modo geral, sofreram redução quando comparado ao ciclo de chuva

anterior (2021/2022), exceto para Cor verdadeira e Sólidos dissolvidos totais, mas foram superiores às condições de *baseline* de chuva (exceto para Cor verdadeira). Ressalta-se que o parâmetro Sólidos dissolvidos totais, não apresentou desvio em nenhum dos períodos anteriores, apenas no período de chuva de 2022/2023 em uma amostra do PT-48 (**Tabela 6.3.1-8**). Ainda 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. Desvio ao padrão legal na matriz de pontos referente à região também foram observados para Cor verdadeira, Oxigênio dissolvido e Sólidos suspensos totais, dos quais nenhum dos pontos se destacou em relação aos demais.

Para os parâmetros de cunho sanitário, houve registro de violações para DBO (3,00%), *E.coli*/Coliformes (87,7%), Fósforo total (81%) e Nitrogênio amoniacal (0,40%). Dentre estes, para DBO, Fósforo total e Nitrogênio amoniacal o percentual se manteve acima do *baseline* de chuva (1,30%, 50% e 0%, respectivamente), bem como do período chuvoso anterior (1%, 76,70% e 0%, respectivamente), ao passo que *E.coli* /Coliformes apresentaram redução em relação aos dois períodos (*baseline* = 90,80% e 2021/2022 = 96,10%). As violações para Nitrogênio amoniacal ocorreram de forma pontual no PT-14, para DBO no PT-48 e 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 uma redução no número de parâmetros que apresentaram desvios ao longo dos anos, indicando melhores condições frente aos períodos anteriores e *baseline* sazonal. Houve registro de violações, no período de chuva 2022/2023, apenas para Chumbo total (21,30%), cujos desvios foram identificados em todos os pontos de monitoramento da região 1B (**Tabela 6.3.1-8**). Esse percentual foi brevemente superior ao observado no ciclo anterior (18,90%), porém inferior às condições de *baseline* calculadas para a região (23,70%). Especificamente para o Cromo total, houve redução das violações quando comparado os dois últimos períodos de chuva.

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, também, principalmente nos períodos chuvosos.

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, Cor verdadeira, Oxigênio dissolvido, Sólidos suspensos totais, DBO, Escherichia/Coliformes, Fósforo total e Chumbo total. Em geral, observa-se queda dos percentuais de violação dos parâmetros majoritários (com exceção da Turbidez), dos parâmetros categorizados como Outros e dos traços 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 da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4-A. 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 chuva 2022/2023, foram registradas inconformidades para Alumínio dissolvido (72%), Ferro dissolvido (82,40%), Manganês total (80,60%) e Turbidez (74,80%). Esses percentuais de violação se apresentaram mais elevados que os valores de *baseline* de chuva da região, porém inferiores aos observados no ciclo de chuva anterior (2021/2022), exceto para Turbidez que apresentou um aumento de 72,60% para 74,80%. 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 *baseline* (BP082, BP083 e BP078). 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 chuva 2022/2023 para Cor verdadeira (15,80%), Oxigênio dissolvido (7,60%), pH (2,20%) e Sólidos suspensos totais (57,1%). Exceto para Sólidos suspensos totais, houve aumento no percentual de desvios identificados do ciclo anterior (2021/2022) para o atual (2022/2023). De modo geral o percentual de violação no ciclo de referência também foi superior aos de *baseline*, exceto para Cor verdadeira. Além disso, ocorreram violações para os parâmetros DBO (0,30%), *E.coli* /Coliforme (29,70%) e Fósforo total (69,10%), todos com percentuais inferiores aos observados no período chuvoso anterior e superiores aos percentuais do *baseline* (exceto Fósforo total para essa última condição). Já para os traços, assim como observado na região anterior, nota-se uma redução no número de parâmetros que apresentaram desvios ao longo dos anos, indicando melhores condições frente aos períodos anteriores e ao *baseline* sazonal. No período chuvoso 2022/2023, houve registro de violações apenas para Chumbo total (12,70%), observadas do ponto BP082 em diante (dentro da região 2A) (**Tabela 6.3.1-8**).

Para a região 2B, **Tabela 6.3.1-6**, a qual compreende os pontos de monitoramento PT20, 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 consequente atenuação das concentrações na superfície da água. Nesta região, no período de chuva 2022/2023, houve violação para Alumínio dissolvido (62,70%), Ferro dissolvido (56,60%), Manganês Total (7,00%) e Turbidez (13,90%), todos os percentuais inferiores aos registrados no período de chuva 2021/2022 (85,30%, 82,60%, 9,40% e 16,10%, respectivamente) e superiores, exceto para o Manganês total e Turbidez, ao *baseline* de chuva (36,40%, 13,60%, 27,30% e 18,20%, respectivamente). Destaca-se que esses parâmetros apresentaram desvios, em maior ou menor grau, em todos os períodos chuvosos 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 chuvoso 2022/2023, incluindo o BP099 (*baseline*), sendo os maiores percentuais identificados no PT-20, localizado no início do reservatório e, portanto, mais susceptível a contribuições dos trechos lóticos a montante.

Para os físico-químicos, no período chuvoso de 2022/2023 houve violação para Cor verdadeira (18,50%), Oxigênio dissolvido (2,60%), pH (0,40%) e Sólidos suspensos totais (3,00%), que também registraram desvio em períodos de chuva anteriores (exceto pH no início de 2019). Comparando com o período anterior (2021/2022), percebe-se redução no percentual de violação para o pH e Sólidos suspensos totais (1,40% para 0,40% e 7,20% para 3,00%, respectivamente) e uma elevação para Cor verdadeira e Oxigênio dissolvido. (1,60% para 18,50% e 1,80% para 2,60%, respectivamente). Conforme **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos de monitoramento da região violaram Cor Verdadeira e Oxigênio dissolvido no período de chuva 2022/2023.

Para os parâmetros traço, foram registrados desvios pontuais para Chumbo total e Zinco total ao longo dos períodos analisado, com violação pontual para Chumbo total identificada no PT-28, no ciclo de 2022/2023. Para os demais parâmetros analisados, houve registro de violação para *Escherichia/Coliformes* e Fósforo total em todos os períodos analisados (inclusive *baseline*), sendo no último ciclo (2022/2023) identificados pontualmente no PT-20 (*Escherichia/Coliformes*) e em todos os pontos, principalmente PT-20 (Fósforo total) (**Tabela 6.3.1-8**). Exclusivamente para esse ciclo chuvoso houve violações pontuais de Nitrogênio amoniacal nos PT-20 e PT-21.

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 chuva 2022/2023, houve violação para Alumínio dissolvido (56,30%), Ferro dissolvido (53,10%), Manganês Total (3,30%) e Turbidez (12,50%), todos os percentuais inferiores aos registrados no período de chuva 2021/2022 (83,50%, 75,70%, 7,40% e 14,20%, respectivamente) e superiores, exceto para o Manganês total e Turbidez, ao *baseline* de chuva (36,40%, 13,60%, 27,30% e 18,20%, respectivamente). Destaca-se que esses parâmetros apresentaram desvios, em maior ou menor grau, em todos os períodos chuvosos analisados, inclusive *baseline*. Conforme indicado na **Tabela 6.3.1-8**, todos os pontos localizados na região 2C registraram desvio para os majoritários no período chuvoso 2022/2023, incluindo o BP099 (*baseline*).

Para os físico-químicos, houve violação para Cor verdadeira (13,60%), Oxigênio dissolvido (3,00%) e pH (1,10%), que também registraram desvio em períodos de chuva anteriores, principalmente do final de 2019 em diante. Nesse período observa-se, de modo geral, uma condição de redução no percentual de violações. Exemplo de exceção se deu para Cor verdadeira, cujo percentual aumentou de 2,10% para 13,60% nos últimos ciclos analisados (2021/2022 para 2022/2023). Conforme **Tabela 6.3.1-8** todos os pontos de monitoramento da região violaram Cor Verdadeira no período de chuva 2022/2023, e os únicos pontos que registraram desvios para os três 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 2022/2023. Para os demais parâmetros analisados, houve registro de violação para *E.coli*/Coliformes e Fósforo total em todos os períodos analisados, sendo no último ciclo (2022/2023) identificados pontualmente no JRB-02 (*E.coli*/Coliformes) e em todos os pontos, principalmente PT-22 (Fósforo total) (**Tabela 6.3.1-8**). Exclusivamente para esse ciclo chuvoso houve violações pontuais de Nitrogênio amoniacal nos PT-57 e CE-02.

De maneira geral, para os elementos Ferro e Alumínio, em suas frações dissolvidas, dentro dos períodos de chuva analisados, notaram-se violações inferiores no Ferro-Carvão se comparado às demais regiões, Montante (não impactada) e 1A a 2C, localizadas no rio Paraopeba.

Temporalmente, esses desvios apresentam um comportamento gradual de aumento das violações em todas as regiões analisadas, exceto pela região do Ferro-Carvão, que possui uma maior heterogeneidade no comportamento. Em geral e especificamente no período de 2022/2023, comparando-se com 2021/2022, 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 chuva, 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 chuva 2021/2022 e 2022/2023, observou-se redução de violação para os metais majoritários e aumento ou manutenção para a Turbidez. Para os parâmetros traços, nota-se os mesmos metais apresentando violações, entretanto, em baixos percentuais. Para os parâmetros sanitários que apresentaram os maiores percentuais de violação em 2021/2022, à saber, *E. coli* e Fósforo total, observou-se de forma predominante a redução dos desvios no período de chuva de 2022/2023. 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, Chumbo total e *E.coli* (ponto: PT-02; *baseline*: BP068), o Manganês total e Sólidos suspensos totais (ponto: PT-43; *baseline*: BP082), e Manganês total, Chumbo total, Oxigênio dissolvido, Sólidos suspensos totais e *E.coli* (ponto: PT-49; *baseline*: BP083).

6.3.2. Mapas temáticos - VMP

Na **Figura 6.3.2-1** a **Figura 6.3.2-5**, 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.

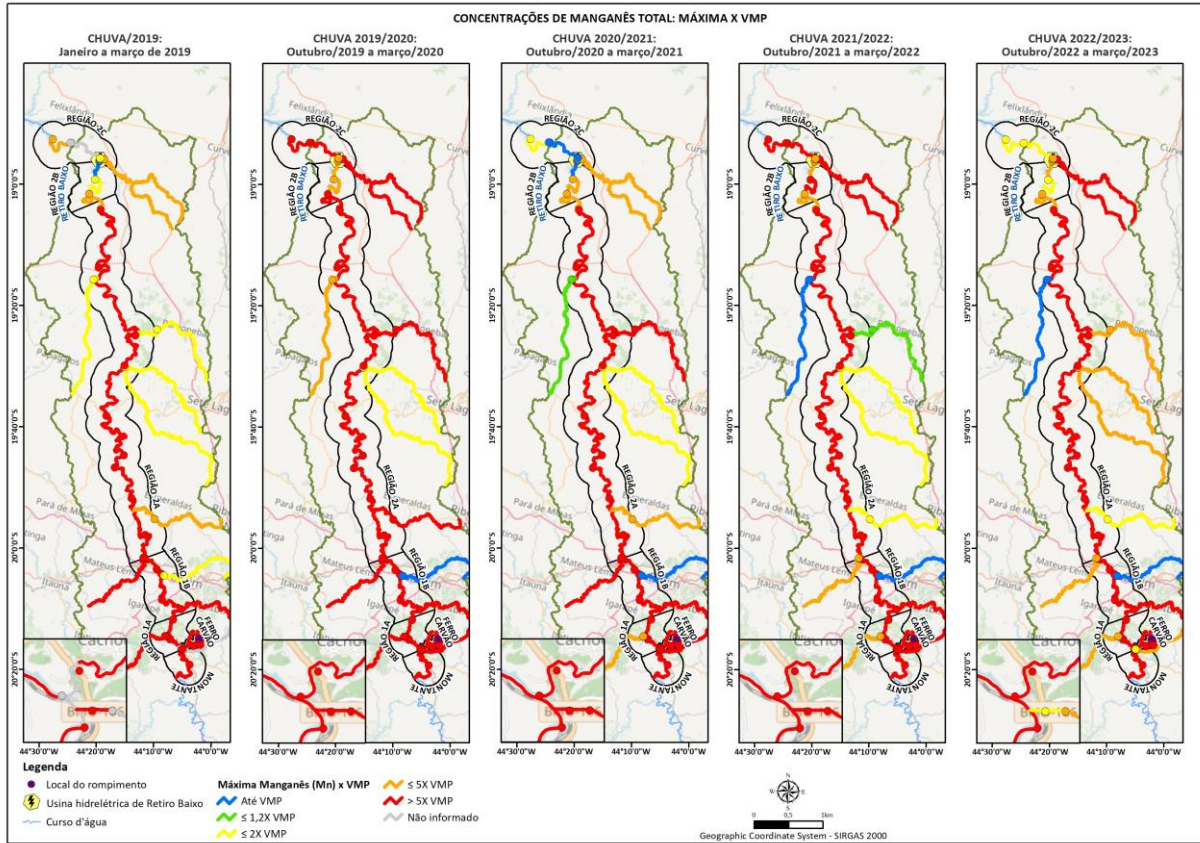
Os parâmetros contemplados no presente item, em ordem de apresentação dos mapas, são: Manganês total (**Figura 6.3.2-1**), Ferro dissolvido (**Figura 6.3.2-2**), Alumínio dissolvido (**Figura 6.3.2-3**), Turbidez (**Figura 6.3.2-4**) e Chumbo total (**Figura 6.3.2-5**). Assim, é possível visualizar a condição de afastamento e aproximação de tais resultados em relação aos limites legais nos períodos de chuva 2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva

2021/2022 e chuva 2022/2023. Os mapas para cada mês, compreendido entre janeiro/2019 e março/2023, são apresentados no **Anexo VI-B**.

Verifica-se que, após o rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens 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 6.3.2-1 Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP

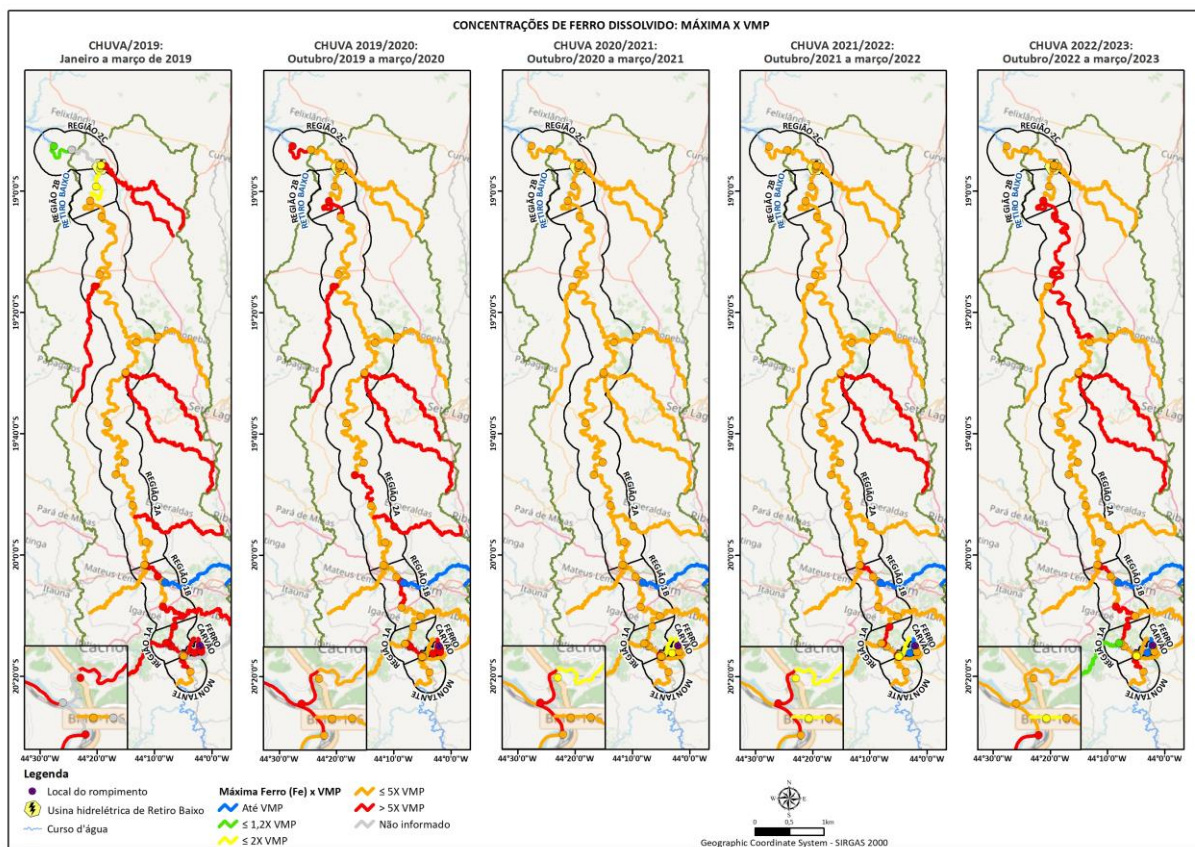


Para Manganês total (Figura 6.3.2-1), comparando-se o período de chuva mais recente (2022/2023) com os pretéritos, na região 2C é verificada aproximação em relação ao VMP, com resultados inferiores ou iguais a duas vezes o valor preconizado em legislação, enquanto no período anterior houve predomínio de valores cinco vezes maiores. Tal condição pode estar associada ao elevado volume pluviométrico ocorrido na chuva 2021/2022, conforme abordado no referido relatório de Fechamento de Ciclo (ARCADIS, 2022c).

Ao longo de toda calha do rio Paraopeba, há predomínio de resultados máximos cinco vezes superiores ao VMP, levando em consideração todos os ciclos chuvosos avaliados. No que tange aos tributários, especificamente para os localizados à margem direita na região 2A, nota-se aumento do afastamento ao VMP comparando-se com as chuvas pretéritas, com exceção do ribeirão do Cedro que apresentou afastamentos mais evidentes anteriormente.

■ Ferro dissolvido

Figura 6.3.2-2 Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP

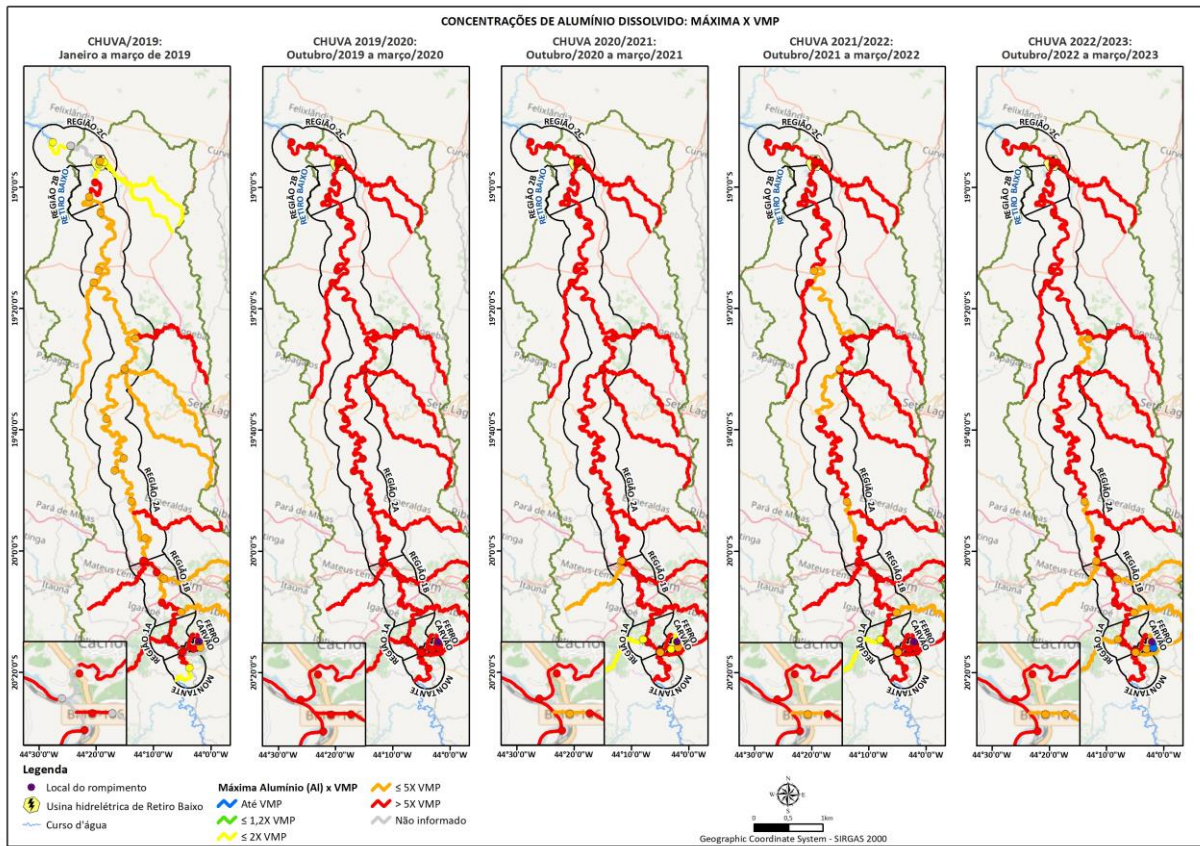


Para Ferro dissolvido (**Figura 6.3.2-2**), ao se analisar as concentrações máximas ao longo do monitoramento durante os períodos chuvosos, é verificada manutenção de valores em grande parte da calha principal entre as chuvas de 2019 e 2021/2022, com valores predominantemente inferiores ou equivalentes a cinco vezes o VMP. Em contrapartida, tal cenário não é verificado na chuva 2022/2023, no qual uma porção considerável do rio na região 2A e, assim como no ciclo de 2021/2022, os tributários ribeirão São João e ribeirão dos Macacos apresentaram resultados cinco vezes maiores que o VMP.

Com foco nas regiões afetadas, percebe-se que há atenuação dos afastamentos no decorrer dos períodos de chuva até 2021/2022, entretanto no último ciclo (2022/2023) há maior ocorrência de trechos com valores superiores à cinco vezes o VMP na referida região. Por fim, nas regiões mais a jusante (2B e 2C) não são verificadas variações entre as faixas de classificação em relação ao VMP desde a chuva de 2019/2020.

- Alumínio dissolvido

Figura 6.3.2-3 Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP

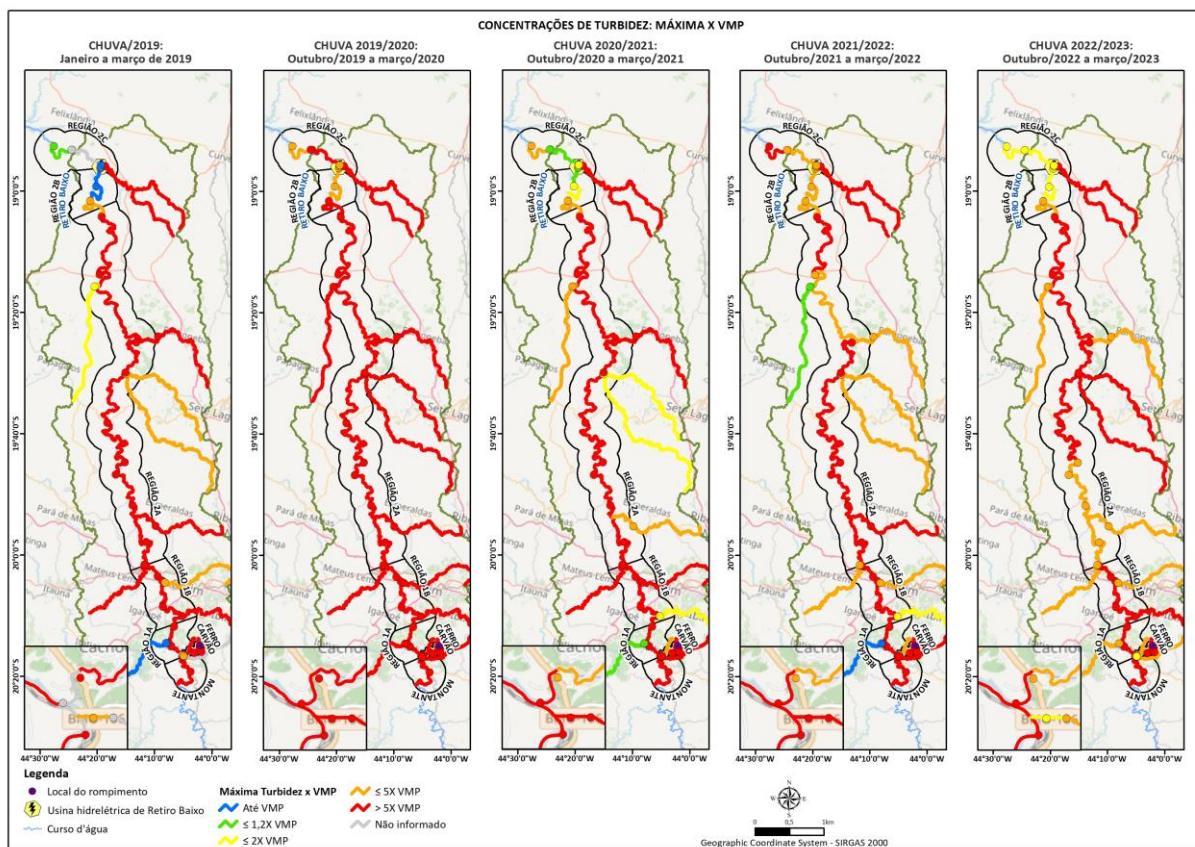


Para o Alumínio dissolvido (Figura 6.3.2-3), observa-se, de maneira geral, que este parâmetro apresenta concentrações máximas acima de cinco vezes o VMP ao longo de toda bacia e períodos analisados, incluindo os afluentes monitorados do rio Paraopeba, com afastamentos em relação ao VMP bem evidentes, excetuando-se o primeiro período monitorado (chuva/2019). De modo geral, no período de chuva recente, as maiores violações para Alumínio dissolvido centralizam-se nas regiões de montante, 1A, 1B, 2B e 2C. 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.

■ Turbidez

Figura 6.3.2-4 Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP

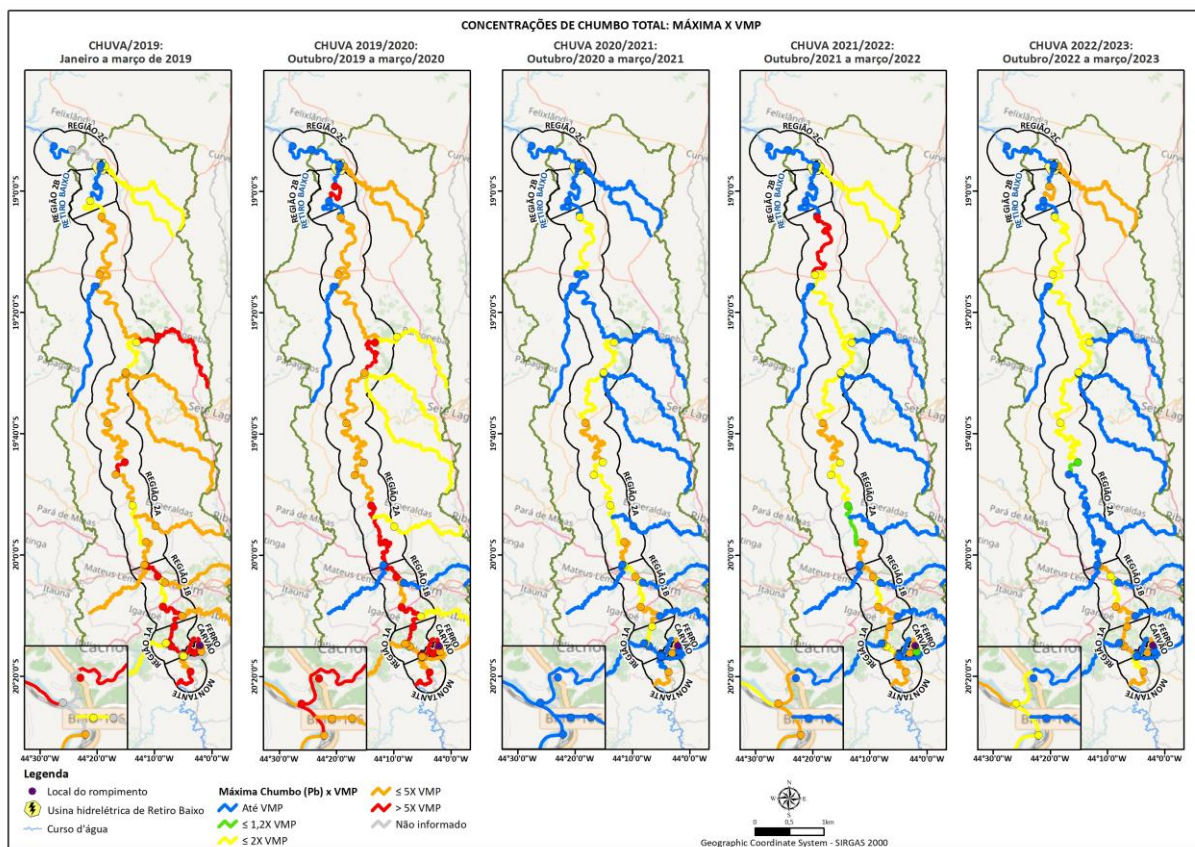


Em relação aos valores analisados para Turbidez (**Figura 6.3.2-4**), nota-se no último período sazonal de chuva, comportamento de aumento das concentrações máximas em seus tributários, localizados na região 1A (margem direita) e 1B (margem esquerda) e redução em trechos da região 2A, 2B e 2C. Especificamente no último período analisado, de forma pontual no Ferro-Carvão e na região 2B e 2C, têm-se para este analito valores máximos de turbidez até duas vezes o VMP.

Em geral, ao longo de toda a bacia do Paraopeba, desde a chuva de 2019, pode ser observado maiores afastamentos ao *baseline* (teores máximos até cinco vezes acima do limite legal), o que pode ser associado ao regime pluviométrico relativo ao período sazonal de chuva e 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. Vale dizer que, a condição de elevada precipitação do período chuvoso 2021/2022, continuou reverberando seus efeitos no período de chuva 2022/2023 (**item 4**), condição essa que também pode influenciar no aumento da Turbidez nos cursos d'água.

- Chumbo total

Figura 6.3.2-5 Mapa de comparação dos teores máximos de Chumbo total com o VMP



Para Chumbo total (Figura 6.3.2-5), nota-se ao longo dos períodos de chuva, redução das concentrações máximas. Ao comparar os dois últimos períodos sazonais de chuva, 2021/2022 e 2022/2023, notou-se redução da concentração máxima de forma pontual no Ferro-Carvão, região de Montante, 1B e 2A. Especificamente na região 2C, no ribeirão dos Gomes e seus tributários, houve aumento das concentrações máximas para até cinco vezes o valor do VMP.

6.4. Considerações

No período de chuvas de 2022/2023, em geral, são observados menores percentuais de violação dos parâmetros em comparação com o período de chuvas de 2021/2022, mas ainda superiores quando comparados com a condição de referência sazonal (*baseline*). 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 2B. Além disso, o alumínio e o ferro, em suas frações dissolvidas, apresentam violações na região 2C.

Ao longo de todas as regiões, 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)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno (elementos quantificados em 1 de 102 amostras) e criseno (elemento quantificado em 2 de 102 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, inclusive na região de Montante, área não afetada pelo rompimento. Na região de Ferro-Carvão têm-se, além do Chumbo total, o Cádmio total, Cromo total e Níquel total e, na região 1A, também aparecem o Cobre dissolvido e Zinco total. Tal categoria de parâmetros não foi evidenciada na região 2C. 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 pós 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, nos períodos de chuva 2021/2022 e 2022/2023, observou-se redução das violações para os metais majoritários e aumento/manutenção para a Turbidez. Para os parâmetros traço e físico-químicos, no último período de chuva, é possível observar que, espacialmente, os percentuais de violação são mais reduzidos, quando estes são comparados com os demais grupos de parâmetros analisados. Em síntese, além dos parâmetros majoritários, a *E. coli* e o Fósforo total, categorizados como Outros parâmetros, apresentaram os maiores percentuais de violação.

De forma a complementar e através 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 manutenção da condição predominante de violação ao longo dos períodos de chuva, com variações principalmente nos tributários. Dentre os metais traço, têm-se o mapa temático do Chumbo total, elemento que apresentou redução das violações temporalmente e que, de forma predominante, no período de chuva 2022/2023, apresenta concentrações abaixo do VMP.

Considerando a avaliação do último período de chuva 2021/2022, apresentada detalhadamente no último Relatório de Fechamento de Ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b), notou-se inserção de alguns elementos como traços, sanitários e orgânicos, mas de forma geral, com baixa magnitude de violações se comparado aos demais elementos. Ao longo da calha do rio Paraopeba, é possível verificar de forma representativa a condição de altas violações para os parâmetros majoritários, excetuando-se pelas regiões mais distais do rompimento, 2B e 2C, que apresentaram redução dos desvios no período de chuva 2022/2023.

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

7.1. Objetivo

Avaliar o comportamento da qualidade hídrica dos reservatórios da UHE Retiro Baixo e do remanso UHE Três Marias, além de avaliar a hidrodinâmica ao longo dos ciclos sazonais correspondentes aos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

7.2. Metodologia

A fim de compreender a qualidade da água superficial nos reservatórios da UHE Retiro Baixo e UHE Três Marias ao longo dos períodos de chuva supramencionados, elaboraram-se os seguintes elementos para eventuais 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 da UHE Retiro Baixo e gráfico de médias e medianas das vazões defluentes da usina, com dados obtidos 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 previsto 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);

Importante mencionar que o período de chuva/2019 (janeiro a março) não foi considerado nas discussões do **item 9**, uma vez que o Programa Especial de Monitoramento da qualidade de águas e dos sedimentos do reservatório de Três Marias e entorno (PMQS-TM) iniciou-se em 02/04/2019, conforme elencado no Ofício nº 65/2019/AA-CD-ANA (ANA, 2019b). Destaca-se

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

7.3. Resultados e discussão

Especificamente para o rio Paraopeba, o reservatório da UHE Retiro Baixo representa mudança em seu regime hidráulico de escoamento (lótico para lântico), favorecendo os efeitos de decantação/sedimentação, diluição e outros processos de decaimento intrínsecos ao aumento do tempo de detenção hidráulica (TDH) e ao acúmulo de substancial volume. Da mesma maneira, características específicas relacionadas à morfometria do referido reservatório favorecem sua capacidade de estratificação térmica e, da mesma maneira, a ocorrência de desestratificação, com conseqüente circulação vertical da massa d'água. Tais discussões foram embasadas e são mais detalhadas nos relatórios de Fechamento de Ciclo: estiagem 2019 (ARCADIS, 2019) e chuva 2019-2020 (ARCADIS, 2020).

A qualidade da água do reservatório vem sendo rotineiramente avaliada pelos pontos em sequência PT-20, PT-28 e PT-21 com amostragens em superfície. Complementarmente, há monitoramento em ao longo da profundidade através dos pontos RB-01 e RB-02, pertencentes ao PMQS-TM e que estão localizados em trechos distintos (RB-01: início do remanso; RB-02: região central e 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 presente análise por ser efetivamente representativo de 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

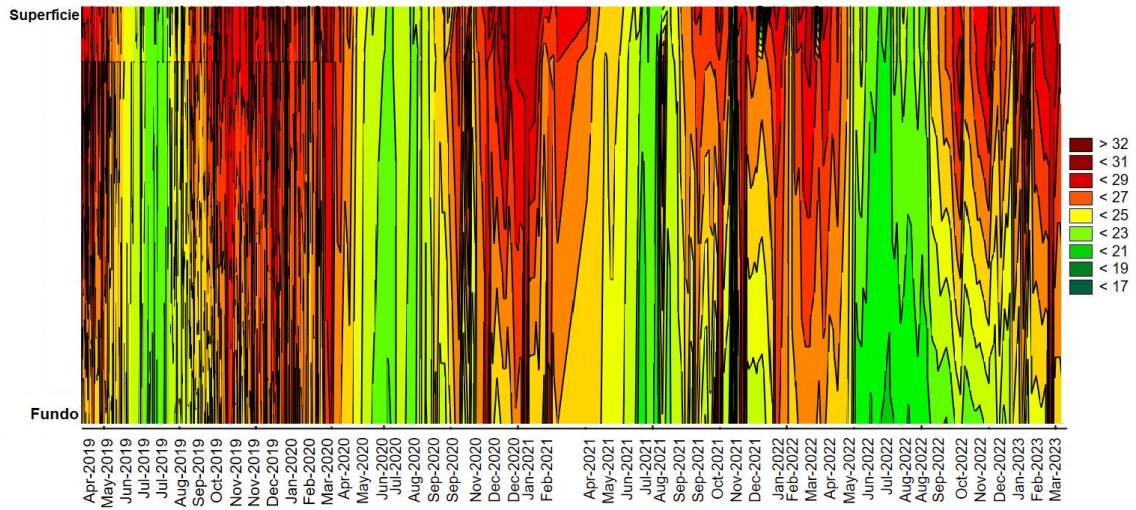


Gráfico 7.3.1-2 Diagrama da variação de Oxigênio dissolvido (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

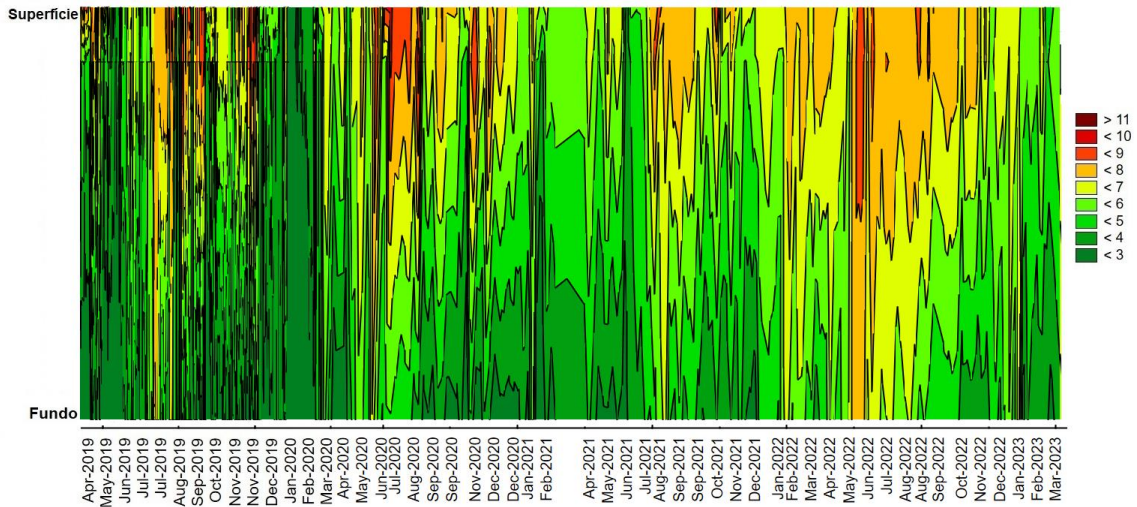


Gráfico 7.3.1-3 Diagrama da variação de Manganês total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

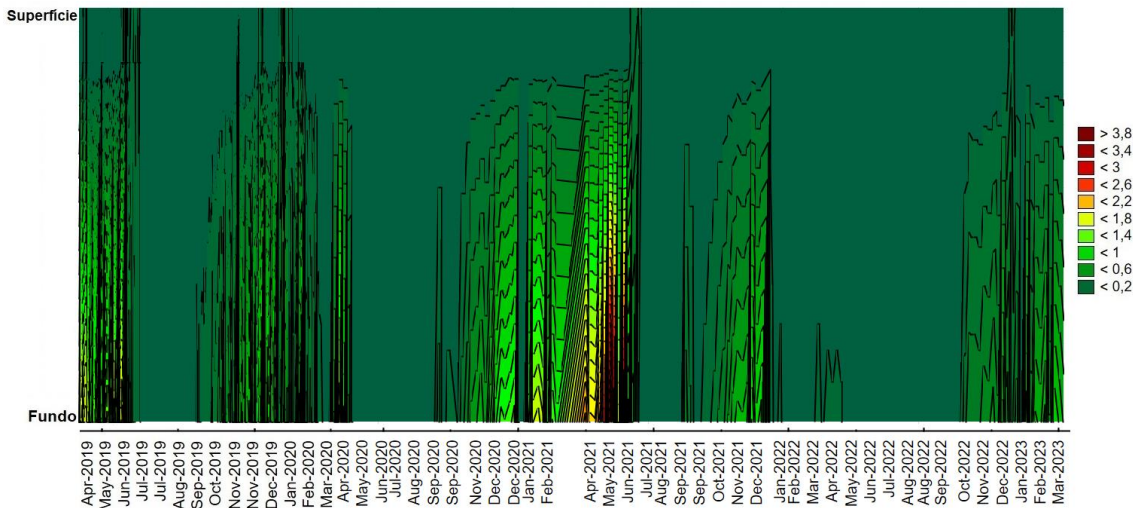


Gráfico 7.3.1-4 Diagrama da variação de Ferro total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02

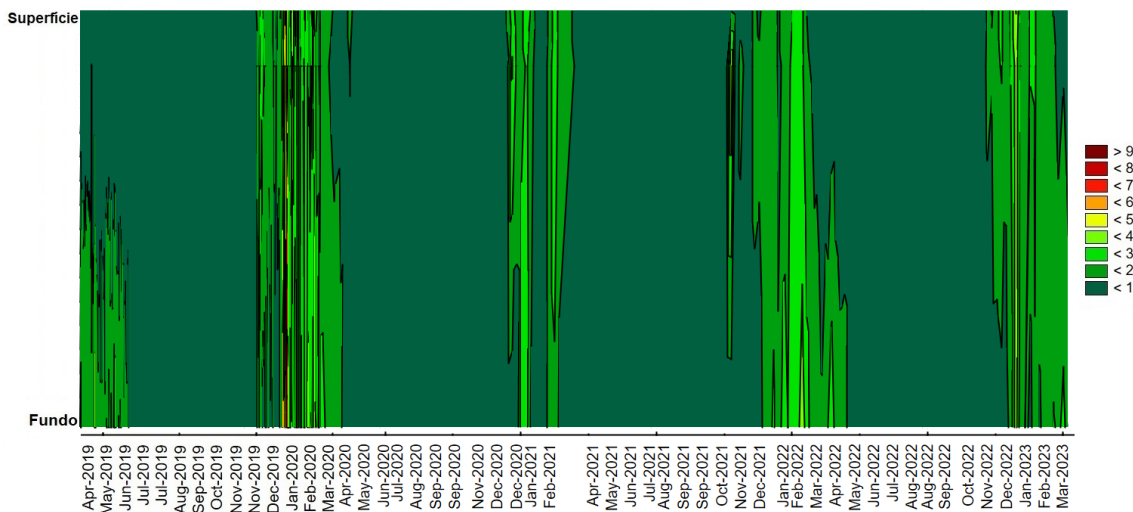
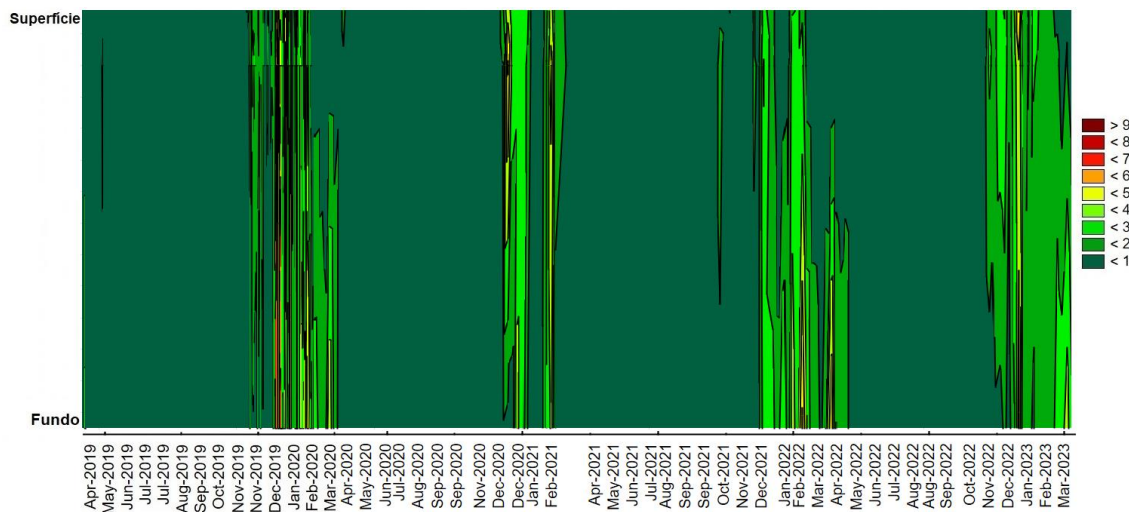


Gráfico 7.3.1-5 Diagrama da variação de Alumínio total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02



Durante o período chuvoso mais recente (2022/2023) não foram observados episódios claros de desestratificação térmica. Isso é consistente com o esperado, uma vez que, nos períodos mais quentes, é normal que haja uma diferenciação em camadas de temperatura (estratificação térmica) ao longo da profundidade. Essa estratificação térmica foi observada nos registros de temperatura entre outubro de 2022 e março de 2023. Em relação ao Oxigênio dissolvido (OD), assim como nos períodos chuvosos anteriores, foi observado um aumento na diferença de concentrações ao longo desse período. As maiores concentrações foram registradas na superfície, enquanto as concentrações menores foram encontradas nas camadas mais profundas.

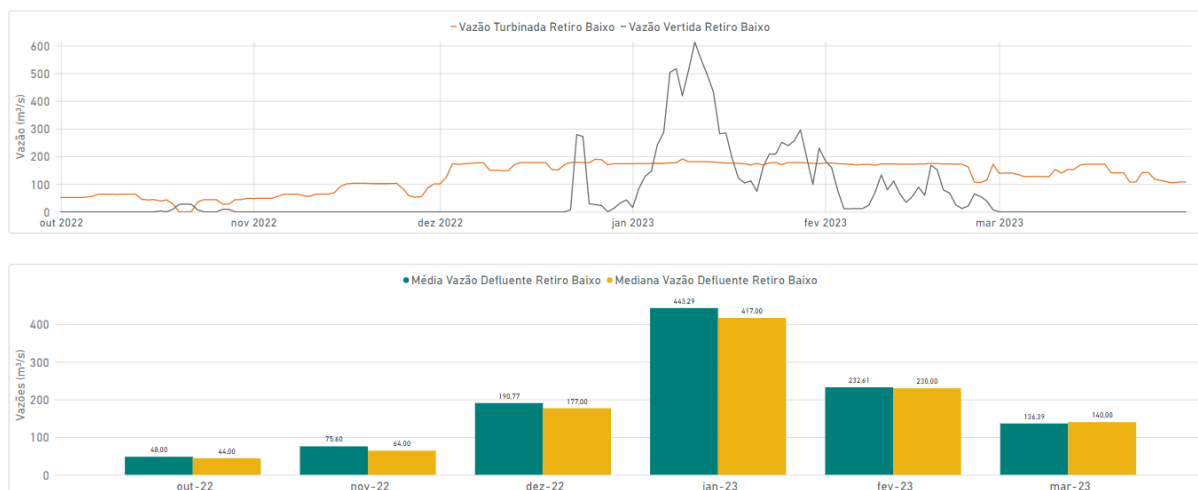
No que diz respeito aos metais, foi observado um comportamento semelhante entre o Ferro e Alumínio totais. Durante os períodos chuvosos, as concentrações desses metais foram elevadas e apresentaram um perfil vertical similar. Esse padrão de concentração começou no final de novembro de 2022 e se estendeu até o final do período chuvoso.

No caso do Manganês total, foi observado um comportamento diferente dos parâmetros mencionados anteriormente. Durante o período chuvoso mais recente (2022/2023), concentrações mais elevadas de manganês foram registradas no fundo do reservatório, no início de outubro de 2022, e se mantiveram até o final do período chuvoso. Isso difere do período sazonal anterior (2021/2023), no qual ocorreu uma redução significativa nos teores de manganês total a partir de janeiro de 2022. Essa redução pode ter sido causada pela circulação forçada de natureza hidráulica resultante de uma intensa onda cheia que ocorreu no reservatório nessa época.

Essa situação de circulação forçada e onda cheia pode ter gerado uma condição de diluição ao longo da profundidade e uma mistura intensa das camadas mais superficiais, afetando também a distribuição do oxigênio dissolvido (OD) nas camadas mais profundas.

No que diz respeito às regras de operações na UHE Retiro Baixo, no **Gráfico 7.3.1-6**, novamente é apresentada a evolução temporal das vazões vertidas e turbinadas durante o período de chuva 2022/2023. Ademais, são indicadas as vazões médias e medianas para o mesmo período.

Gráfico 7.3.1-6 Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período chuvoso de 2022/2023



Fonte: ANA, 2023a.

No que diz respeito às regras de operações do período chuvoso de 2022/2023, pode ser verificado que a operação de turbinamento apresentou oscilações durante todos os meses, sendo as maiores vazões registradas entre os meses de dezembro e janeiro. A respeito do vertimento, nota-se que as maiores vazões foram registradas durante os meses de janeiro e fevereiro, sendo que as vazões média e mediana de janeiro foram as mais relevantes do período. As análises completas, incluindo a avaliação comparativa dos períodos chuvosos anteriores, podem ser consultadas no item 4 do presente 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 chuva desde o rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4-A. 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 Chumbo total, 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 carreado pelo escoamento superficial advindo de chuvas.

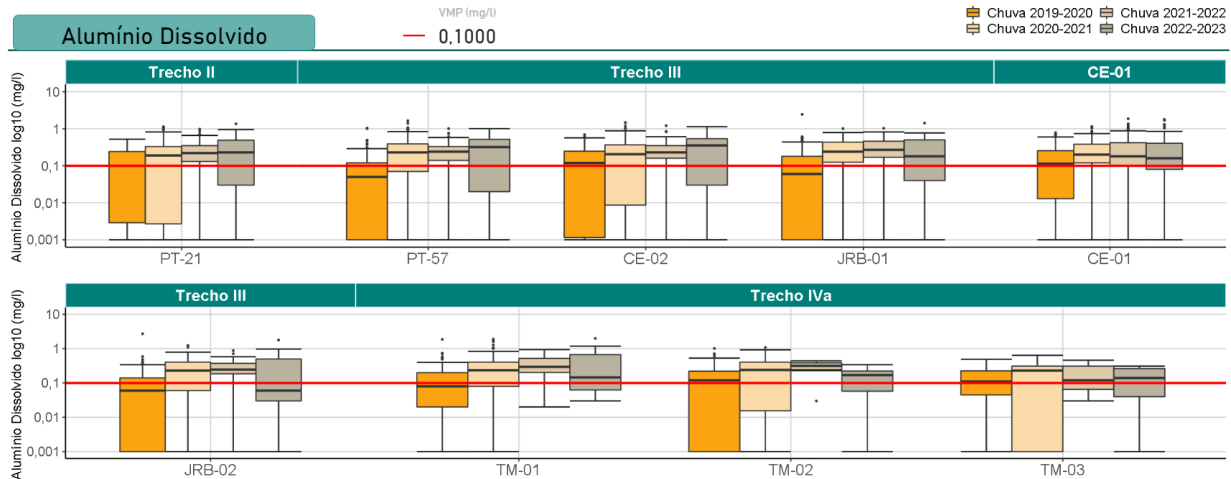
Além desses pontos anteriormente citados, foram incluídos os pontos TM-02 e TM-03, localizados no reservatório da UHE Três Marias entre o TM-01/PT-22 e a confluência do rio São Francisco.

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 chuva 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 (2023), 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 chuva. Em uma análise temporal, observa-se diferença de comportamento entre os pontos do reservatório de Três Marias e os pontos localizados a montante deste, exceto JRB-02. No atual período de análise (chuva 2022/2023), verifica-se que os resultados dos pontos do Trecho IVa foram menos dispersos quando comparados aos resultados dos trechos II e III. Verifica-se, também, que as maiores concentrações tiveram ocorrência no ponto CE-01, inclusive levando em consideração todos os períodos chuvosos pretéritos. De modo geral, o período em que foram verificadas as concentrações mais dispersas entre si foi a chuva 2019/2020 e, a partir desse, houve predominantemente comportamento de redução da dispersão e aumento das concentrações medianas até a chuva 2021/2022, ano em que ocorreram índices pluviométricos notavelmente elevados, seguida de aparente estabilidade.

Gráfico 7.3.2-1 Boxplots dos resultados de Al dissolvido dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, 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 chuvosos. Em um recorte temporal, percebe-se que as maiores concentrações de Ferro observadas durante a chuva mais recente (2022/2023), ocorreram nos pontos: PT-21, JRB-01, JRB-02 e TM-01.

Além disso, as maiores concentrações são observadas no ribeirão dos Gomes (CE-01), de caráter lótico, 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, pontos CE-02, JRB-01 e JRB-02), comportamento também observado para o período de chuva 2022/2023.

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



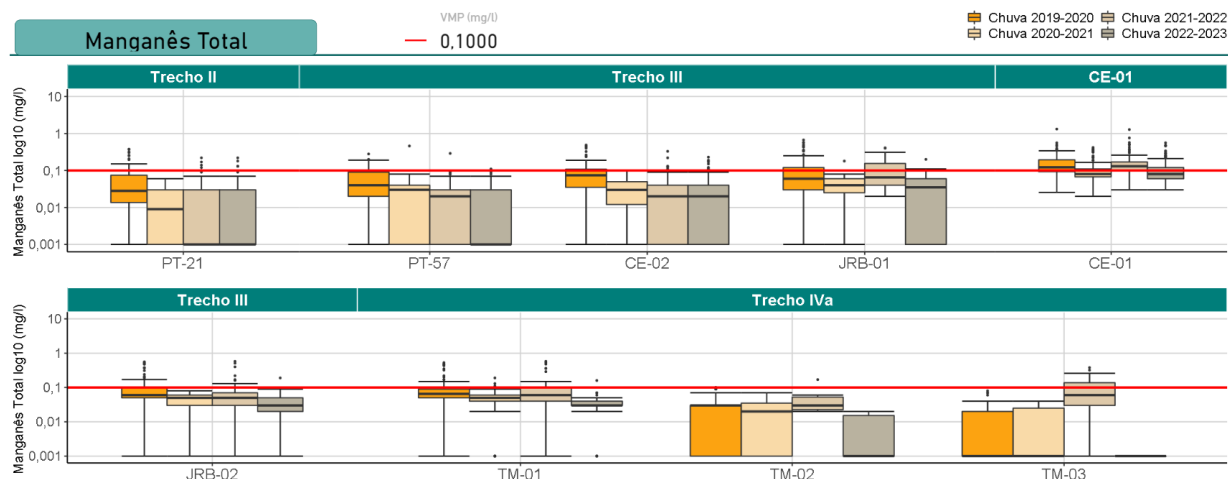
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

■ Manganês Total

O **Gráfico 7.3.2-3** apresenta os resultados para o Manganês total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de chuva. Em relação à evolução temporal do parâmetro, observa-se redução da concentração ao longo do tempo, em relação aos valores medianos nos pontos localizados nos trechos II e III. Nos pontos localizados no reservatório de Três Marias, tal comportamento não é claramente evidenciado, com oscilações entre os anos para todos os pontos, embora os pontos TM-02 e TM-03, de modo geral, apresentem variações superiores quando comparados ao TM-01/PT-22.

No período chuvoso de 2022/2023, as concentrações medianas mais elevadas são observadas no ponto CE-01 e, considerando o ponto supracitado juntamente com os pontos do Trecho III, percebe-se predominância do comportamento de redução dos valores medianos. 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 abril/2023 (ARCADIS, 2023).

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



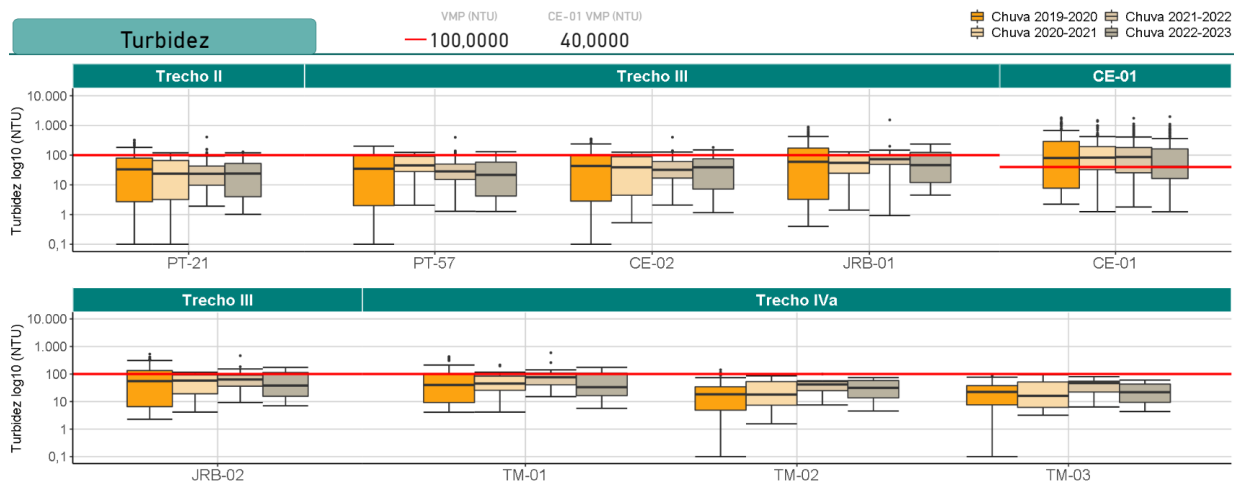
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

▪ **Turbidez**

No **Gráfico 7.3.2-4**, podem ser observados os resultados para Turbidez nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de chuva analisados. Em uma análise temporal, percebe-se que a maior parte dos pontos apresentam redução contínua da variabilidade de resultados entre as chuvas de 2019/2020 e 2021/2022 e, posteriormente, aumento da dispersão desses resultados na chuva 2022/2023. Grande parte dos resultados dos pontos localizados nos trechos II e III se mantiveram abaixo do VMP, com valores até o 3º quartil (P75) inferiores ao limite definido em legislação, de modo geral.

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 chuvosos.

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



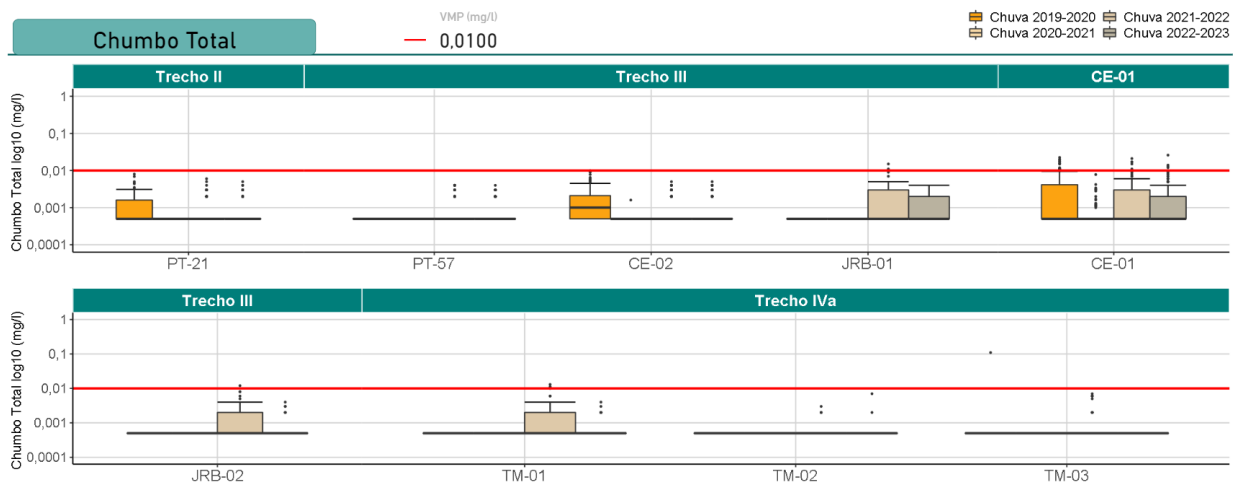
Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

▪ **Chumbo total**

No **Gráfico 7.3.2-5**, podem ser observados os resultados de Chumbo total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de chuva analisados. Percebe-se que, para o período de referência (chuva 2022/2023), ocorreram violações apenas no ponto CE-01. Ainda assim, o comportamento geral é de redução da variabilidade de resultados bem como das concentrações máximas.

De modo geral, o Chumbo se apresenta com baixas variações durante os períodos sazonais de chuva, sendo as maiores dispersões observadas de maneira pontual nos pontos PT-21, CE-02, JRB-01, CE-01, JRB-02 e TM-01/PT-22 em períodos pontuais. Nos pontos PT-57, TM-02 e TM-03, 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 (0,01 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 Chumbo total dos períodos chuvosos de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, 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).

7.4. Considerações

As alterações observadas no trecho a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo podem ser atribuídas a diversos fatores isolados e/ou combinados, relacionados às variações sazonais na bacia do rio Paraopeba. Esses fatores incluem o aumento do escoamento superficial e o incremento das vazões fluviais devido às variações pluviométricas nas áreas de drenagem da bacia. É possível que essas condições estejam sendo identificadas com alto nível de detalhe, devido à disponibilidade de um conjunto substancial de dados obtidos por meio de monitoramento frequente.

Na região a jusante da UHE Retiro Baixo, é possível observar áreas com alto grau de exposição do solo, o que favorece o aumento da contribuição difusa. Essa contribuição difusa é mais suscetível de ocorrer durante eventos de chuva nessas localidades, especialmente durante os períodos chuvosos.

Durante o período de chuvas de 2022/2023, a operação da UHE Retiro Baixo mostrou baixos valores de vazões vertidas entre outubro/2022 e a primeira metade de dezembro de 2022. No final de dezembro, as vazões aumentaram, atingindo os valores máximos do período sazonal em janeiro/2023, seguidos de um declínio posterior até março/2023. Em contraste, as vazões turbinadas apresentaram maior estabilidade em comparação às vazões vertidas, principalmente por estarem relacionadas à capacidade de geração de energia da usina hidrelétrica.

Esses padrões de variação nas vazões vertidas e turbinadas refletem a gestão operacional da UHE Retiro Baixo, que busca otimizar a produção de energia elétrica, levando em consideração

as condições hidrológicas e a demanda energética. Durante o período chuvoso, quando há maior disponibilidade hídrica, as vazões turbinadas são geralmente mantidas em níveis mais constantes, a fim de maximizar a geração de energia. Já as vazões vertidas podem variar de acordo com a necessidade de controle de cheias e o gerenciamento do reservatório, resultando em valores mais baixos ou mais elevados dependendo do período específico.

Os parâmetros de qualidade da água analisados, como Alumínio e Ferro dissolvidos, durante o período de chuvas de 2022/2023, mostraram uma maior variabilidade e medianas inferiores em comparação com o período chuvoso de 2021/2022. Ao estabelecer uma análise da evolução temporal desses parâmetros desde o período de chuvas de 2019/2020, é possível observar que os resultados foram mais expressivos durante a chuva de 2021/2022 em comparação com os demais.

O parâmetro majoritário que apresentou menores variações entre os períodos de chuva foi a Turbidez, embora seja evidente a atenuação das concentrações medianas, bem como redução da variabilidade dos resultados desde a chuva 2019/2020 para a maior parte dos pontos. Assim observa-se, portanto, uma relativa estabilidade temporal oscilando de acordo com condições momentâneas específicas do período. No ponto CE-01 (ribeirão dos Gomes/Almas), é verificada, também, certa estabilidade temporal das concentrações e dos teores em todos os parâmetros majoritários, com oscilações naturais relacionadas possivelmente às características intrínsecas de cada período de chuva. Por fim, em relação ao Chumbo total, observa-se que, no período atual, os resultados de forma majoritária se mantiveram inferiores ao LQ, com exceção dos pontos JRB-01 e CE-01.

Durante os períodos de chuvas analisados, a turbidez foi o parâmetro majoritário que apresentou menores variações. Embora tenha sido observada uma atenuação das concentrações medianas e uma redução na variabilidade dos resultados desde o período de chuvas de 2019/2020 na maioria dos pontos de amostragem. Isso indica uma relativa estabilidade temporal, com oscilações de acordo com as condições específicas de cada período.

No ponto CE-01 (ribeirão dos Gomes/Almas), também foi verificada uma certa estabilidade temporal das concentrações e teores em todos os parâmetros majoritários, com oscilações naturais relacionadas provavelmente às características intrínsecas de cada período de chuva.

Quanto ao chumbo total, a maioria dos resultados no período atual se manteve abaixo do limite de quantificação (LQ), com exceção dos pontos JRB-01 e CE-01.

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 sondas 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. Os dados de telemetria reportados, com frequência horária, com exceção da AUT-EP, que reporta resultados a cada dez minutos, durante o período de vertimento no reservatório da Estaca-Prancha, permitem a comunicação dos resultados de forma mais expedita, favorecendo análises e 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 Bl. 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 citada 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 invalidade 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.

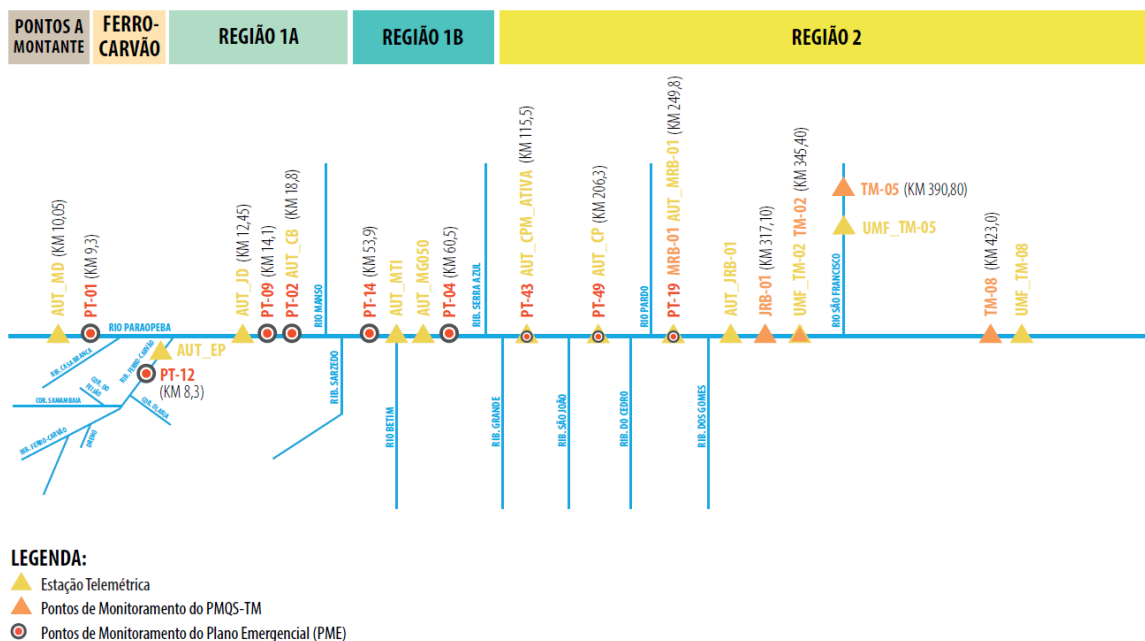
Tabela 8.2-2 - Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão

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 31/03/2023 (final do período de chuva/2022-2023). 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

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 chuva/2022-2023, foram comparados com os resultados previstos pelos modelos de regressão linear para o mesmo período.

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	0,08	0,15	0,12
	AUT-EP x PT-12	0,021	0,023	0,041
	AUT-JD x PT-09	0,058	0,084	0,078
TLM- 2	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,063	0,12	0,11
	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,096	0,02	0,099
	AUT-MG 050 x PT-48	0,038	0,0013	0,042
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,096	0,057	0,11
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,18	0,16	0,13
TLM- 3	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,18	0,4	0,025
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,14	0,17	0,16
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,17	0,41	0,26
	UMF-TM 05 x TM-05	0,0021	0,58	0,61
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00000046	0,49	0,60

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	0,70
	AUT-EP x PT-12	0,032	0,091	0,028
	AUT-JD x PT-09	0,64	0,72	0,68
TLM- 2	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,76	0,80	0,77
	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,47	0,69	0,67
	AUT-MG 050 x PT-04	0,46	0,49	0,40
	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-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,0012	0,30	0,29
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,75	0,87	0,80
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,45	0,66	0,72
	UMF-TM 05 x TM-05	0,19	0,54	0,51
		0,017	0,72	0,79

Área	Estação x ponto	R ² Mn total	R ² Fe total	R ² Al total
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00091	0,00052	0,033

Nota: valores destacados em vermelho indicam bom ajuste linear entre as variáveis analisadas

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

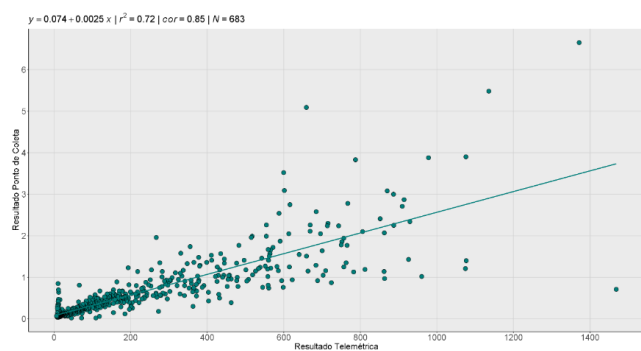


Gráfico 8.3-1 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Manganês total no PT-09

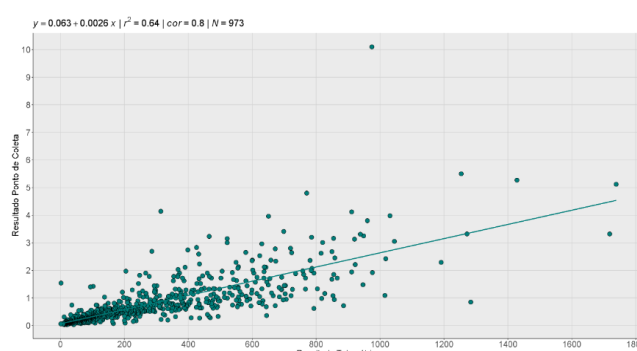


Gráfico 8.3-1 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Ferro total no PT-01

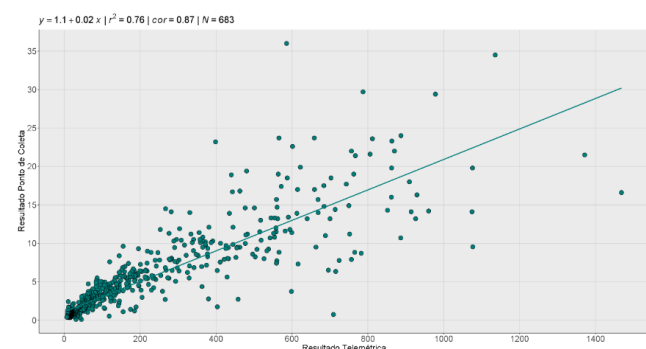


Gráfico 8.3-1 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Ferro total no ponto PT-09

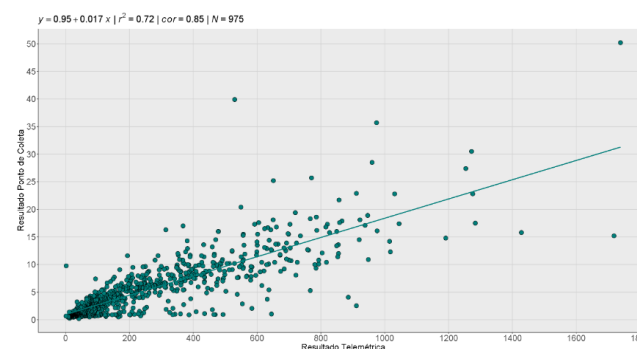


Gráfico 8.3-1 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Alumínio total no PT-01

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

RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS
- FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)

CÓDIGO VALE
1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3
CÓDIGO ARCADIS
1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3

Folha
164 / 373

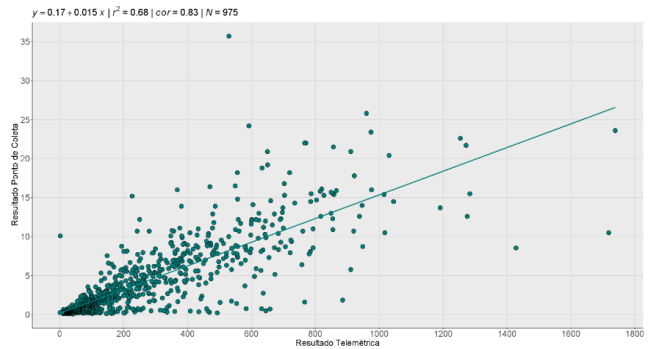
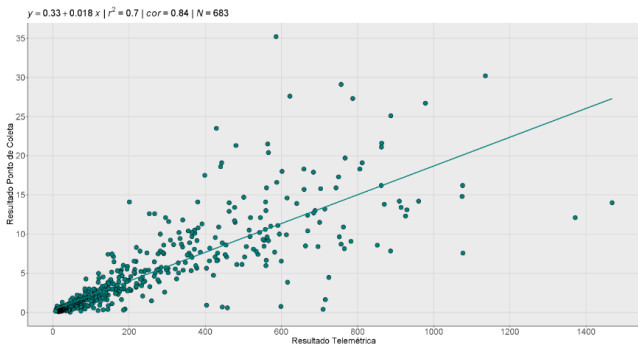


Gráfico 8.3-2 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CB, AUT-MTI e AUT-CPM_ATIVA) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) - gráfico dispersão e correlação de Pearson

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

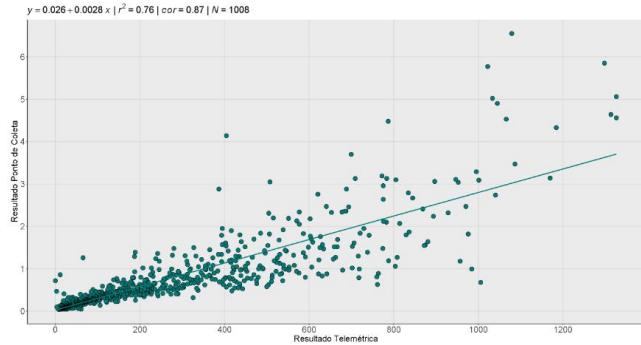


Gráfico 8.3-2 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Ferro total no ponto PT-14

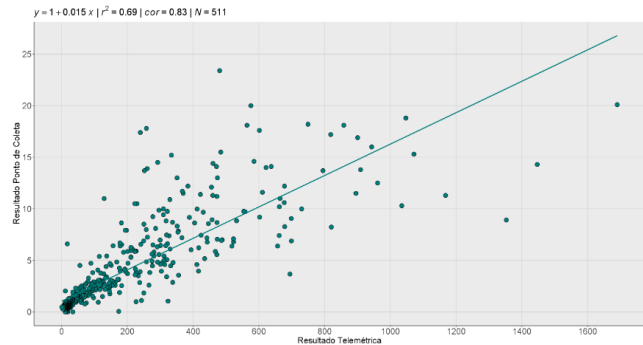


Gráfico 8.3-2 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Ferro total no PT-02

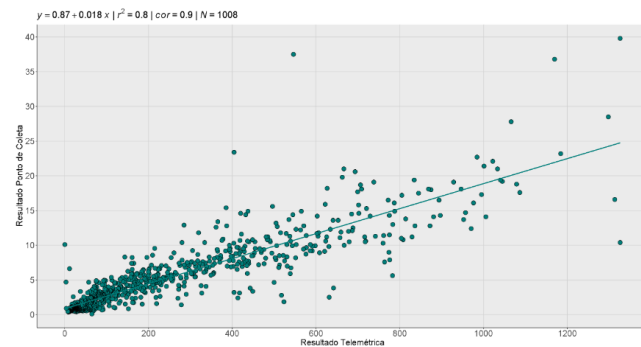


Gráfico 8.3-2 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Alumínio total no PT-14

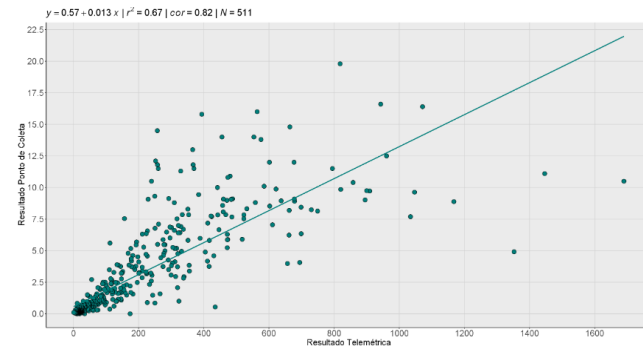


Gráfico 8.3-2 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Alumínio total no PT-02

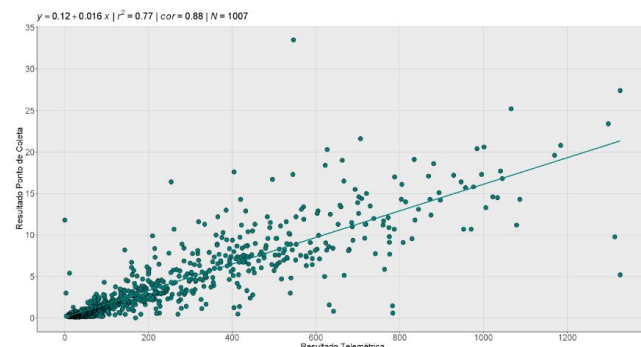


Gráfico 8.3-2 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Manganês total no PT-43

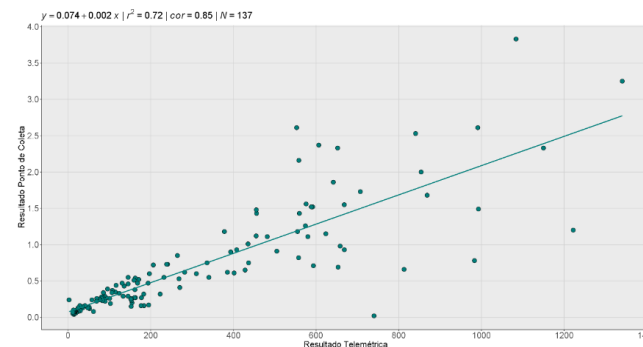


Gráfico 8.3-3 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CPM_Ativa, AUT-CP e AUT-MRB-01) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson

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

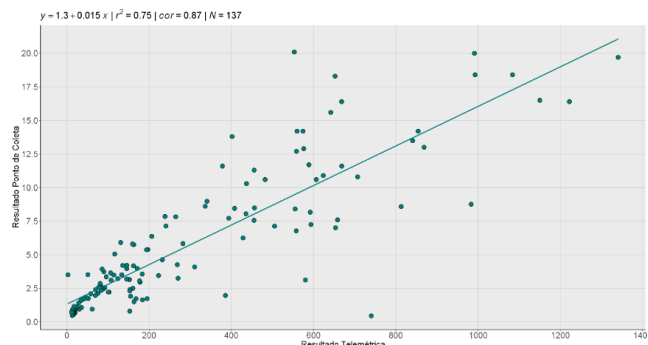


Gráfico 8.3-3 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Ferro total no PT-49

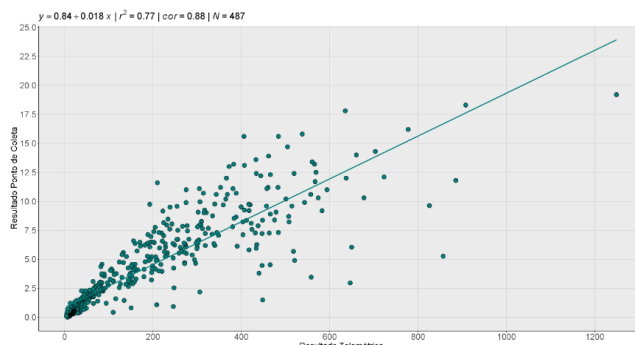


Gráfico 8.3-3 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Alumínio total no PT-43

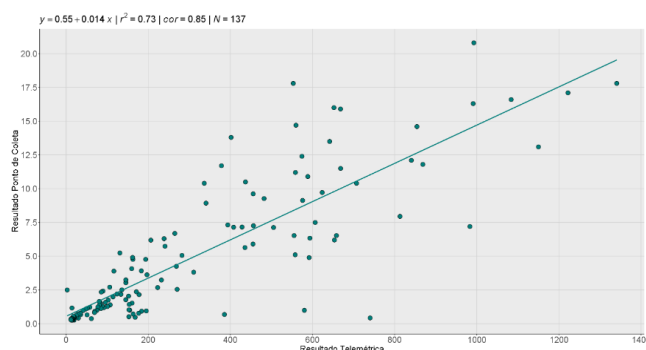


Gráfico 8.3-3 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Alumínio total no PT-49

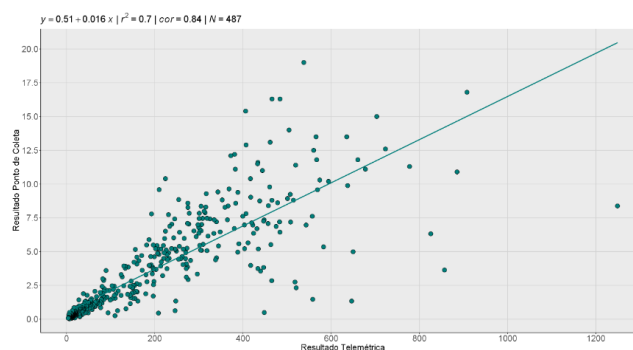


Gráfico 8.3-3 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Manganês total no PT-49

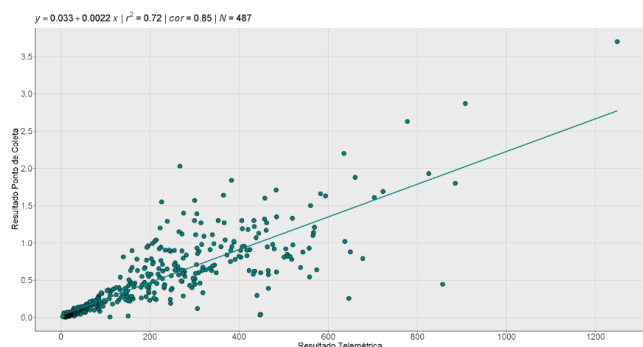


Gráfico 8.3-3 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Manganês total no PT-19

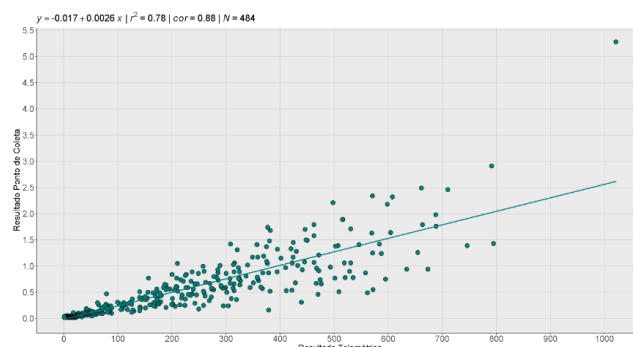


Gráfico 8.3-4 Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de Turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MRB-01, AUT-JRB-01 e UMF-TM-05) e as concentrações totais dos metais traçadores nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19, JRB-01 e TM-05) - Gráfico Dispersão e Correlação de Pearson

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.

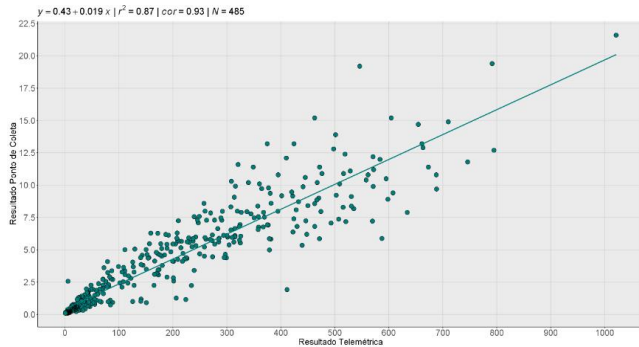


Gráfico 8.3-4 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Alumínio total no JRB-01.

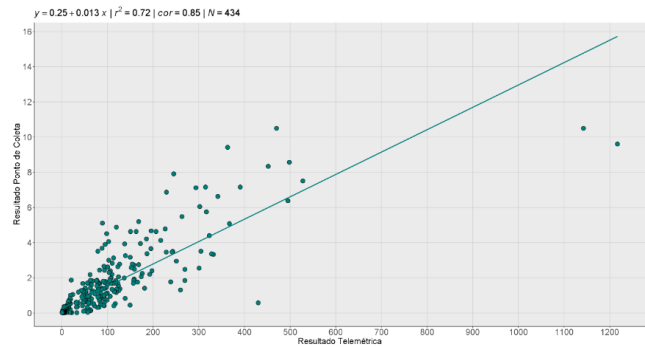


Gráfico 8.3-4 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Alumínio total no PT-19

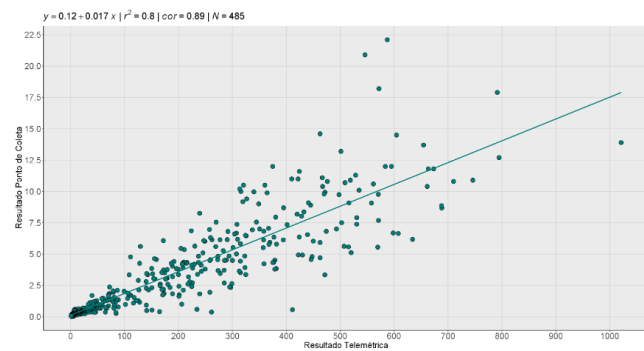


Gráfico 8.3-4 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Ferro total no TM-05

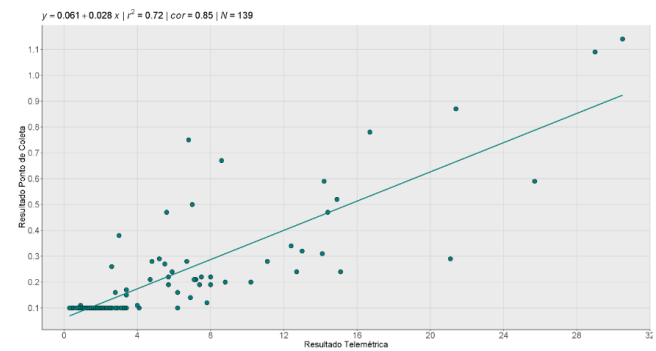


Gráfico 8.3-4 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Ferro total no JRB-01

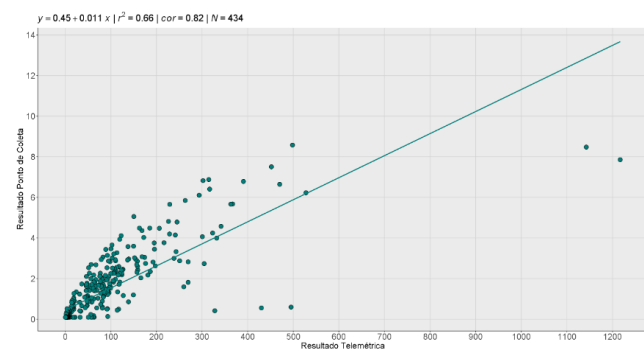
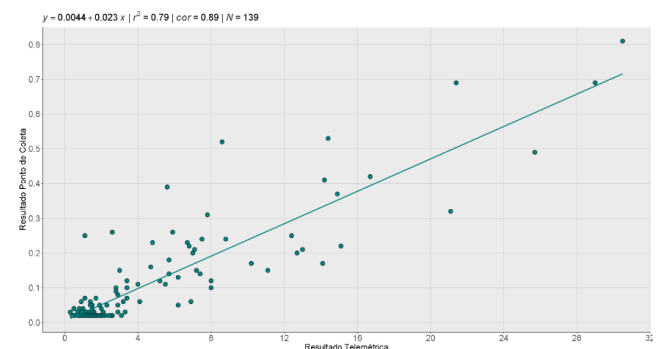


Gráfico 8.3-4 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Alumínio total no TM-05



Nos **Gráficos 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 **Gráficos 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 **Gráficos 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. Os valores de R^2 foram próximos de 0,8, com destaque para Manganês e Ferro total em que o modelo ajustado permite explicar até 80% da variabilidade das concentrações deste metal em função da Turbidez.

Nos **Gráficos 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 **Gráficos 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 ($R>0,83$). 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 **Gráficos 8.3-3 (F) e 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. Para os três casos as correlações estabelecidas foram fortes (R próximo de 0,8). 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 **Gráficos 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 **Gráficos 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, o **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 chuva 2022-2023 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 chuva 2022-2023 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

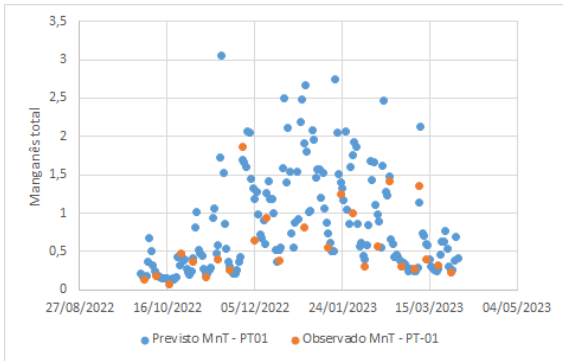


Gráfico 8.3-5 (D) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-JD

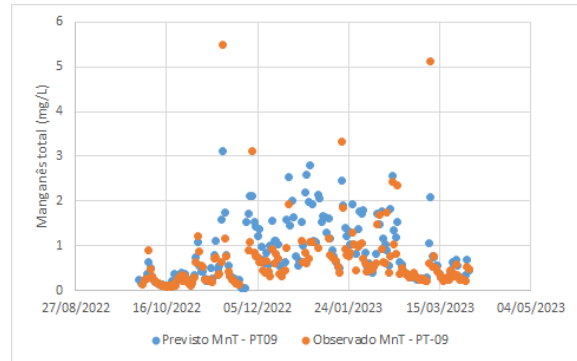


Gráfico 8.3-5 (B) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MD

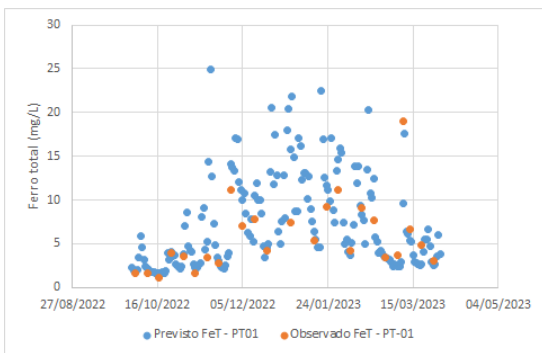


Gráfico 8.3-5 (E) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JD

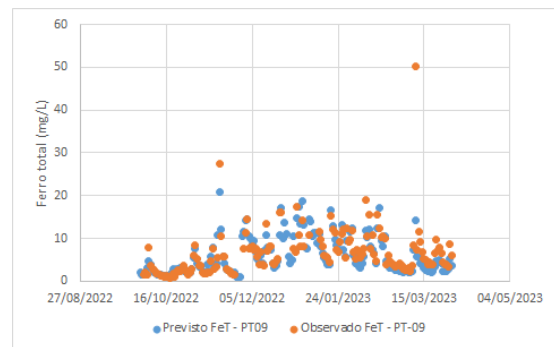


Gráfico 8.3-5 (C) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MD

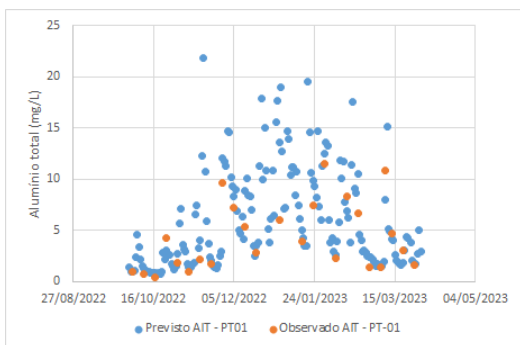


Gráfico 8.3-5 (F) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JD

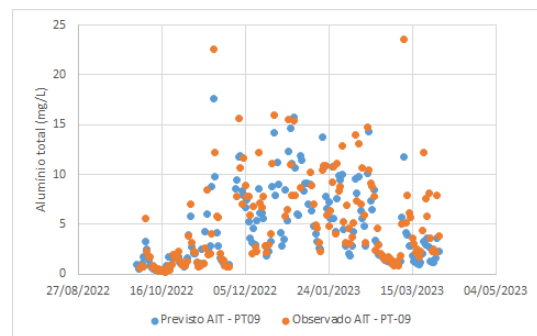


Gráfico 8.3-6 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

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)

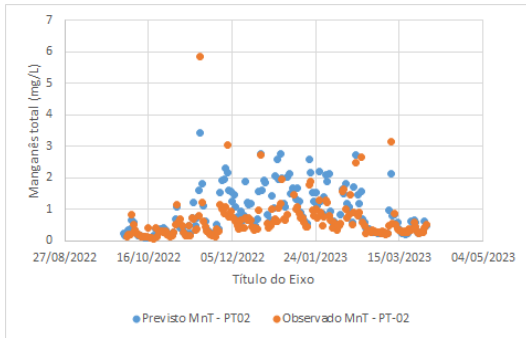


Gráfico 8.3.6 (D) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MTI (PT-14)

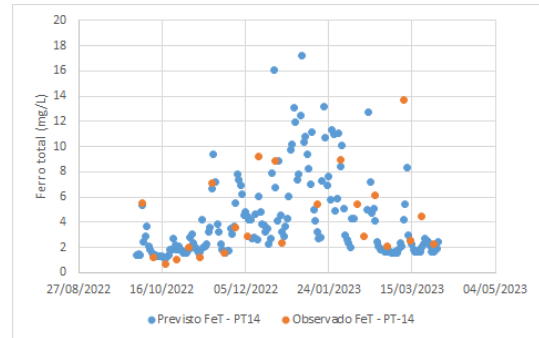


Gráfico 8.3.6 (B) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CB (PT-02)

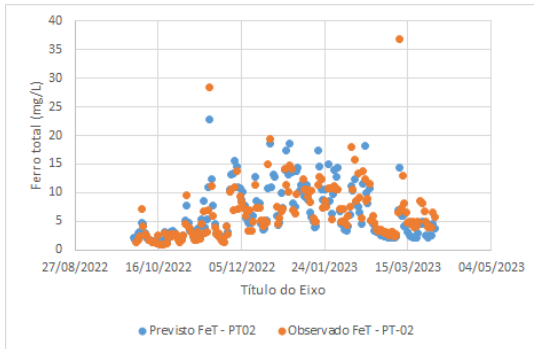


Gráfico 8.3.6 (E) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MTI (PT-14)

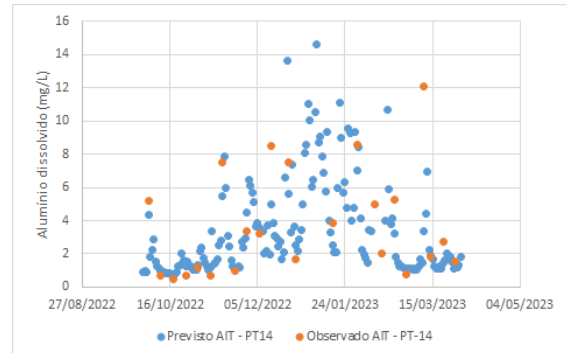


Gráfico 8.3.6 (C) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CB (PT-02)

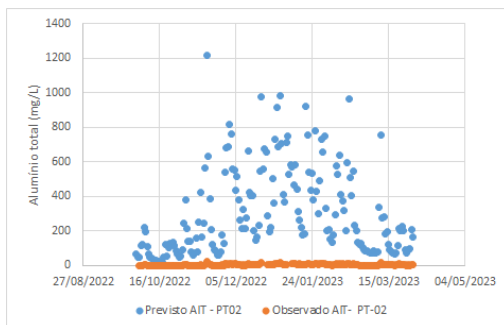


Gráfico 8.3.6 (F) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CPM_Ativa

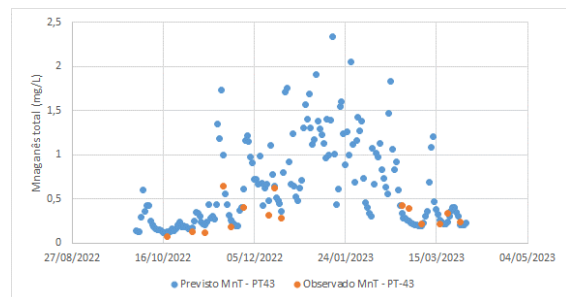


Gráfico 8.3-7 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

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.

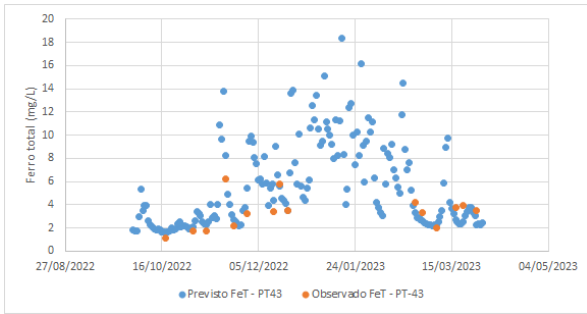


Gráfico 8.3.7 (D) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CP (PT-49).

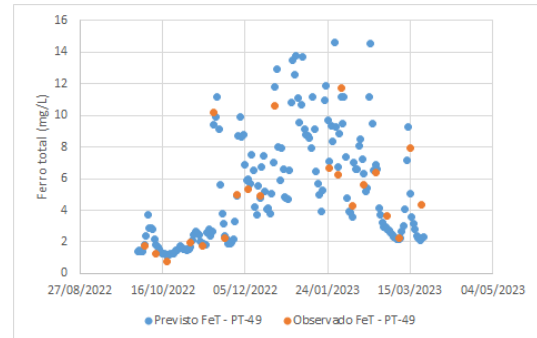


Gráfico 8.3.7 (B) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CPM_Ativa.

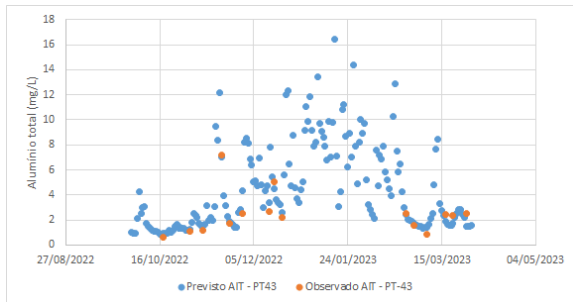


Gráfico 8.3.7 (E) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CP (PT-49).

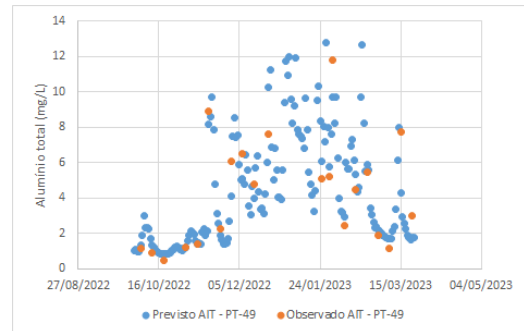


Gráfico 8.3.7 (C) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CP (PT-49).

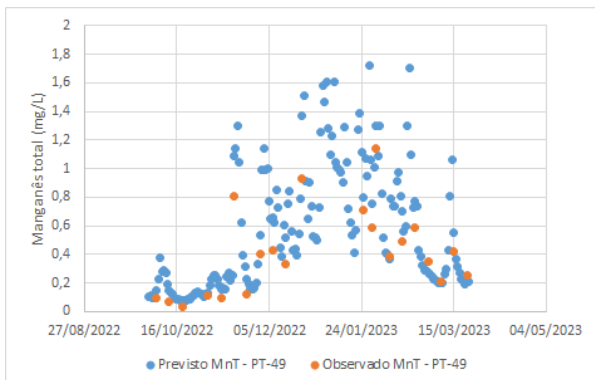


Gráfico 8.3.7 (F) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).

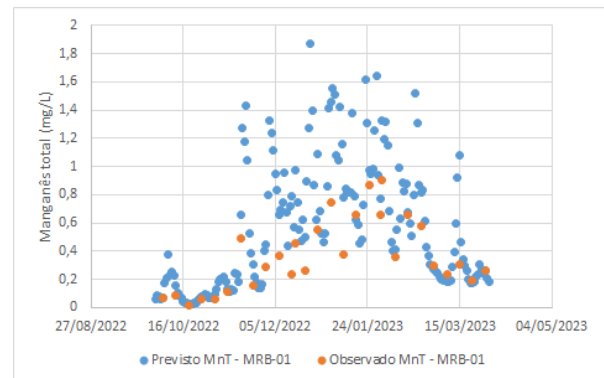


Gráfico 8.3-8 Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva 2022-2023 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear

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)

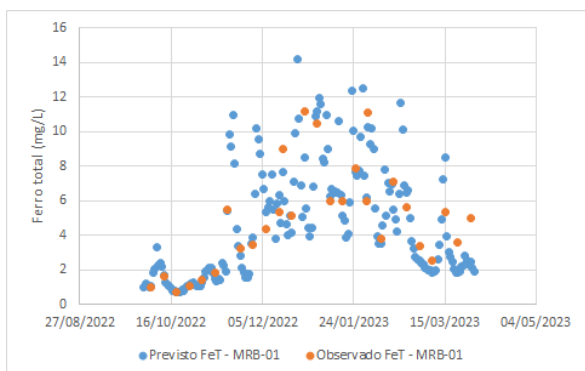


Gráfico 8.3.8 (D) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JRB-01

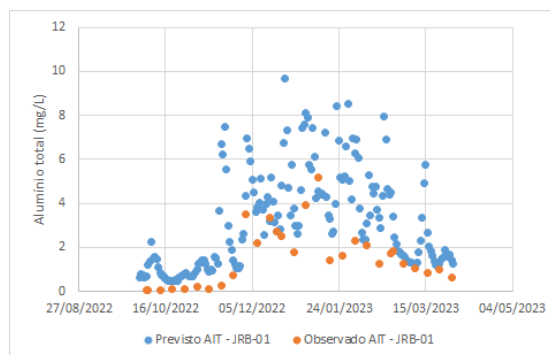


Gráfico 8.3.8 (B) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MRB-01 (PT-19)

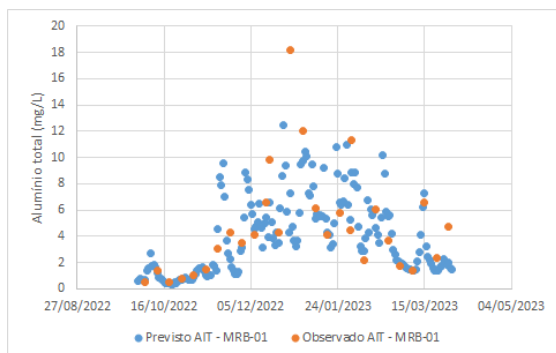


Gráfico 8.3.8 (E) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação UMF-TM-05

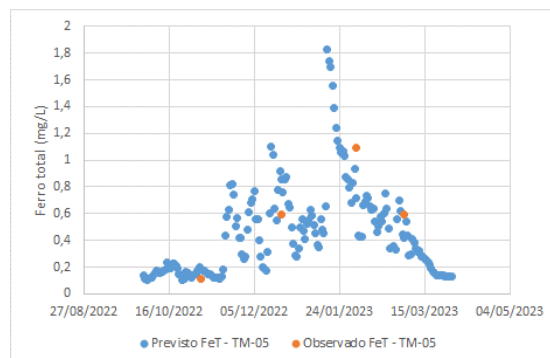


Gráfico 8.3.8 (C) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JRB-01

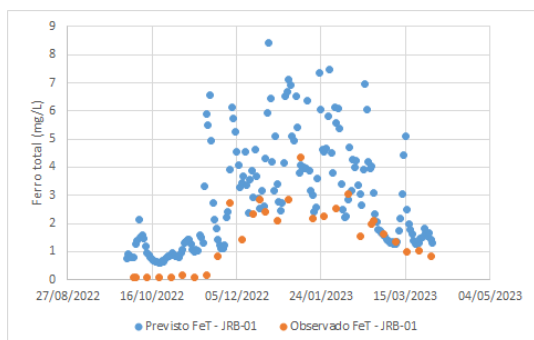
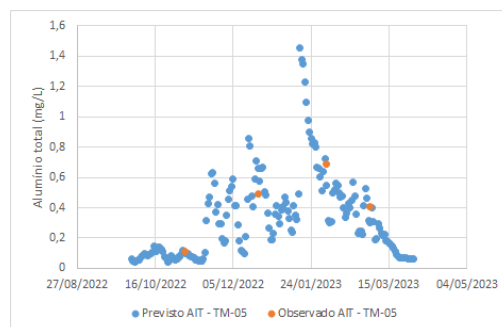


Gráfico 8.3.8 (F) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação UMF-TM-05



Para a estação AUT-MD, através do **Gráfico 8.3-5 (A, B e C)**, é possível observar comportamento aproximado entre os valores previstos e observados no ponto PT-01 para os

parâmetros Mn, Fe e Al total no período de chuva 2022-2023, indicando um bom ajuste dos dados em função dos valores de Turbidez.

É possível observar que, para a estação AUT-JD, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelo **Gráfico 8.3-5 (D, E e F)**, o parâmetro Fe total apresentou maior proximidade entre os valores previstos e observados. Para o Al e Mn totais, os resultados observados também foram próximos aos previstos, porém ao compará-los, observa-se que neste primeiro o comportamento foi mais distribuído e no segundo os resultados observados estão ligeiramente inferiores ao previsto. Outrossim, observou-se um bom ajuste dos dados nas correlações estabelecidas. É importante ressaltar que a estação AUT-MD não reportou dados entre os dias 26 e 28/11/2022, devido a uma falha na sonda de transmissão. Esse defeito foi corrigido e a referida estação voltou a reportar dados normalmente em 29/11/2022.

É possível observar que, para a estação AUT-CB, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelo **Gráfico 8.3-6 (A, B e C)**, o parâmetro Fe total apresentou maior proximidade entre os valores previstos e observados. Para o Al total, os resultados observados foram de menor magnitude que os previstos, já para o Mn total, os valores previstos apresentaram comportamento com distribuição semelhante, mas inferior aos previstos.

No **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 também apresentou um bom ajuste, alguns dos resultados previstos foram maiores que os observados em ambos os parâmetros.

Os resultados do **Gráfico 8.3-6 (F) e Gráfico 8.3-7 (A e B)** indicam que o comportamento previsto para a estação AUT-CPM_Ativa para os parâmetros Mn, Fe e Al totais foram aproximados ao encontrado nos resultados do monitoramento do ponto PT-43, mas inferiores ao previsto. Destaca-se que em diversos momentos entre dezembro, janeiro e fevereiro de 2023 não houve monitoramento por conta de condições inseguras no acesso.

Com o **Gráfico 8.3-7 (C, D e E)**, é possível observar que o modelo previsto dos parâmetros Al, Fe e Mn total com base nos dados telemétricos da estação AUT-CP é, no geral, mais semelhante para os resultados do parâmetro Fe total observados no ponto de monitoramento PT-49, do que para os outros dois referidos parâmetros. Para os três parâmetros, os resultados observados foram menores que os previstos. É importante ressaltar que, no período em estudo, a estação AUT-CP não reportou dados do dia 24/03/2023 ao dia 31/03/2023, por causa de furto do equipamento.

Os resultados apresentados pelo **Gráfico 8.3-7 (F) e Gráfico 8.3-2 (A e B)** apontam que o comportamento previsto para os parâmetros Al, Fe e Mn total foi próximo ao encontrado nos resultados do monitoramento do ponto MRB-01/PT-19.

A partir do **Gráfico 8.3-8 (C e D)**, é possível observar que o comportamento previsto para os parâmetros Al e Fe total é, em geral, de maior magnitude em relação às concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento JRB-01.

Por fim, os resultados do **Gráfico 8.3-8 (E e F)** indicam que o comportamento previsto para os parâmetros Fe e Al total foi próximo ao encontrado nos resultados do monitoramento do ponto TM-05. Destaca-se que o ponto TM-05 possui frequência mensal.

8.4. Considerações

Tendo em vista a atualização das correlações realizadas entre os dados de Turbidez das estações telemétricas e os resultados para os metais traçadores dos respectivos pontos de monitoramento próximos, é possível notar que os melhores coeficientes de determinação se dão para os parâmetros em suas frações totais, tendo em vista que a Turbidez da água está relacionada à presença de partículas em suspensão.

No geral, os valores previstos apresentados nos gráficos indicaram um bom ajuste dos dados nas correlações estabelecidas e, dentre as estações analisadas, a que obteve uma previsão mais aproximada dos resultados observados foi a estação AUT-JD para Fe total, que apresentou o comportamento mais aproximado entre os resultados previstos e observados e, em sua maioria, resultados de mesma magnitude. Em alguns casos, nota-se que os resultados previstos se apresentam superiores aos observados, o que pode ser considerado ao menos conservadores para eventuais tomadas de decisão.

Essa análise permite avaliar o uso das estações telemétricas na previsão dos resultados apresentados nos pontos de monitoramento, possibilitando a estimativa de comportamentos e alterações específicas na qualidade da água em um menor intervalo de tempo, 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.

9. Comportamento 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 chuva/2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

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 chuva, 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 IV-B**);
- 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 chuva 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. No **Anexo IV-B**, podem ser visualizados os gráficos *Boxplot* para os parâmetros analisados. No mesmo anexo, estão apresentadas também as tabelas com as métricas estatísticas utilizadas, especificamente, para a geração dos gráficos *Boxplot*.

As sub-bacias de contribuição dos tributários/afuentes 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 galgamento das barragens B4 e B4-A, até o dia 30/06/2019. Importante destacar que os afluentes selecionados 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	II	BP068	PT-05	PT-03	1A e 1B*
TT-01	Rio Betim	III	BP070	PT-14	PT-48	1B
TT-05	Ribeirão das Abóboras	II	BP072	PT-53	PT-54	2
CE-01	Ribeirão dos Gomes/das Almas	I	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 (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).

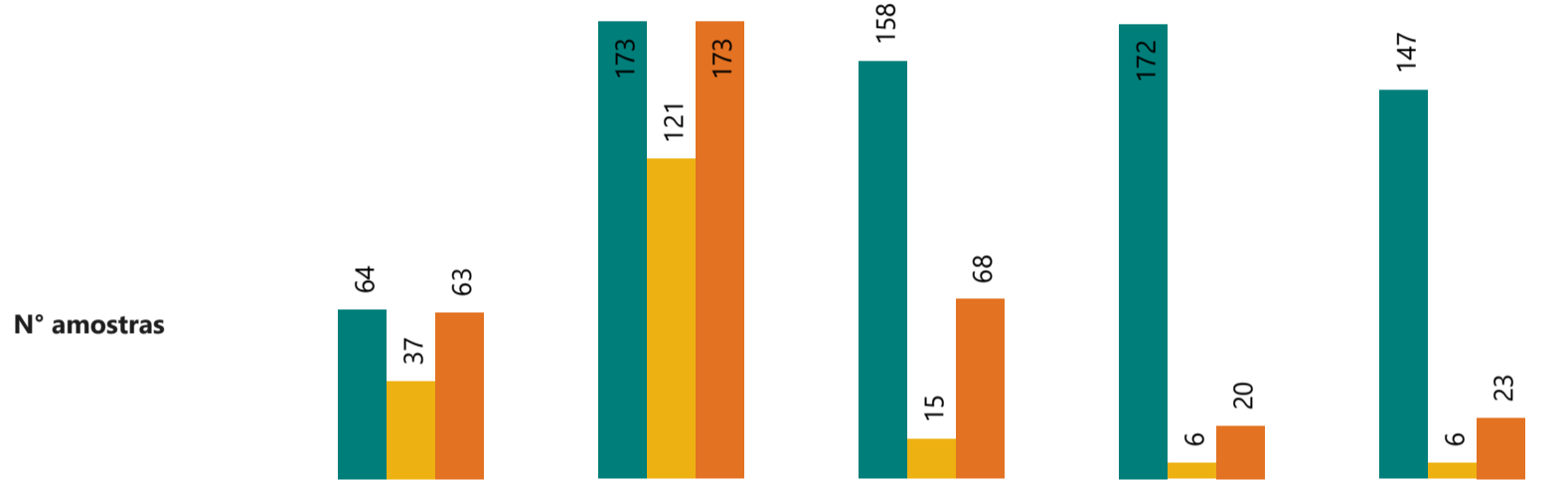
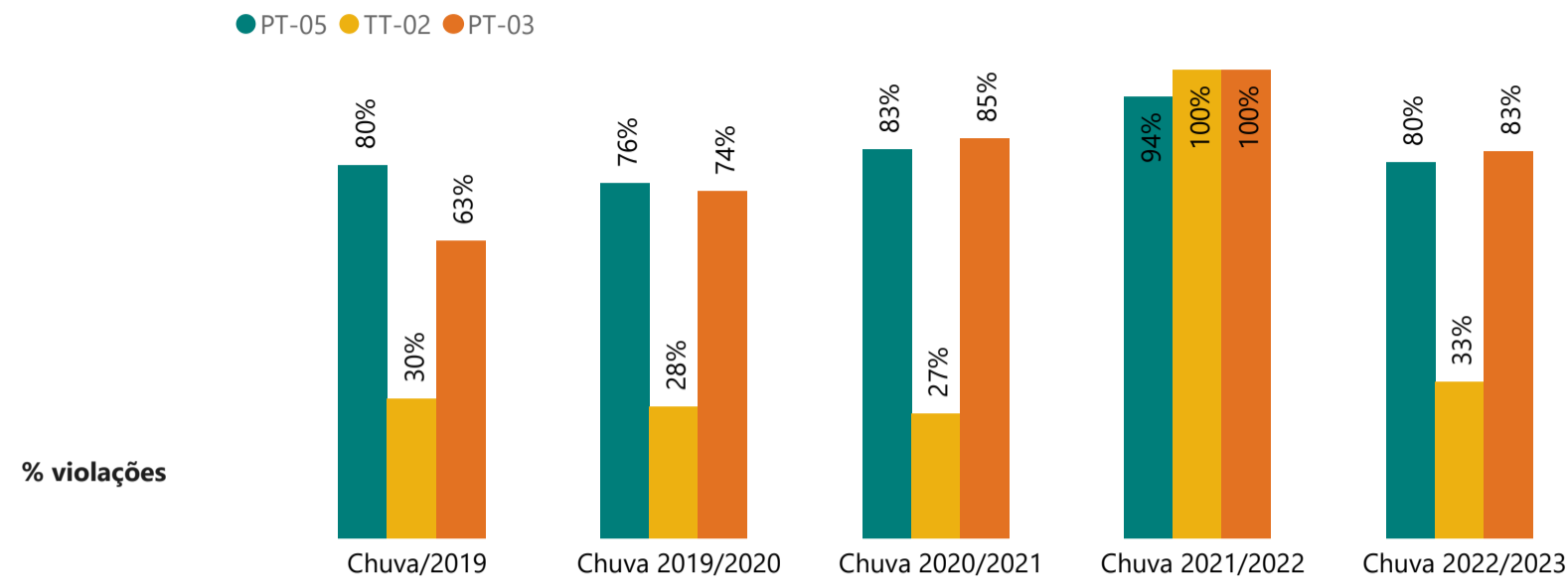
No **Gráfico 9.3.1-1**, podem ser observados os percentuais de violação dos parâmetros analisados para os períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba. Para o período atual, chuva 2022/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, Nitrogênio Amoniacal, Oxigênio dissolvido, Fósforo total e Chumbo total. Contudo, dentre os parâmetros supracitados, a porcentagem maior de violação no tributário em comparação com os pontos de montante e jusante foram verificadas para Fósforo total (montante: 59%, tributário: 83%, jusante: 65%) e Oxigênio dissolvido (montante: 6%, tributário: 17%, jusante: 10%). Ainda, destaca-se Manganês total, parâmetro cujas violações ocorreram em 100% das amostras coletadas no tributário e no ponto de jusante e em 98% no ponto de montante.

Em termos da evolução temporal, percebe-se comportamentos similares para os parâmetros Alumínio e Ferro, em suas frações dissolvidas, com percentuais de desvios inferiores no tributário em relação aos demais pontos nas chuvas de 2019/2020 e 2020/2021, elevação e semelhança de violações, próximas ou iguais a 100% em todos os pontos no período chuvoso de 2021/2023 e, posteriormente, redução dos desvios no tributário na chuva 2022/2023. Em relação ao Manganês total, o comportamento permanece estável com o passar dos períodos chuvosos, com desvios de 98 ou 100% em todos os pontos.

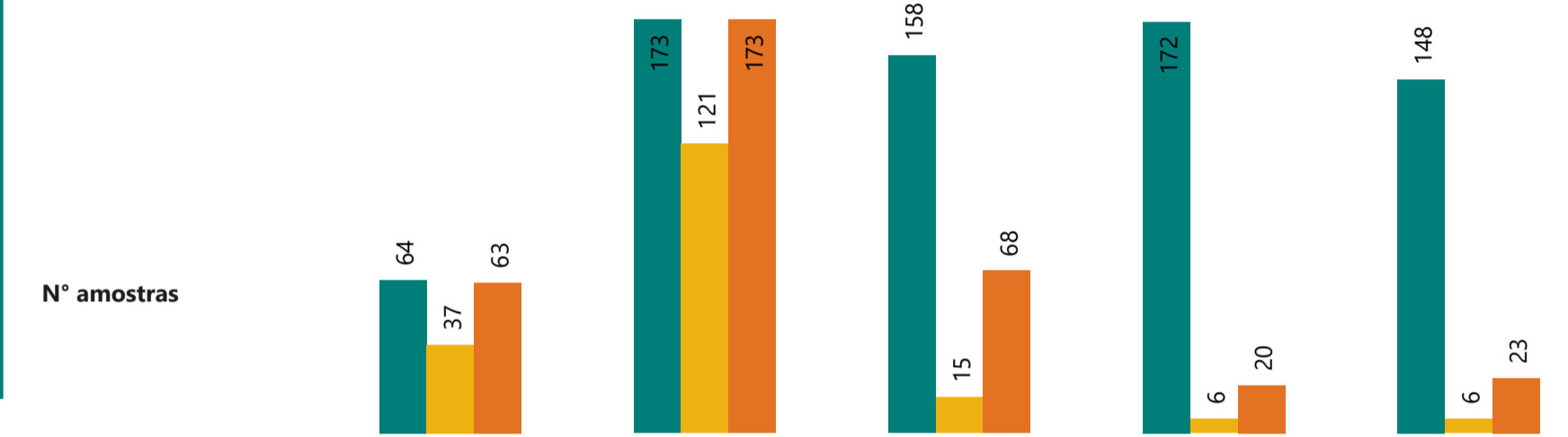
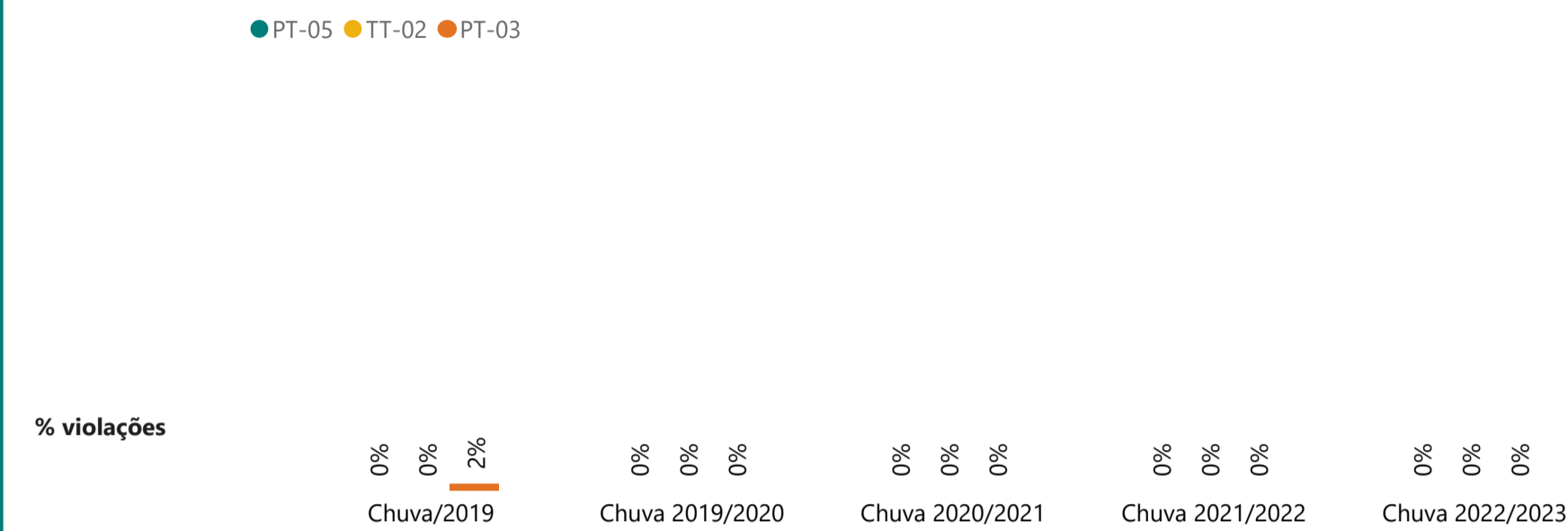
Gráfico 9.3.1-1 Percentuais de violações nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

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

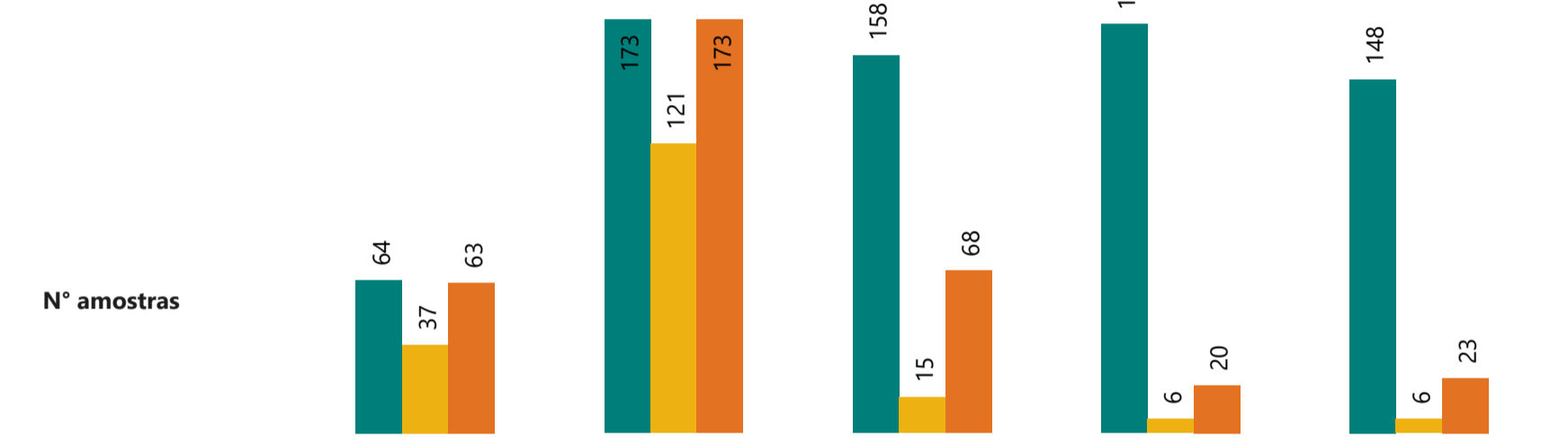
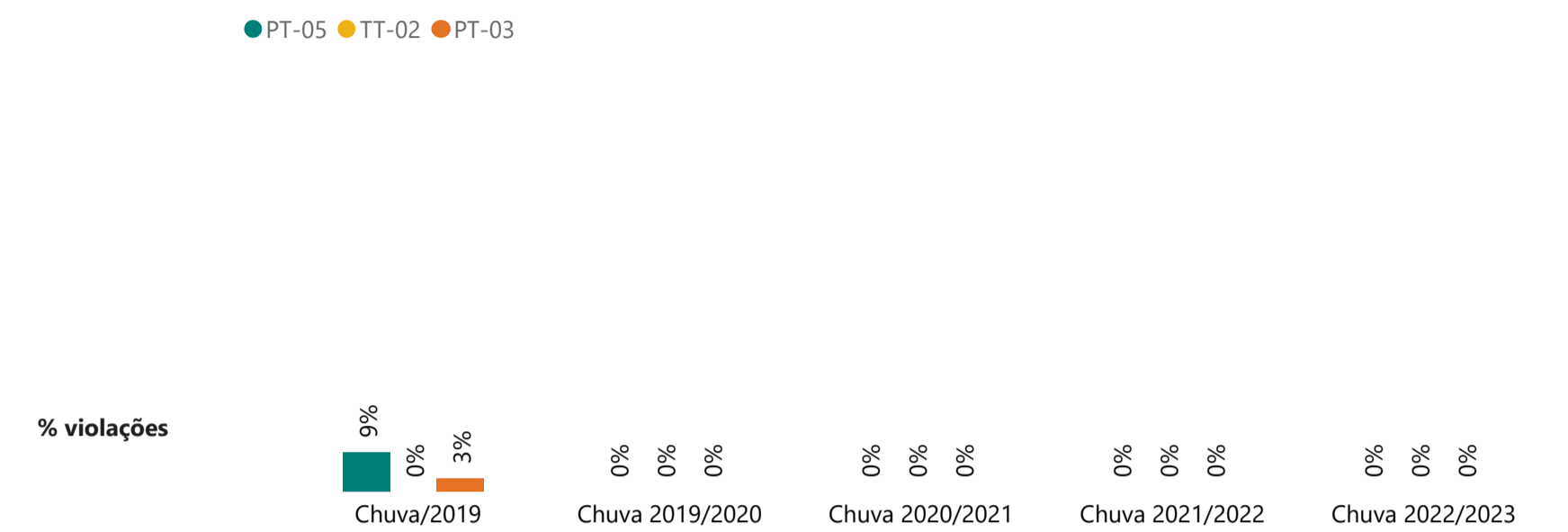
Parâmetro
Alumínio Dissolvido



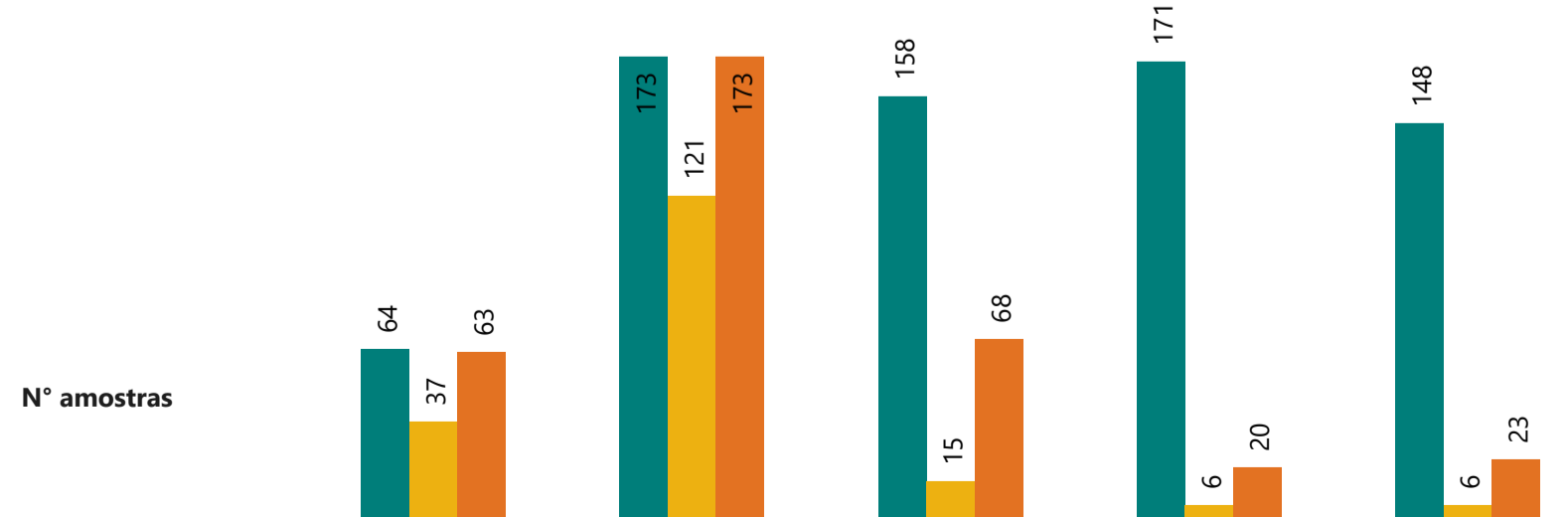
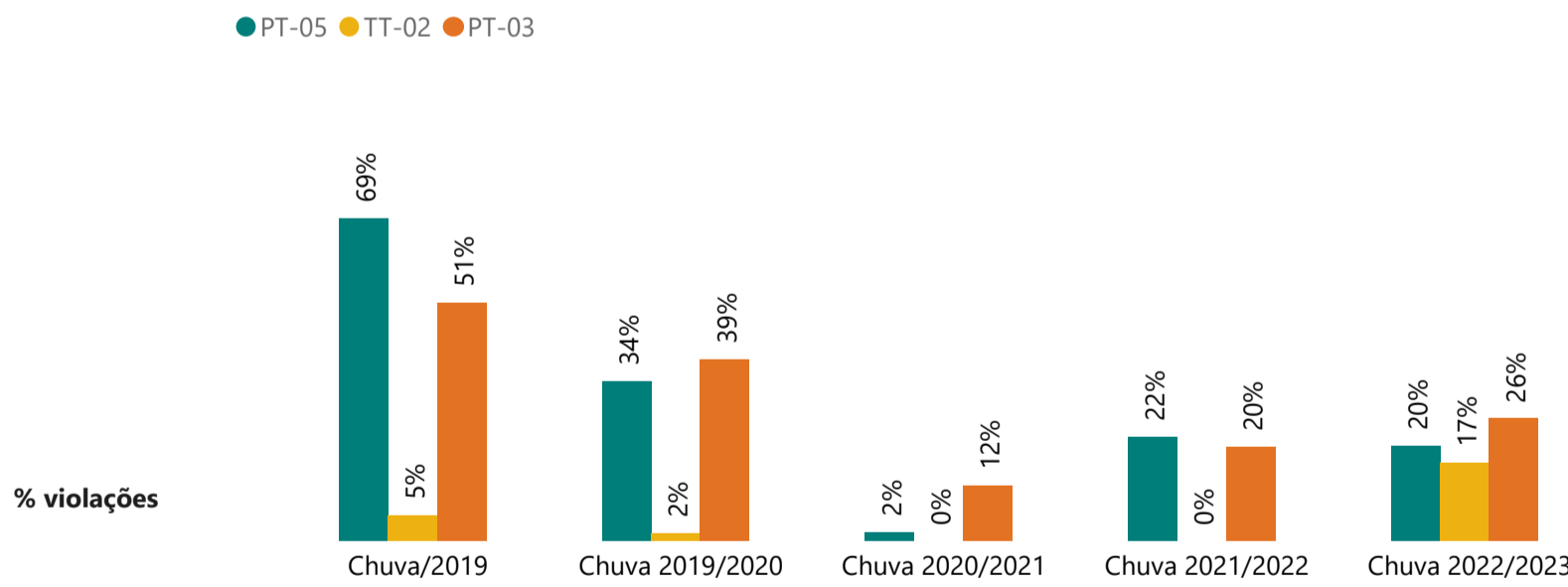
Parâmetro
Arsênio Total



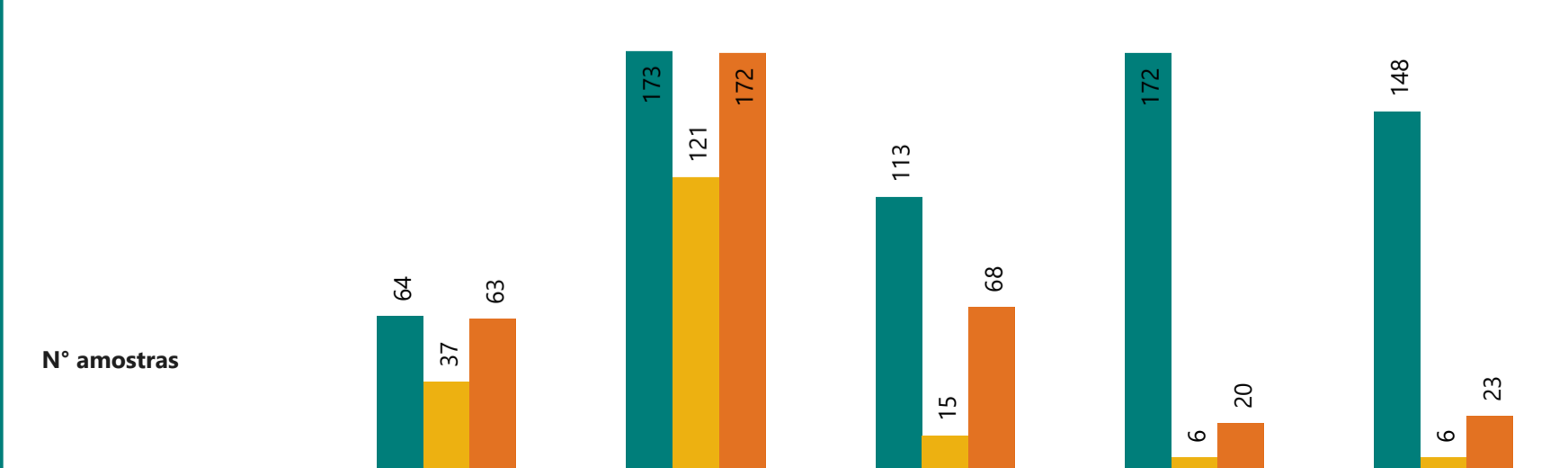
Parâmetro
Cádmio Total



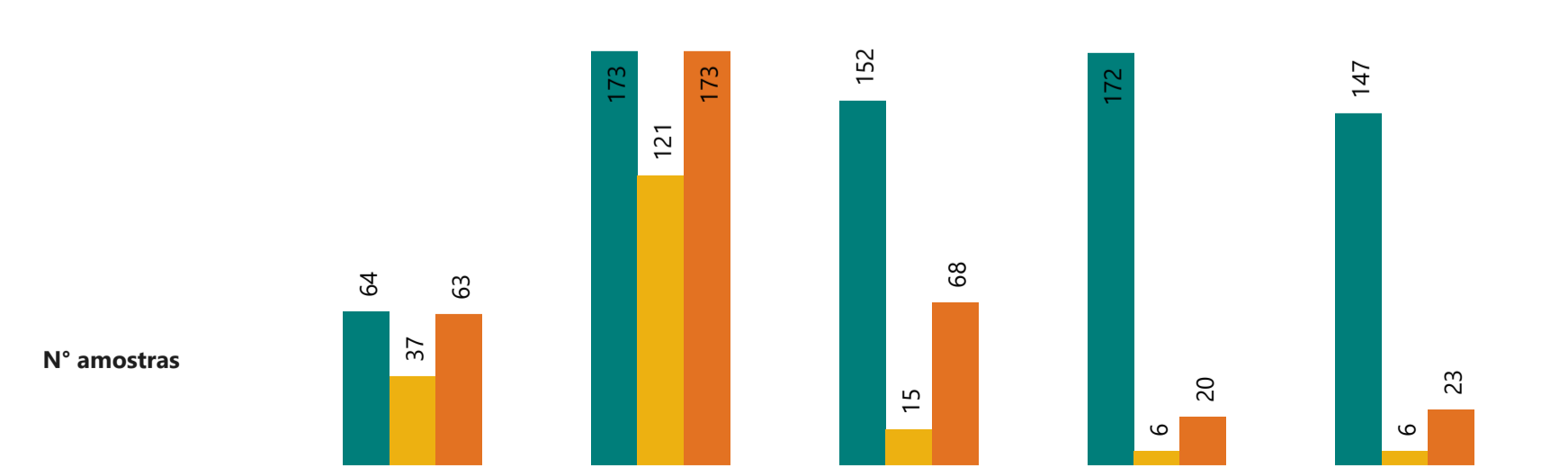
Parâmetro
Chumbo Total



Parâmetro
Cobalto Total



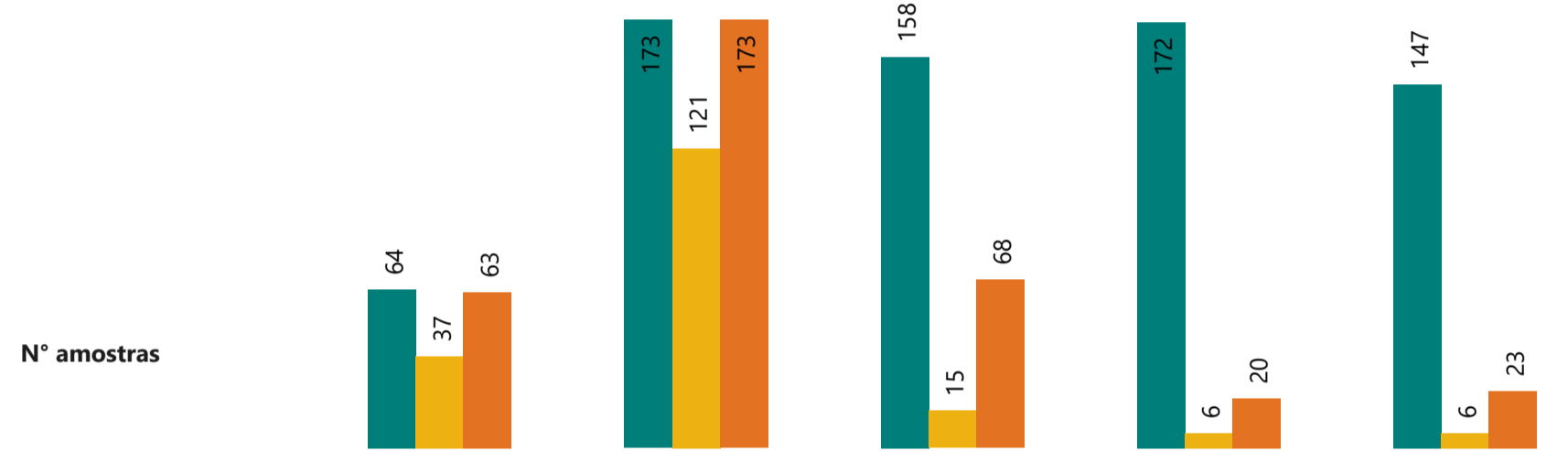
Parâmetro
Cobre Dissolvido



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

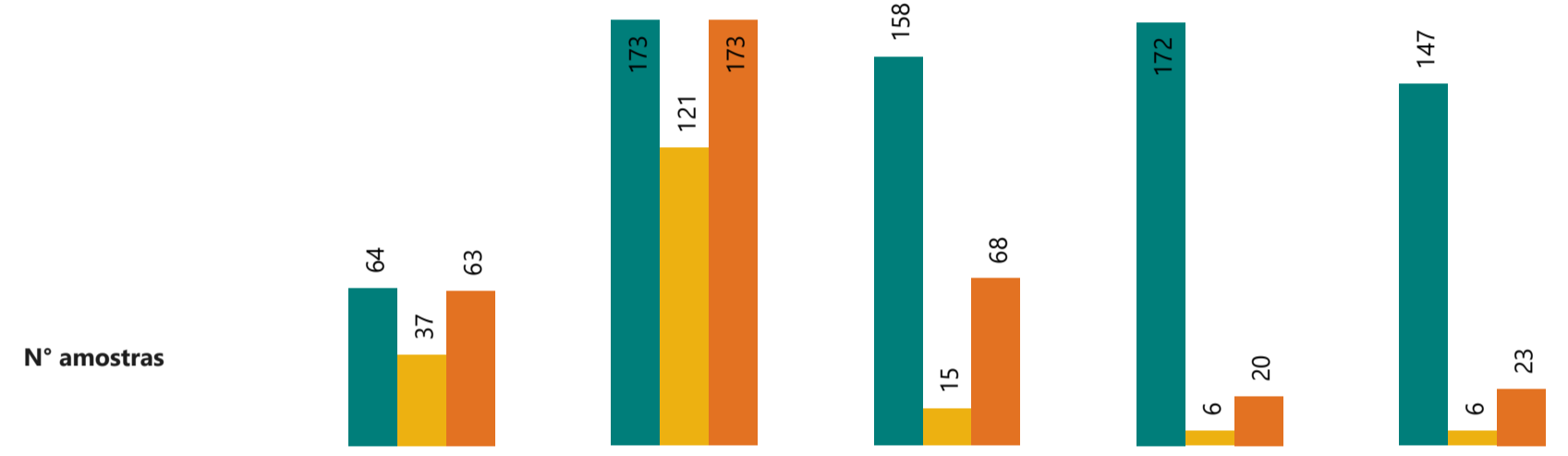
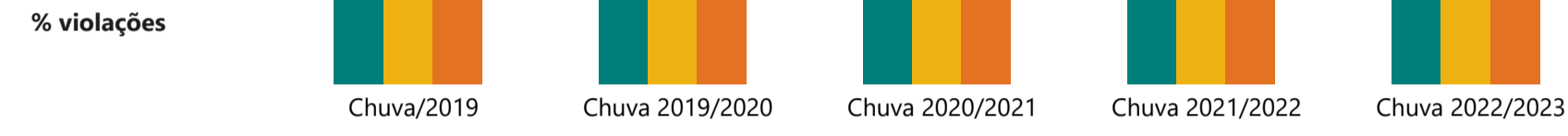
Parâmetro
Cromo Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03



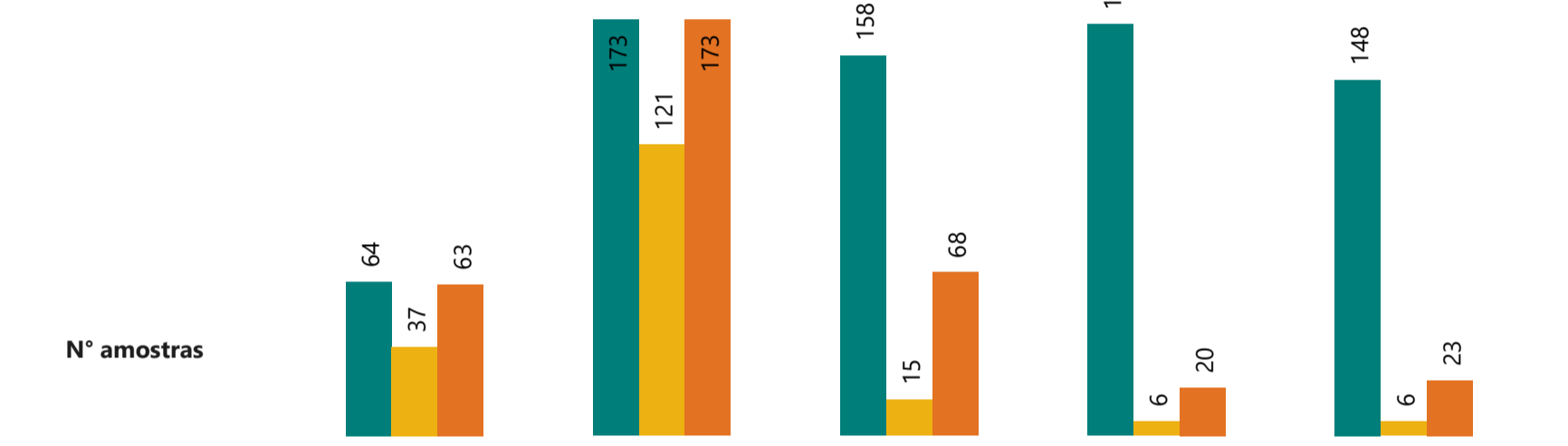
Parâmetro
Ferro Dissolvido

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03



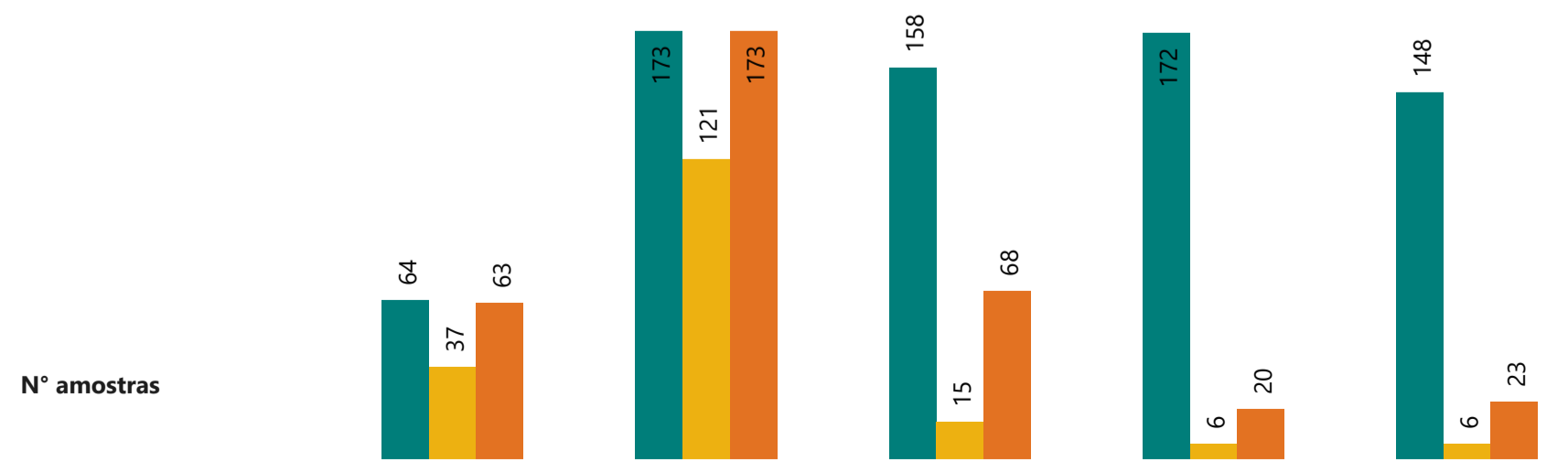
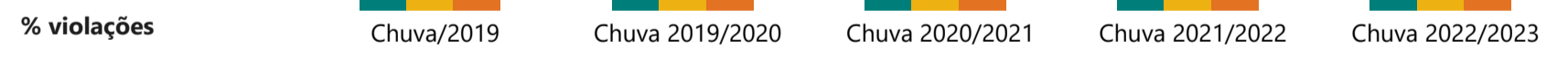
Parâmetro
Fósforo Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03



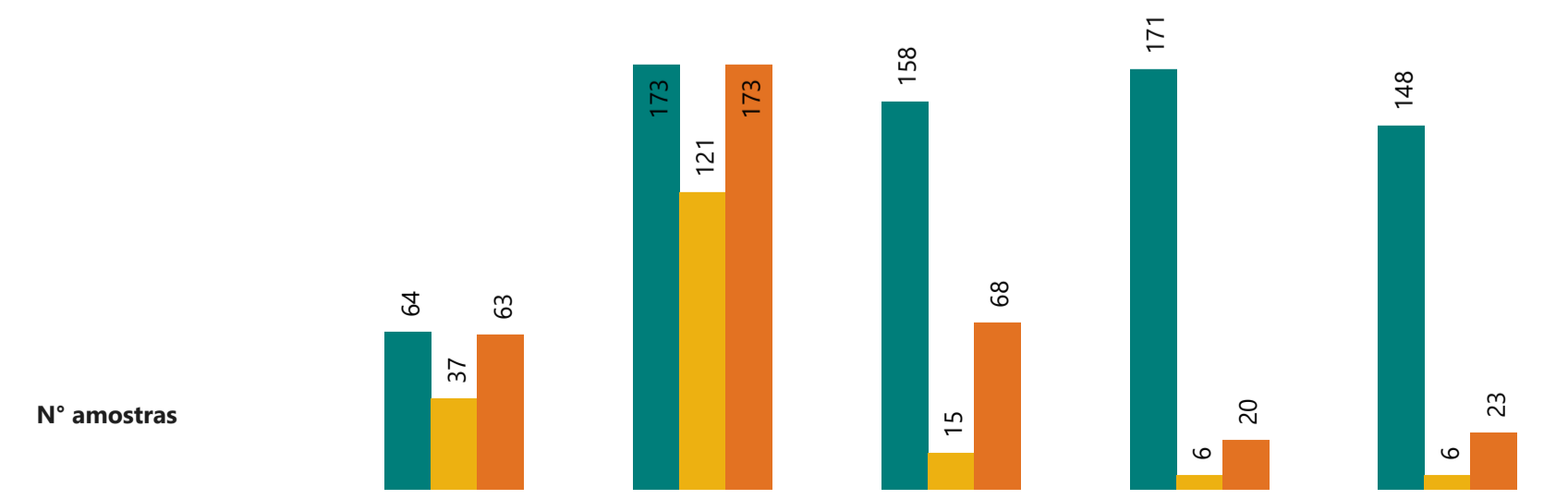
Parâmetro
Manganês Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03



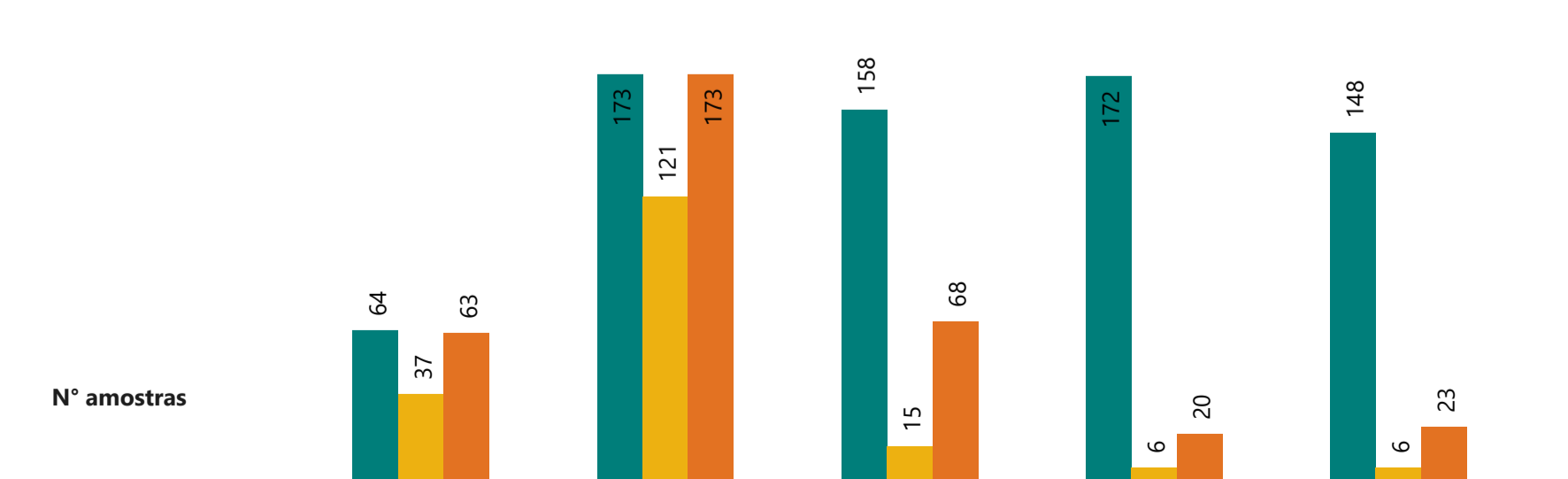
Parâmetro
Mercúrio Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03

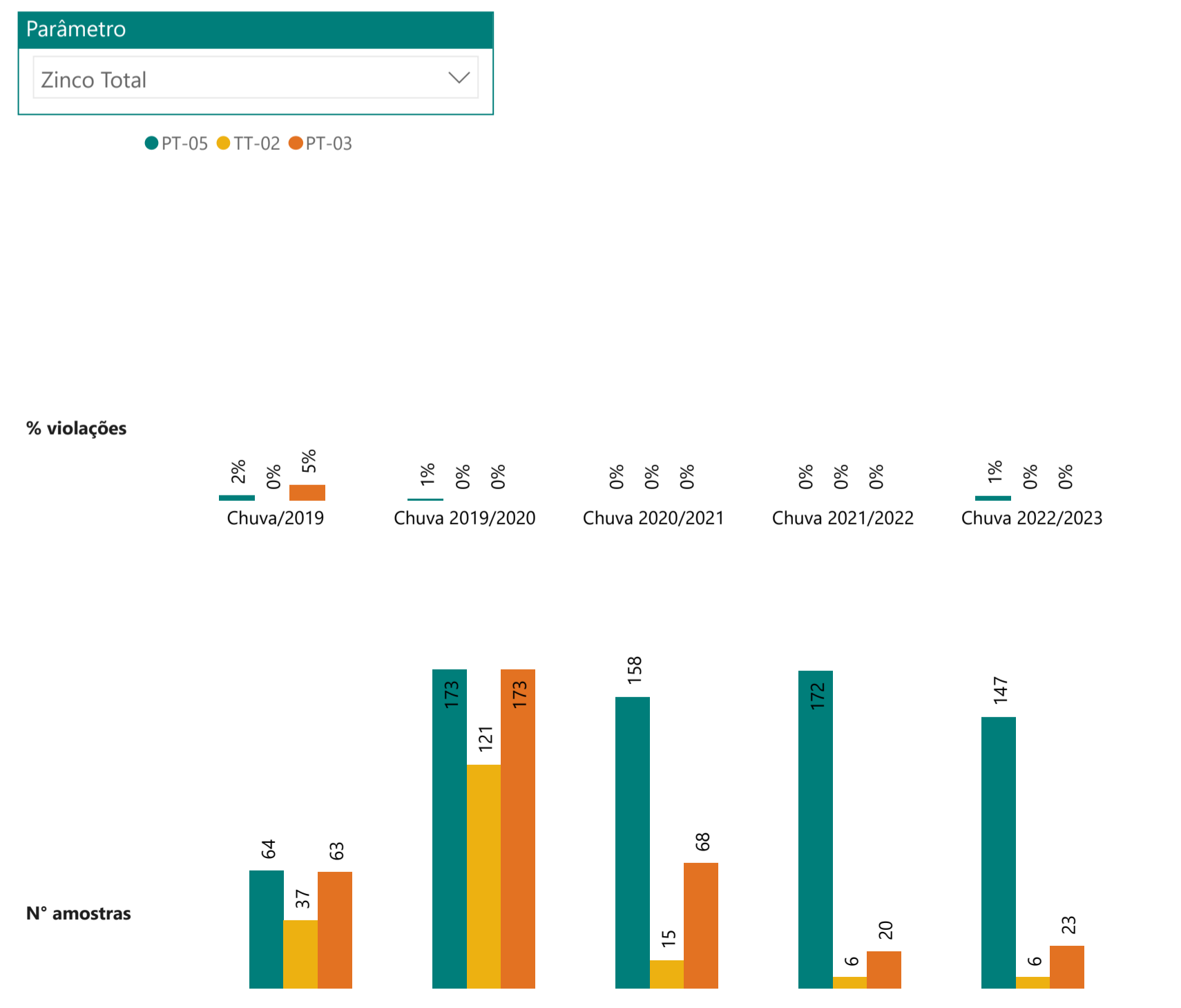
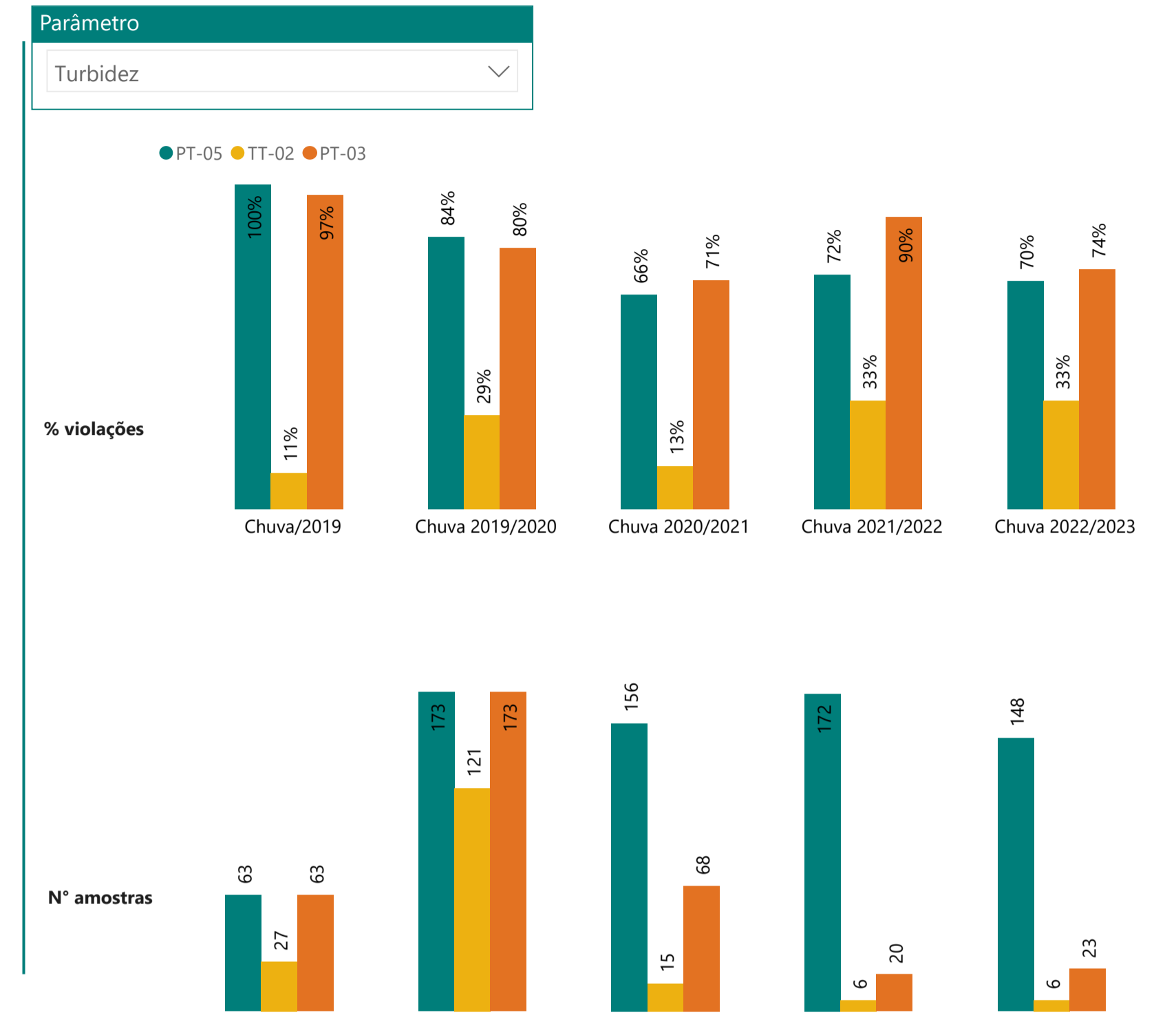
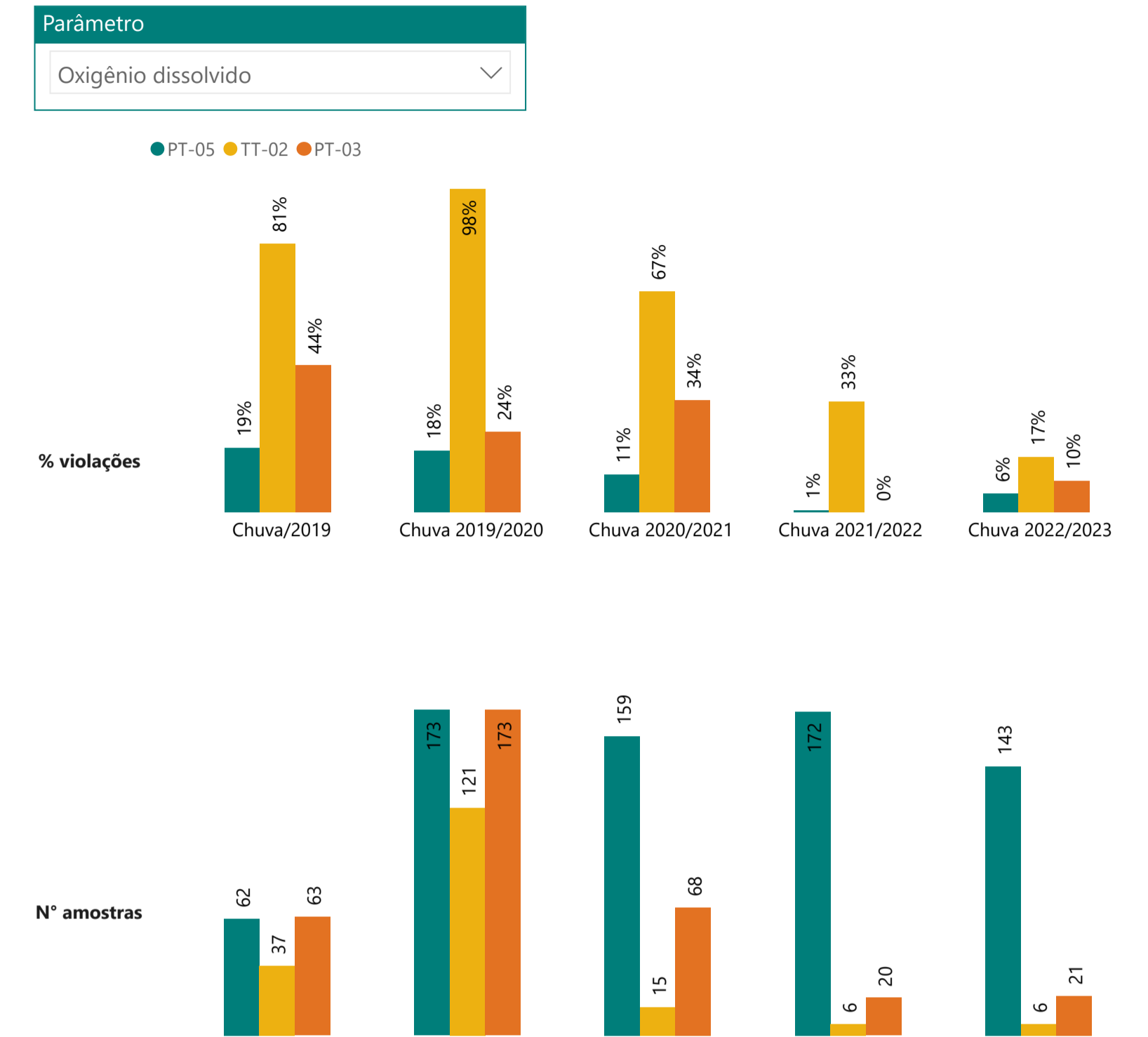
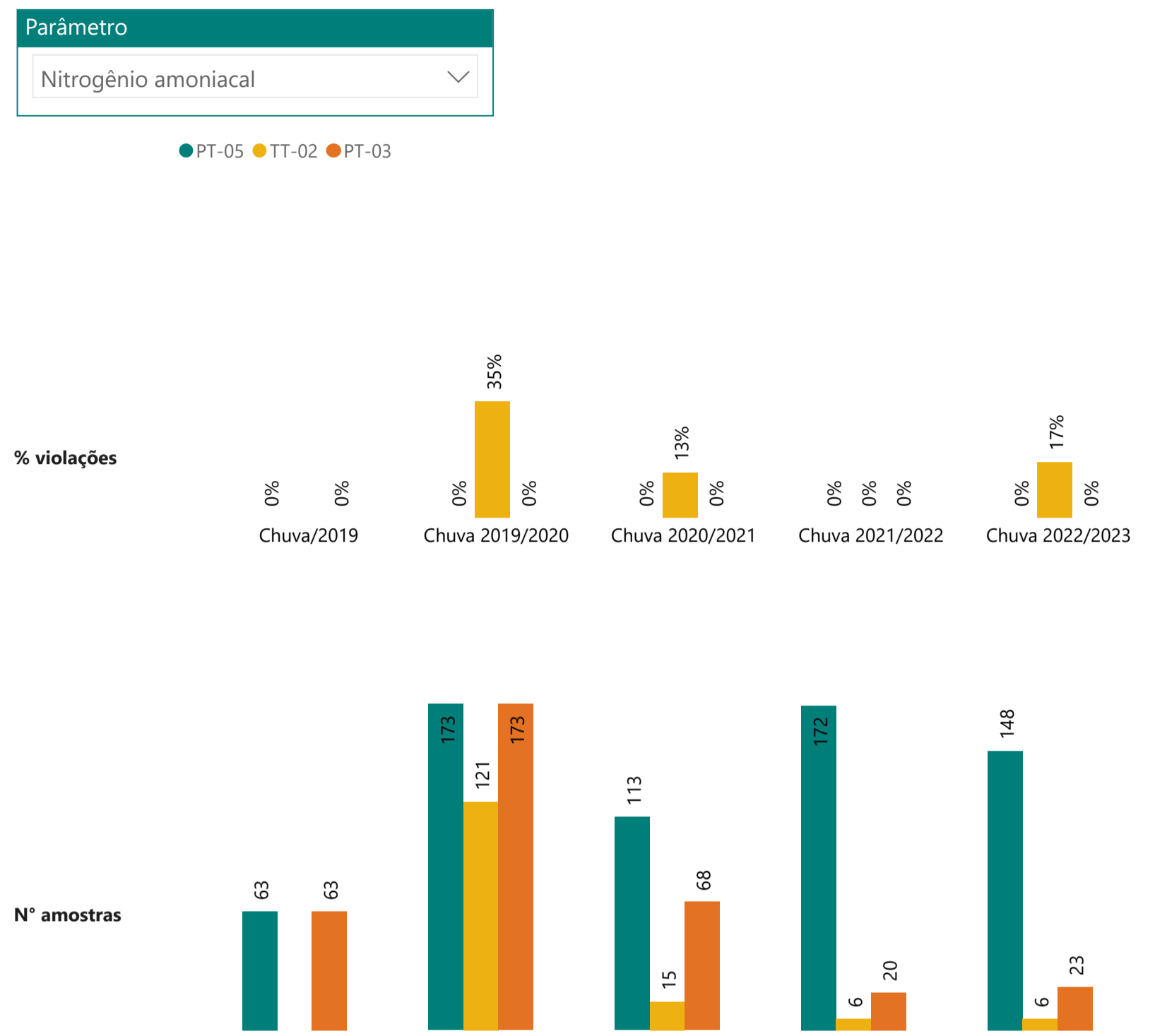




Parâmetro
Níquel Total

● PT-05 ● TT-02 ● PT-03



% 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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3	Folha 182 / 373
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	



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 chuva 2019 (janeiro a março), chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT- 05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba. No **Anexo IV-B** podem ser consultados os gráficos para os demais parâmetros e tabelas de apoio com os resultados das diferentes métricas pelas quais os *Boxplots* são gerados.

De modo geral, nos períodos chuvosos a variabilidade das concentrações dos parâmetros tende a ser maior que nos períodos de estiagem. Isso por que a energia hidráulica resultante dos períodos chuvosos e a conseqüente elevação das vazões/escoamento superficial são forças propulsoras que favorecem arraste e ressuspensão de materiais acomodados no leito do rio Paraopeba e/ou carregados difusamente das áreas de contribuição adjacentes, com conseqüente aumento dos teores.

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 chuva monitorados, as concentrações foram pouco variáveis no tributário ribeirão Sarzedo durante os primeiros ciclos chuvosos (2019, 2019/2020 e 2020/2021), com maior incremento no período de chuva 2021/2022, no qual 100% dos resultados ultrapassaram o VMP (0,1 mg/L). Para o período de referência (chuva 2022/2023) os valores, de modo geral, tornaram a reduzir, atingindo mediana próxima às observadas nos períodos chuvosos de 2019 e 2019/2020. 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.

Para Manganês total, notou-se que os teores medianos no tributário foram similares ao longo dos períodos de chuva de 2019 a 2020/2021, com ligeiro aumento da mediana no ciclo chuvoso de 2021/2022 e voltando a reduzir no ciclo atual (chuva 2022/2023). Ressalta-se que todos os resultados ficaram acima do VMP (0,1 mg/L), ainda que, se comparados aos demais pontos analisados, incluindo o *baseline*, as medianas no TT-02 tenham ficado próximas ou inferiores àquelas observadas no PT-03, PT-05 e BP068. Já nos pontos do rio Paraopeba, notou-se decréscimo das concentrações deste analito entre as chuvas de 2019, 2019/2020 e 2020/2021, seguida de ligeira elevação em 2021/2022 e posterior redução em 2022/2023. Nesses pontos a

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 183 / 373

maior parte dos resultados também ultrapassaram o VMP e, com medianas acima das observadas no *baseline*.

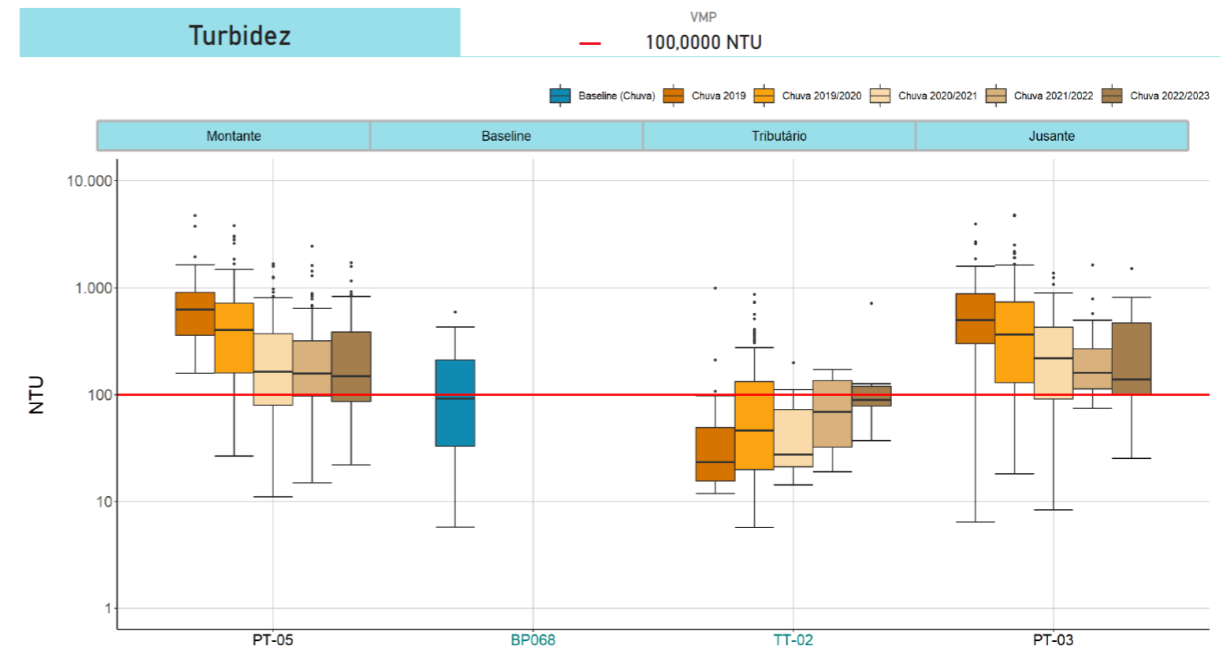
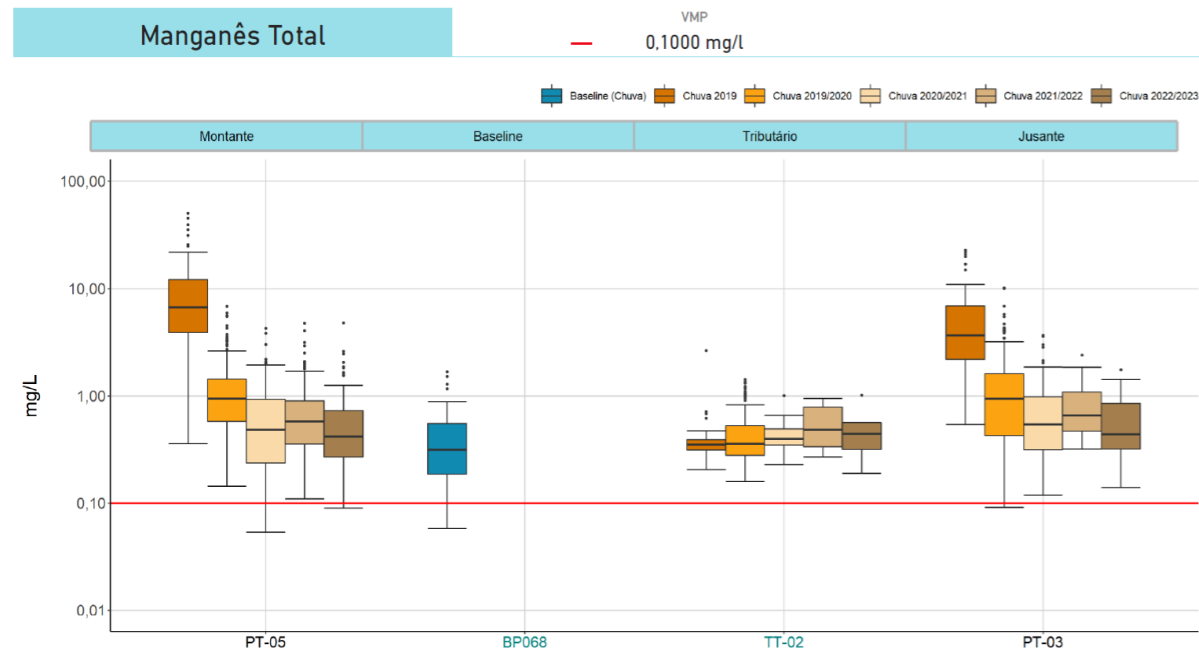
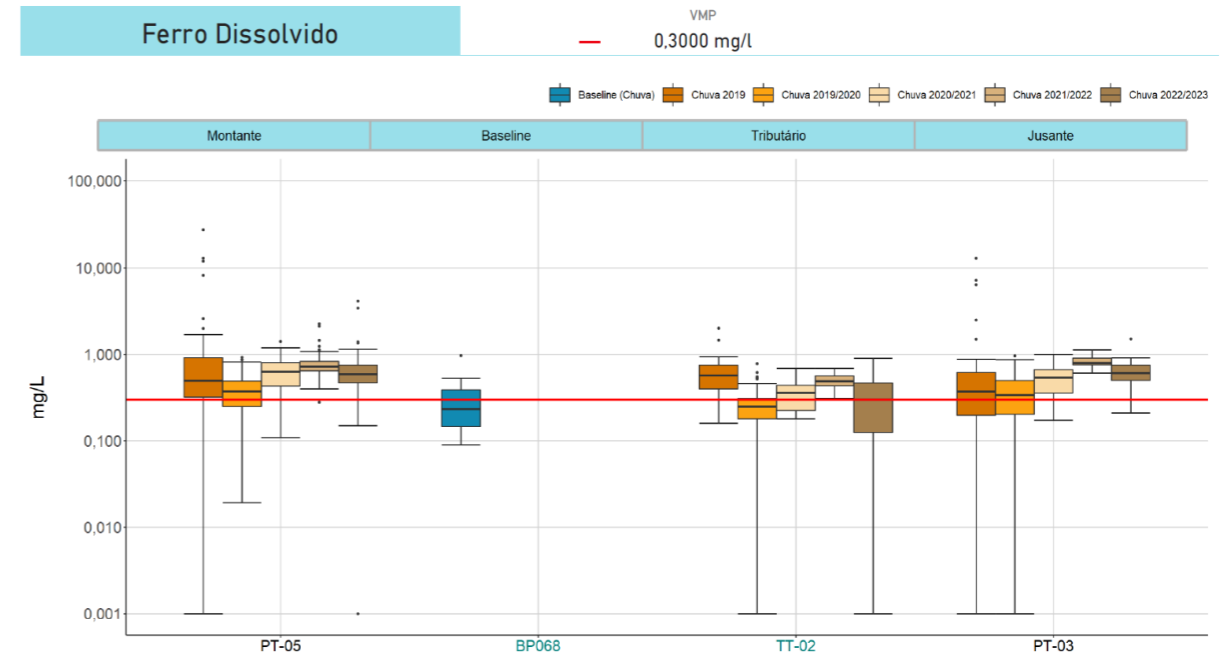
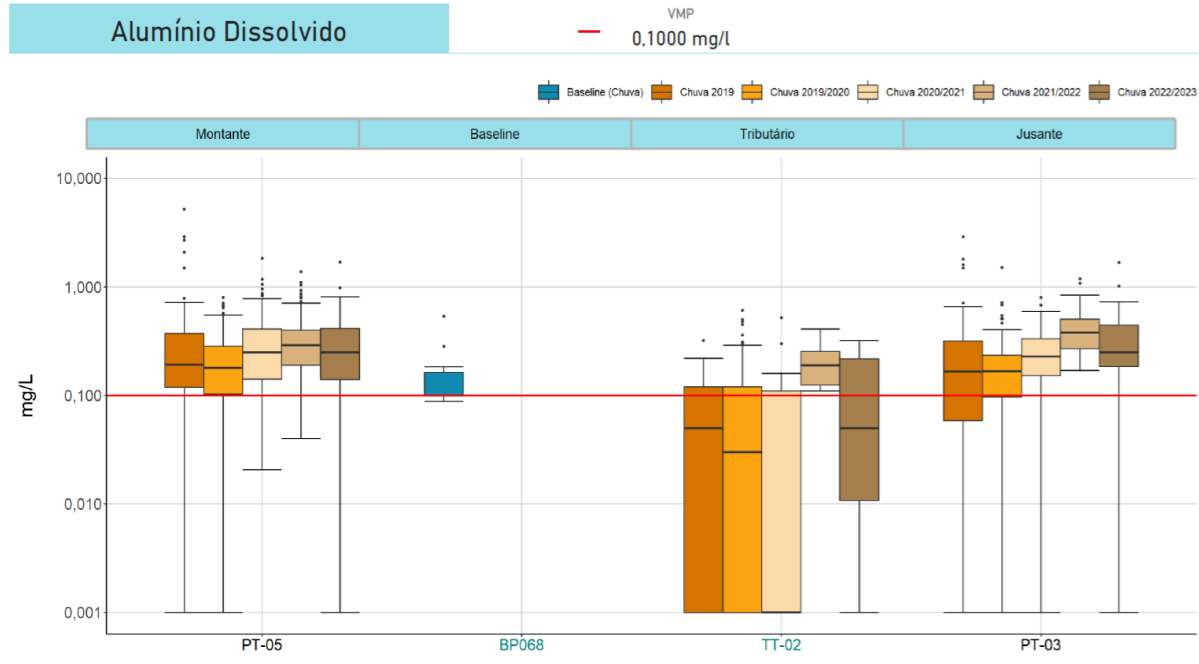
Já para Ferro dissolvido, os resultados apresentaram-se mais próximos entre os pontos de montante, tributário e jusante, bem como entre os diferentes períodos de chuva comparados. Comparando a chuva 2021/2022 com a chuva 2022/2023, percebe-se aumento na dispersão dos resultados tanto no ribeirão Sarzedo, com variação mais evidente, como nos pontos de montante e jusante à confluência com o rio Paraopeba. Em todos os casos, a maior parte dos resultados foram superiores ao VMP (0,3 mg/L) e ao *baseline* de chuva, principalmente analisando a variação das medianas.

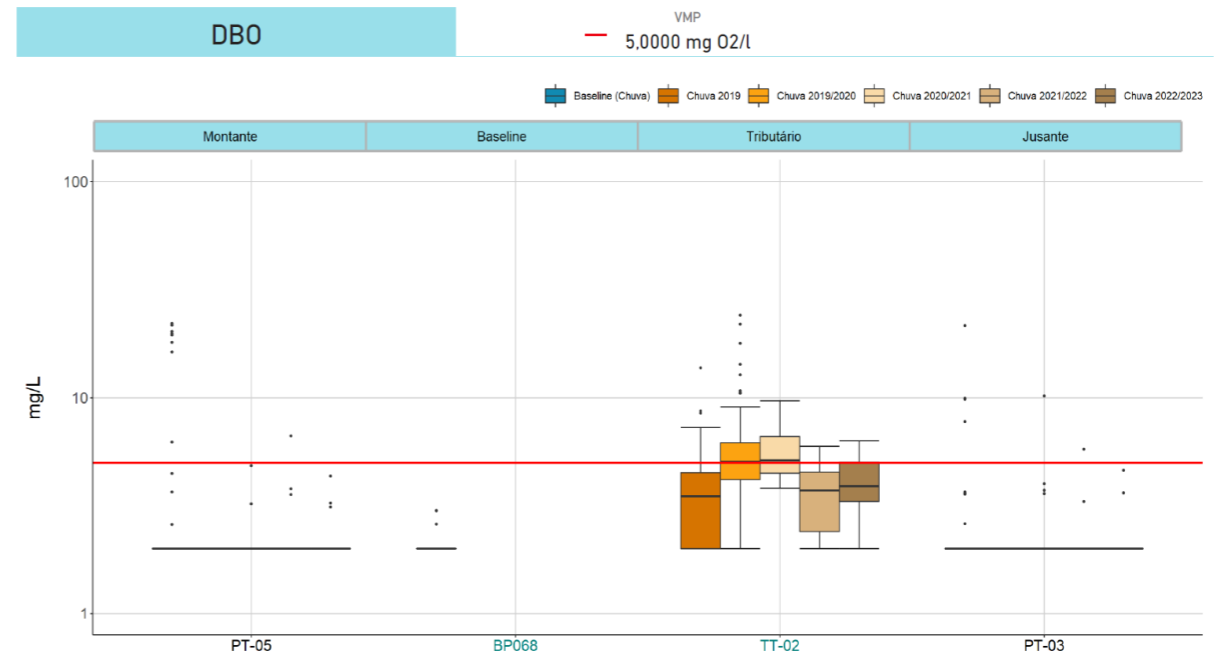
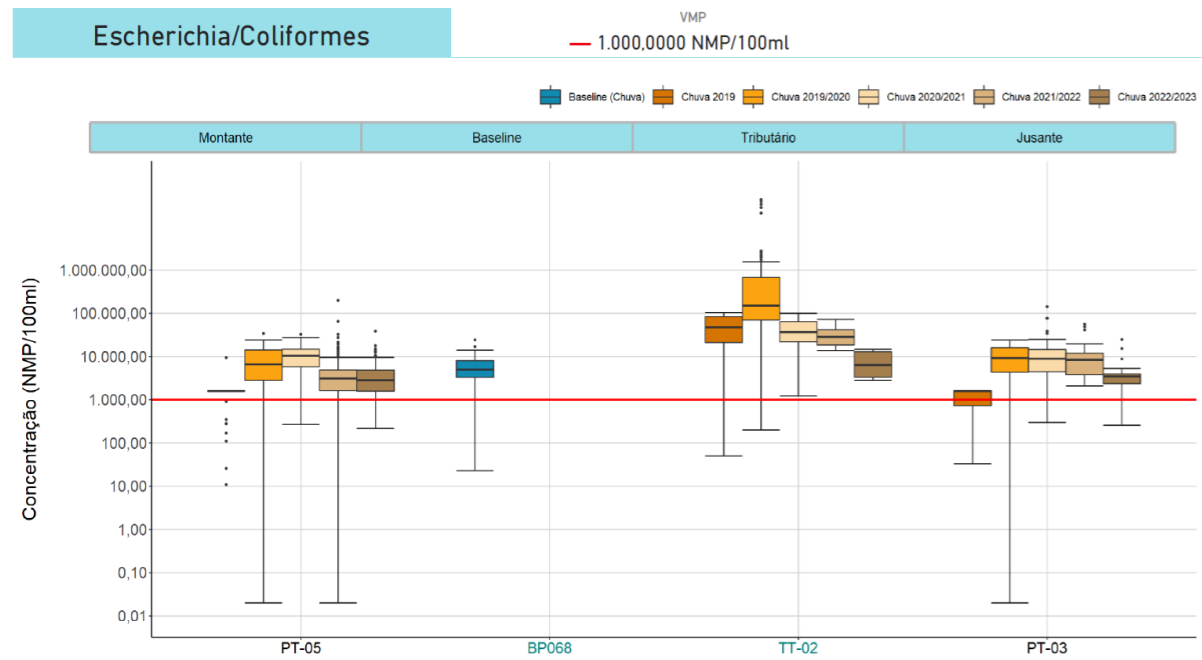
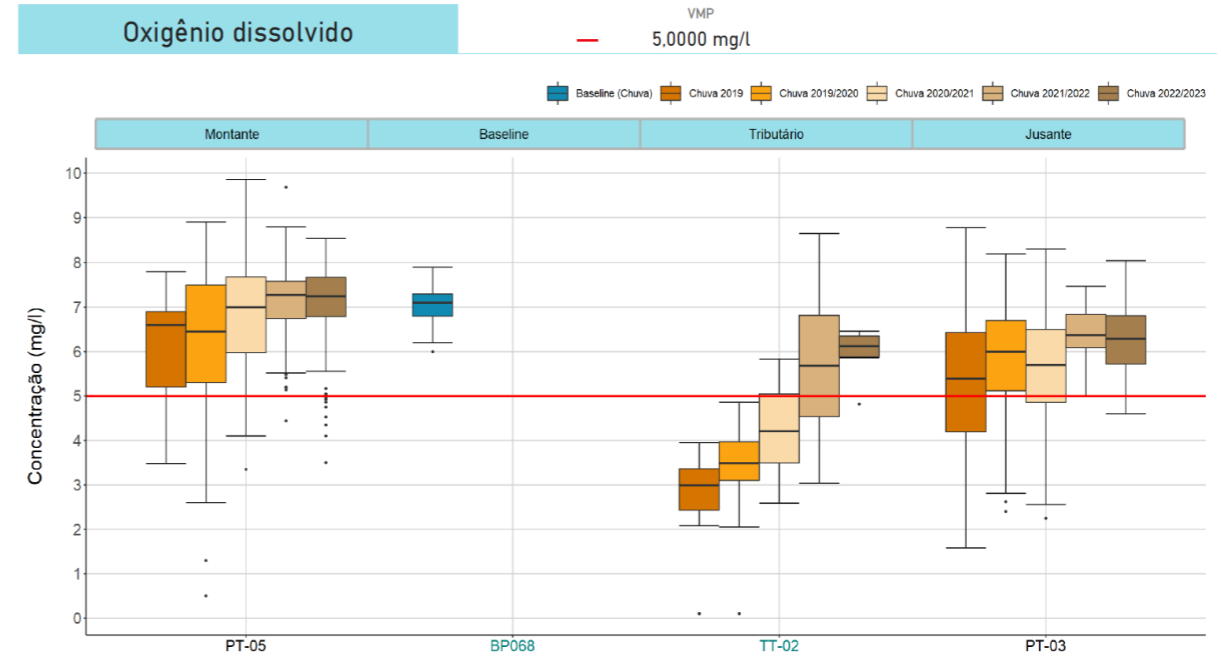
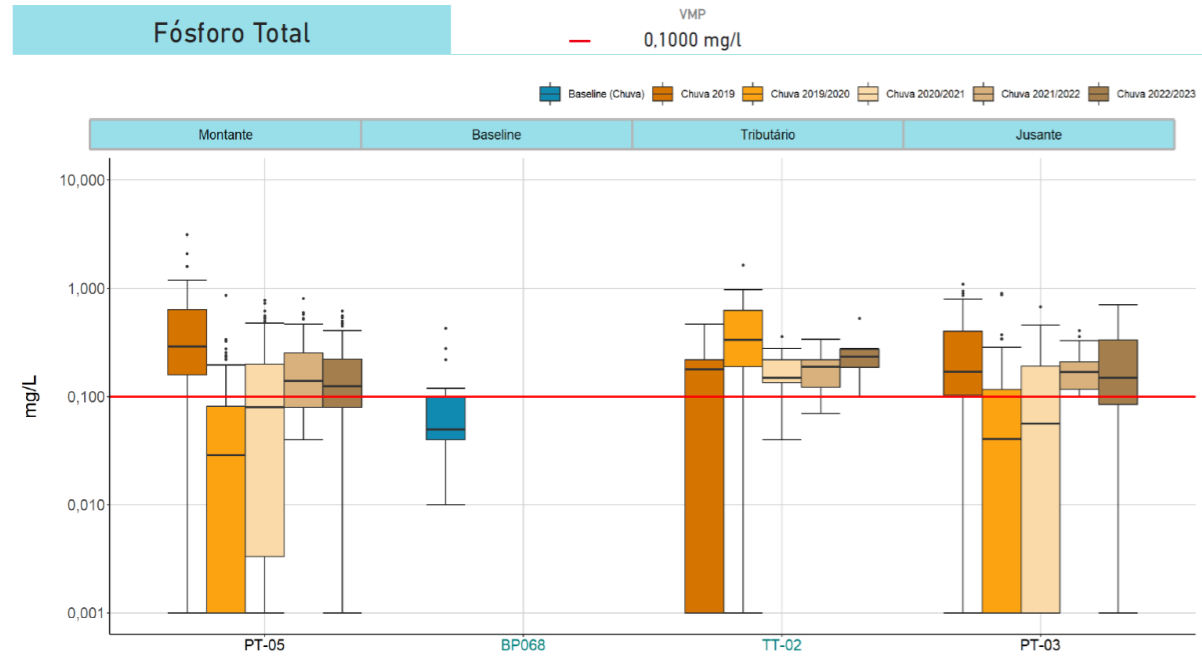
Para Turbidez, no TT-02, os teores de Turbidez oscilaram entre os diferentes períodos, mas permaneceram inferiores aos registrados nos pontos de montante e jusante, bem como na condição do *baseline* de chuva. Além disso, com exceção de alguns valores, os resultados nesse ponto e nos cinco períodos chuvosos analisados permaneceram abaixo do VMP (100 NTU). Nos pontos localizados no rio Paraopeba, os valores tiveram comportamento semelhante ao Manganês total, com decréscimo das medianas, principalmente nos primeiros ciclos de chuva (2019, 2019/2020 e 2020/2021) e se mantendo próximas a partir de então.

Para Fósforo total, destaca-se medianas próximas ou mais elevadas no tributário em todos os períodos se comparadas àquelas registradas nos pontos de montante e jusante da confluência. 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. Nota-se também comportamento oposto ao observado nos pontos localizados no rio Paraopeba. No TT-02 a mediana apresentou um pico de aumento de 2019 para 2019/2020 e voltou a reduzir no ciclo seguinte, mantendo-se próximas desde então, ainda que levemente superior no ciclo de 2022/2023. Nos PT-03 e PT-05 a mediana sofreu um decréscimo de 2019 para 2019/2020 e voltou a subir no ciclo seguinte, mantendo-se próximas desde então, ainda que levemente inferior no ciclo de 2022/2023.

Situação semelhante foi identificada para os parâmetros sanitários *E.coli*/Coliformes Termotolerantes e DBO, com resultados mais elevados e, em geral, acima dos respectivos VMPs e *baselines* no ponto TT-02 se comparado aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba. Dentre os anos analisados, percebe-se um aumento nos valores de 2019 para 2019/2020, com seguinte decréscimo nos anos posteriores (mais intenso para *E.coli*/Coliformes Termotolerantes). Desse modo as medianas observadas no ciclo de referência foram inferiores e próximas às observadas no ciclo anterior. Do mesmo modo, as concentrações de Oxigênio dissolvido foram inferiores no tributário e tal condição ressalta a poluição orgânica presente no ribeirão Sarzedo. No entanto, ressalta-se que os valores medidos sofreram elevações ao longo dos períodos chuvosos, alcançando medianas próximas àquelas observadas nos demais pontos de monitoramento analisados.

Gráfico 9.3.1-2 Boxplots - TT02





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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

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



PT-05 (Mont.) X PT-03 (Jus.)	Chuv. 2019	Chuv. 2019/2020	Chuv. 2020/2021	Chuv. 2021/2022	Chuv. 2022/2023
Manganês Total	0,002	0,668	0,226	0,112	0,378
Ferro Dissolvido	0,012	0,182	0,008	0,005	0,925
Alumínio Dissolvido	0,143	0,142	0,410	0,019	0,581
Turbidez	0,329	0,372	0,365	0,562	0,681
Fósforo Total	0,008	0,113	0,229	0,215	0,387
DBO	0,512	1,000	0,129	0,030	0,071
EColi / ColiTermot.	0,143	0,008	0,383	0,000	0,549
Nitrogênio Amoniacal	0,013	0,000	0,816	0,000	0,012
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
Sólidos Suspensos T.	0,001	0,802	0,330	0,164	0,748

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 chuvosos analisados, o período em que foram notadas diferenças significativas com maior frequência foi o de 2021/2022, principalmente levando em consideração os parâmetros de cunho sanitário. Apenas Nitrogênio amoniacal e Oxigênio dissolvido tiveram diferenças significativas no ciclo mais recente (chuva 2022/2023) e indicam maior possibilidade de interferência do tributário ribeirão Sarzedo na qualidade do rio Paraopeba.

Em termos de metais majoritários, Manganês total e Alumínio dissolvido obtiveram diferenças significativas apenas em dois períodos de chuva distintos, chuva/2019 e chuva 2021/2022, respectivamente. Já o Ferro dissolvido tem apresentado com diferenças entre as concentrações do ponto de montante e de jusante ocorreu nos períodos chuvosos 2019, 2020/2021 e 2021/2022. Para o período de chuvas 2022/2023, não se constatarem diferenças significativas entre os parâmetros majoritários.

Em geral, os parâmetros relacionados à matéria orgânica têm maior implicação para a região do ribeirão Sarzedo, com destaque para Oxigênio dissolvido que apresentou diferenças significativas nos pontos durante todos os períodos chuvosos. 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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3	Folha 187 / 373
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 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, chuva 2022/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve desvio apenas para Alumínio dissolvido, Fósforo total, Nitrogênio amoniacal, Turbidez e Oxigênio dissolvido. 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 Fósforo total (montante: 61%, tributário: 100%, jusante: 56%). Nesse contexto, desde a chuva 2019/2020, tal comportamento é verificado para o Fósforo total, 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.

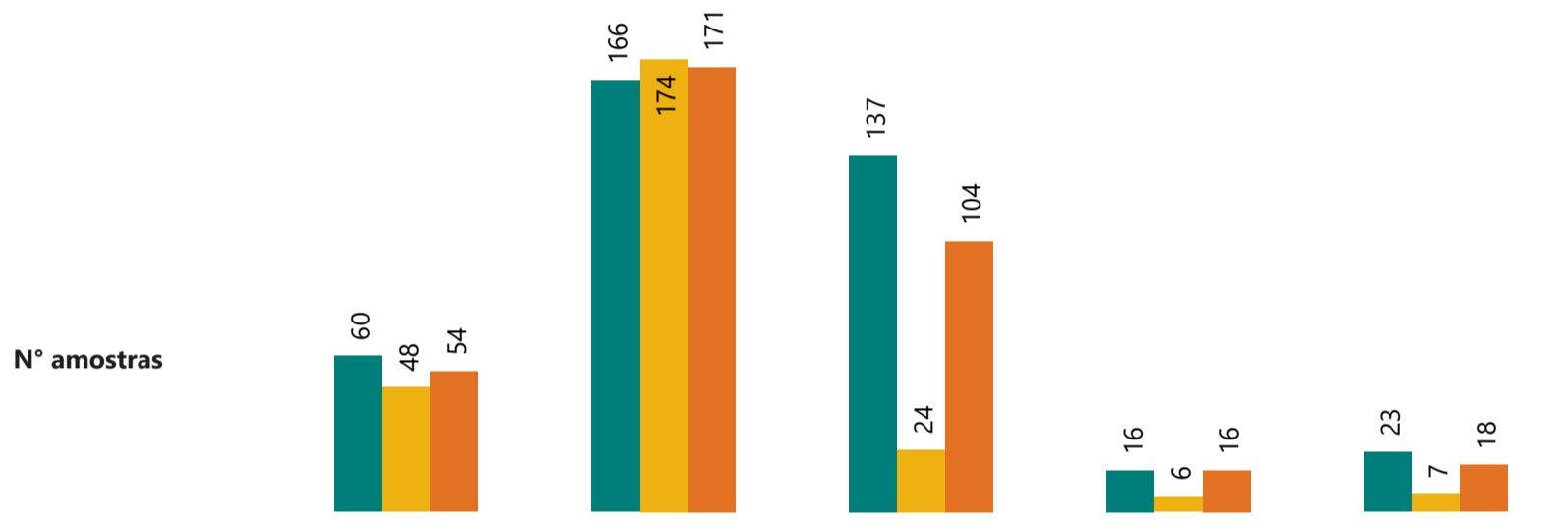
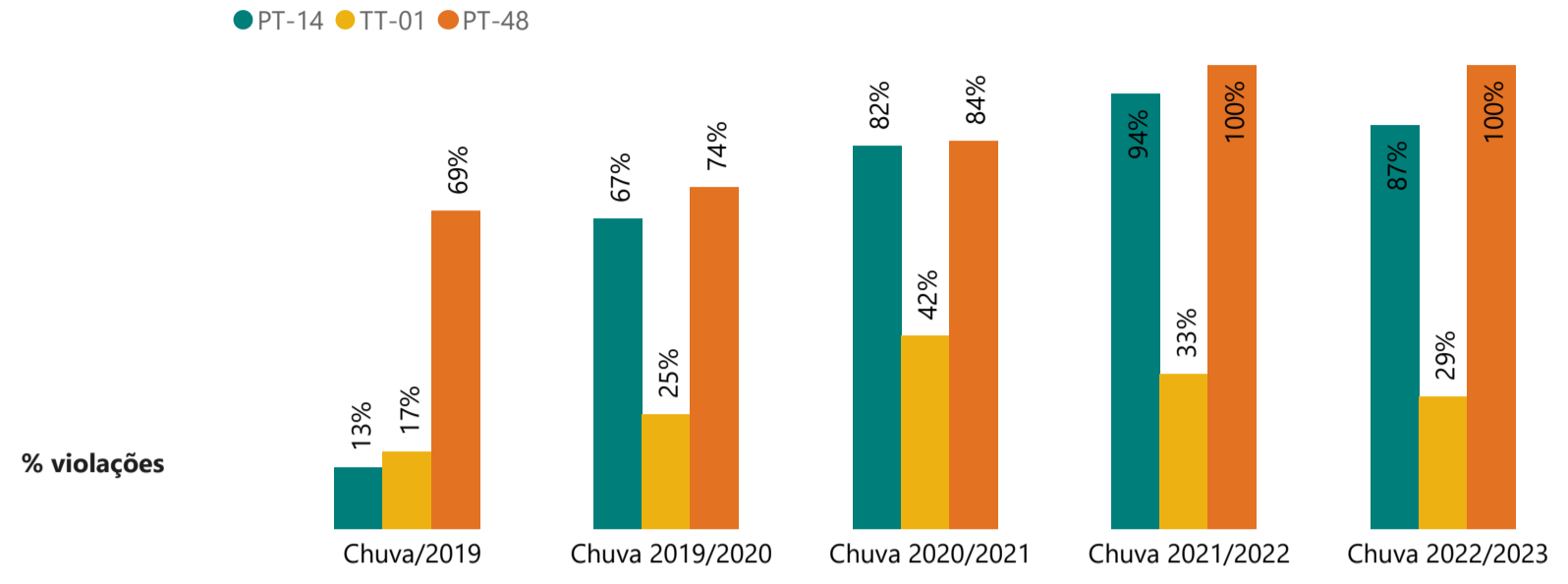
Ademais, apenas os parâmetros Alumínio dissolvido, Oxigênio dissolvido, *Escherichia/Coliformes* e Manganês Total tiveram desvios percentuais maiores no ponto de jusante (PT-48) em comparação com o de montante (PT-14). Para Alumínio dissolvido, tal cenário é evidente desde o primeiro período chuvoso analisado (chuva 2019), para Oxigênio dissolvido, tendo em vista os valores percentuais (montante: 5%, tributário: 43%, jusante: 7%), a qualidade da água no tributário pode ter interferido no ponto de jusante. Para *Escherichia/Coliformes* e Manganês Total, observou-se evidência desse cenário na maior parte dos períodos chuvosos analisados.

No que tange à evolução temporal, verifica-se que os percentuais de desvios no TT-01 durante o período chuvoso de 2022/2023 foram superiores ou iguais em relação à chuva 2021/2022 para Chumbo Total (somente no PT-14), cor verdadeira (PT-14 e PT-48), Fósforo Total (somente no PT-14), Oxigênio dissolvido (nos três pontos analisados; PT-14, TT-01 e PT-48), Turbidez (somente no PT-14), Nitrogênio amoniacal (no PT-14 e TT-01) e sólidos suspensos totais (somente no PT-14). Levando em consideração todos os períodos chuvosos, de modo geral, não se pode verificar padrão de evolução das concentrações e dos teores no TT-01 e nos respectivos pontos de montante e jusante, possuindo cada parâmetro seu comportamento específico.

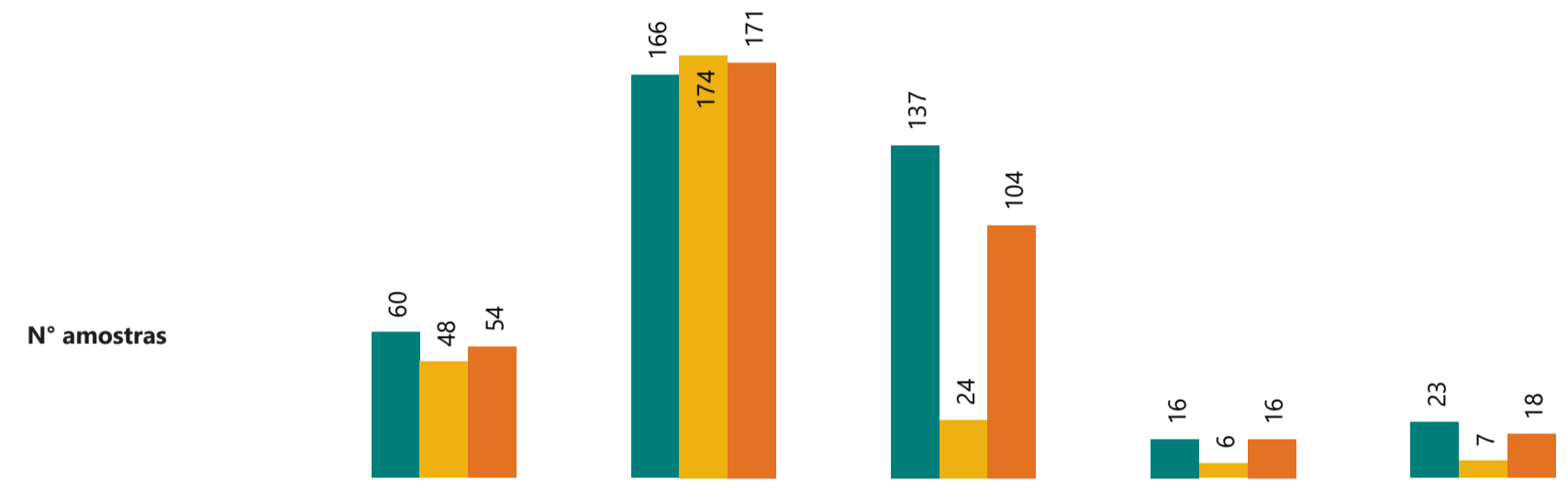
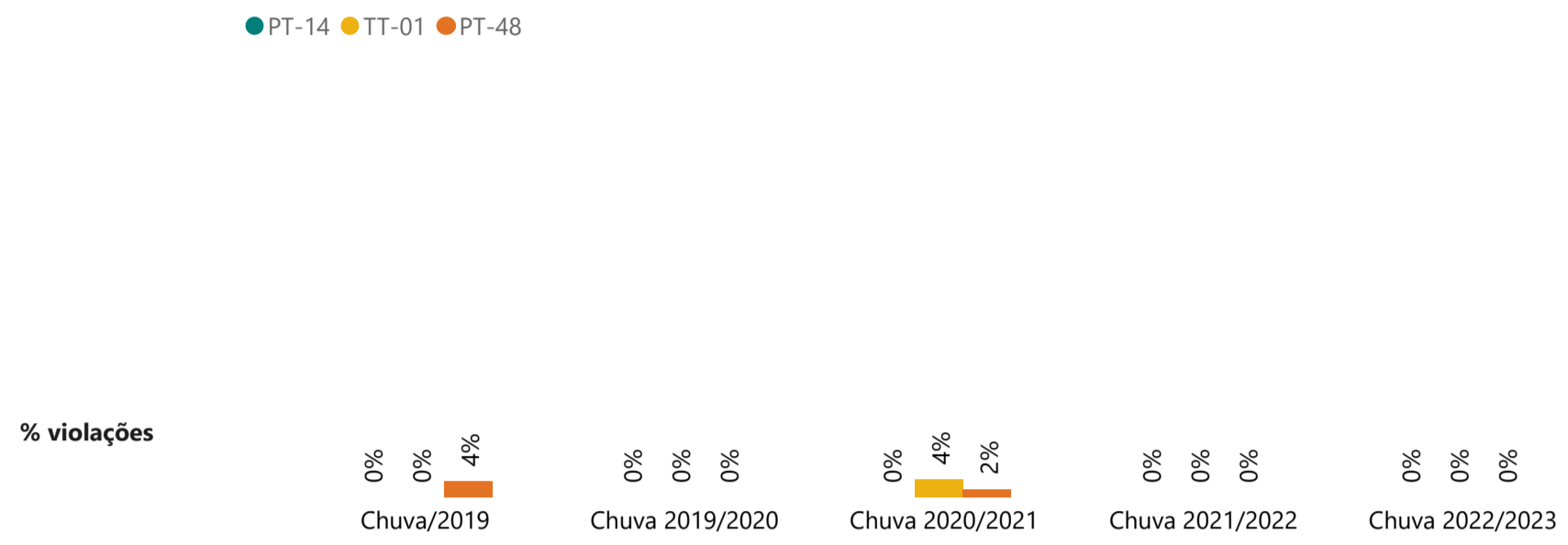
Gráfico 9.3.2-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

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

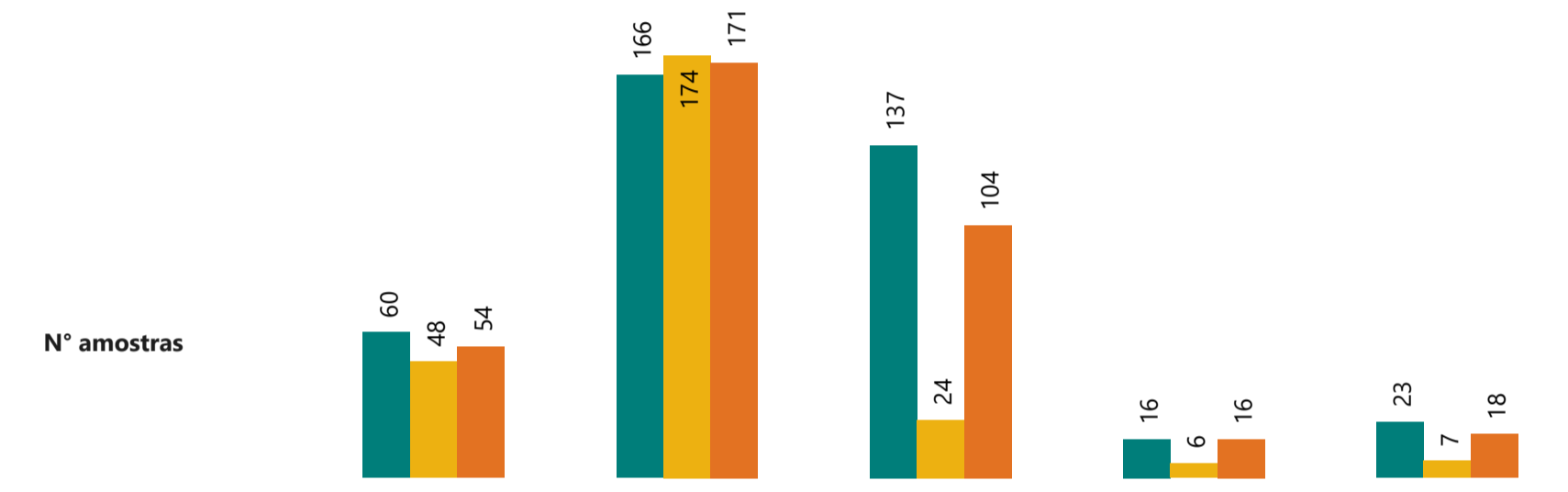
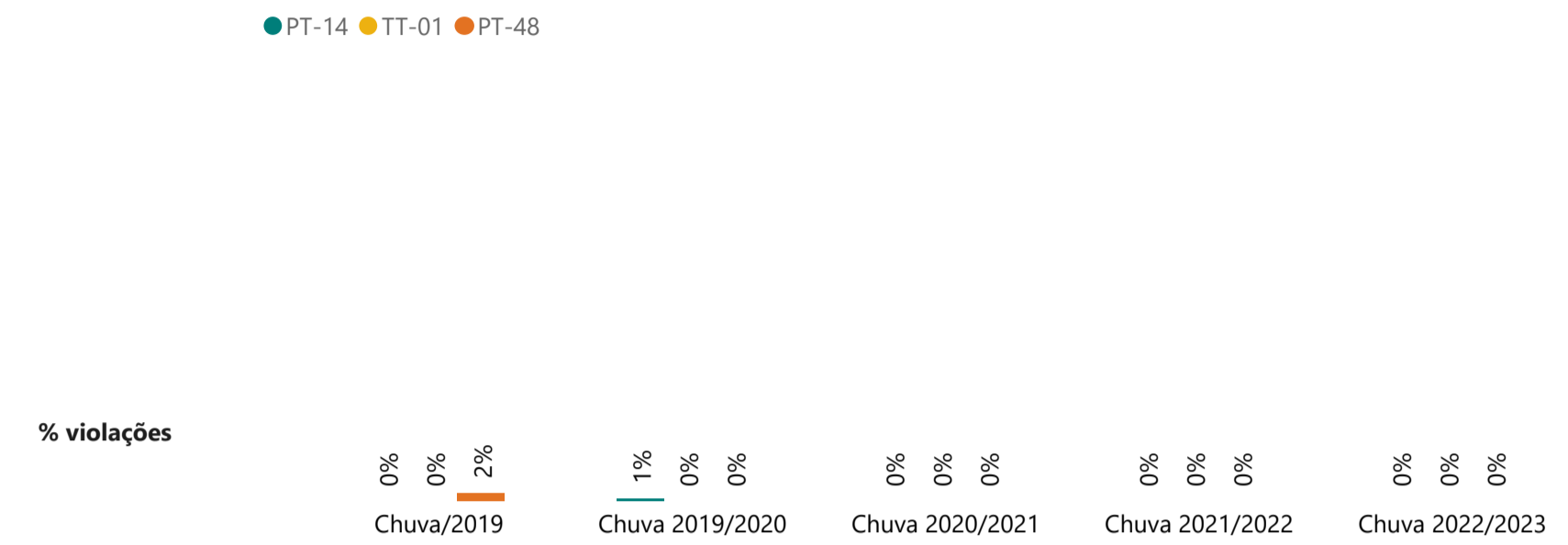
Parâmetro
Alumínio Dissolvido



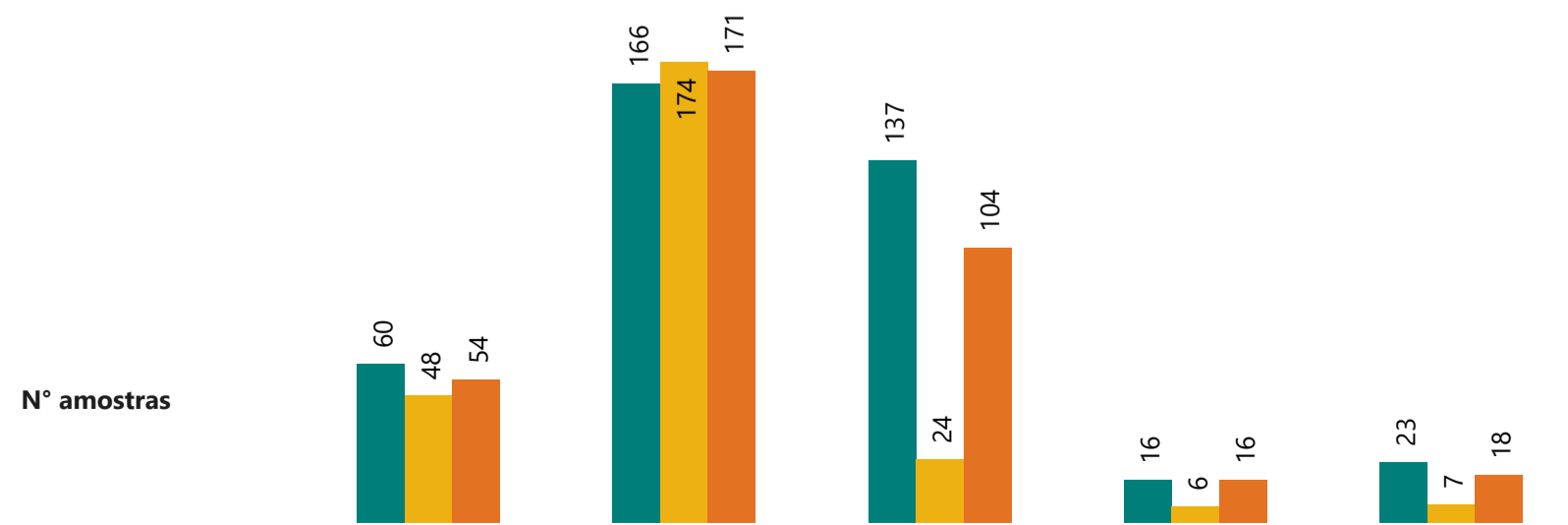
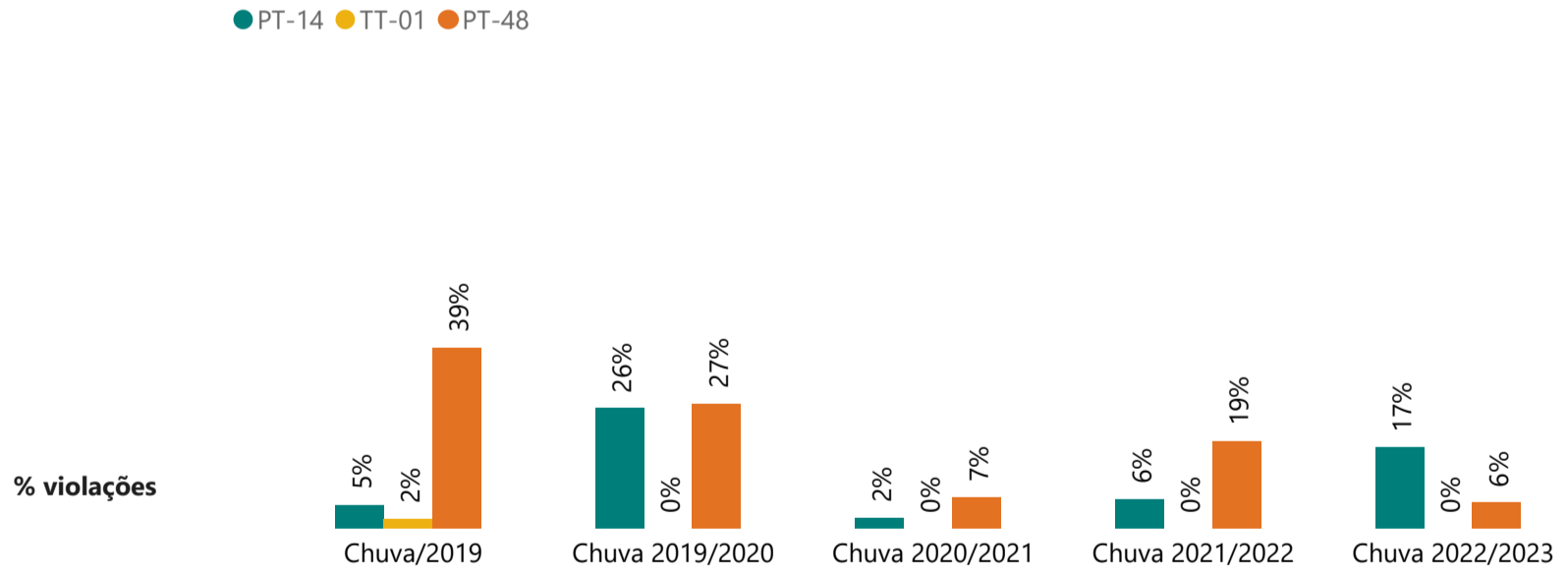
Parâmetro
Arsênio Total



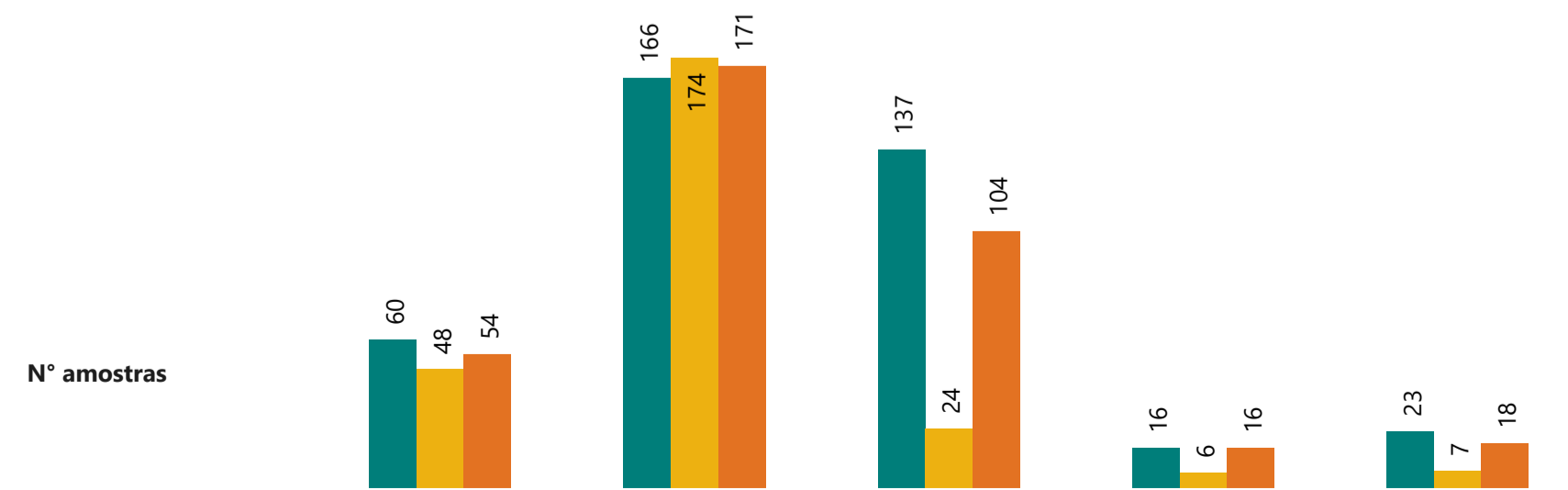
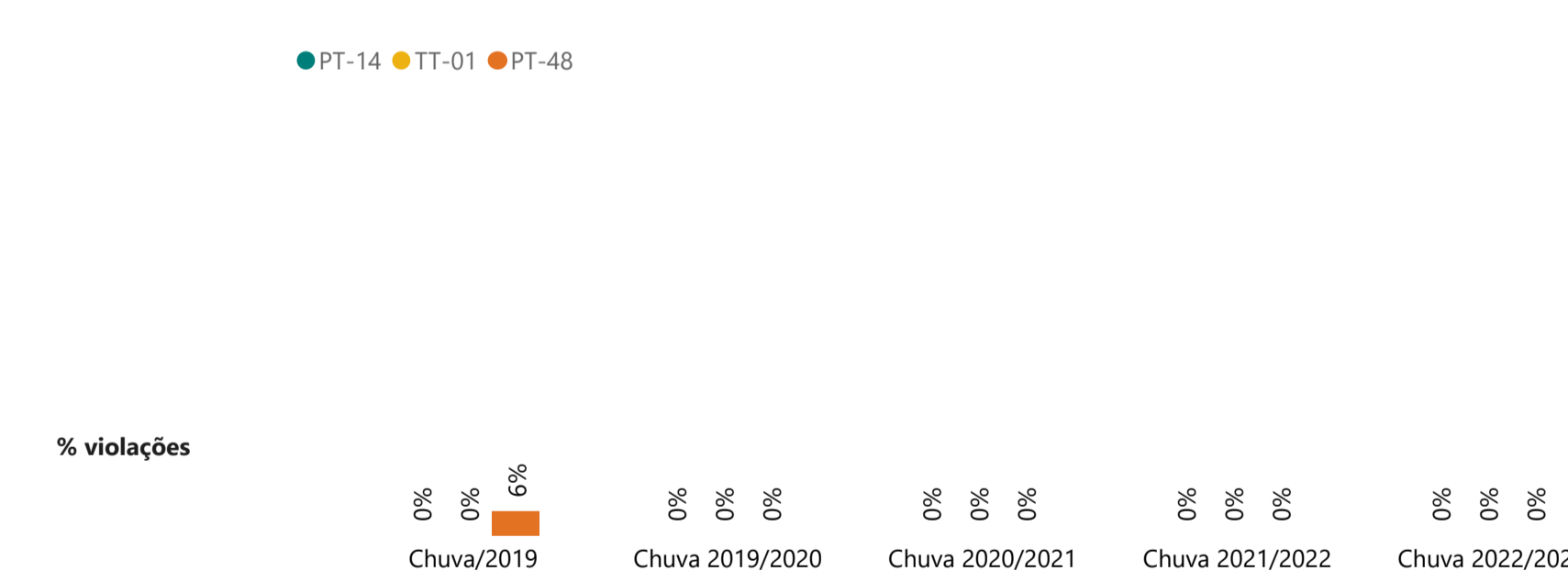
Parâmetro
Cádmio Total



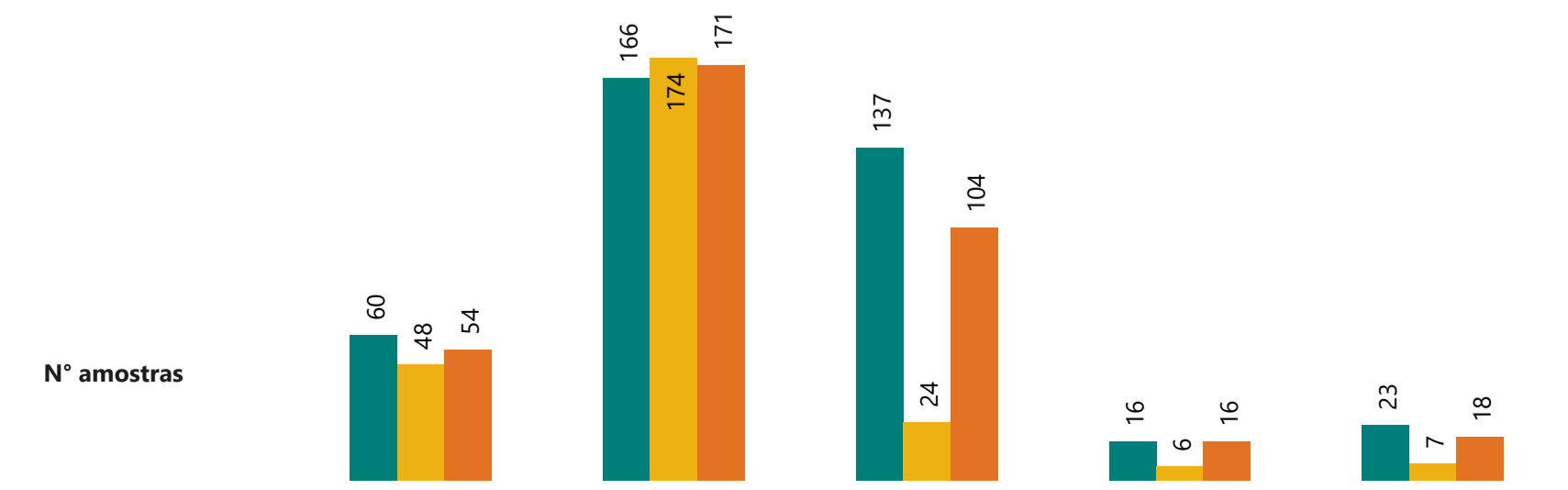
Parâmetro
Chumbo Total



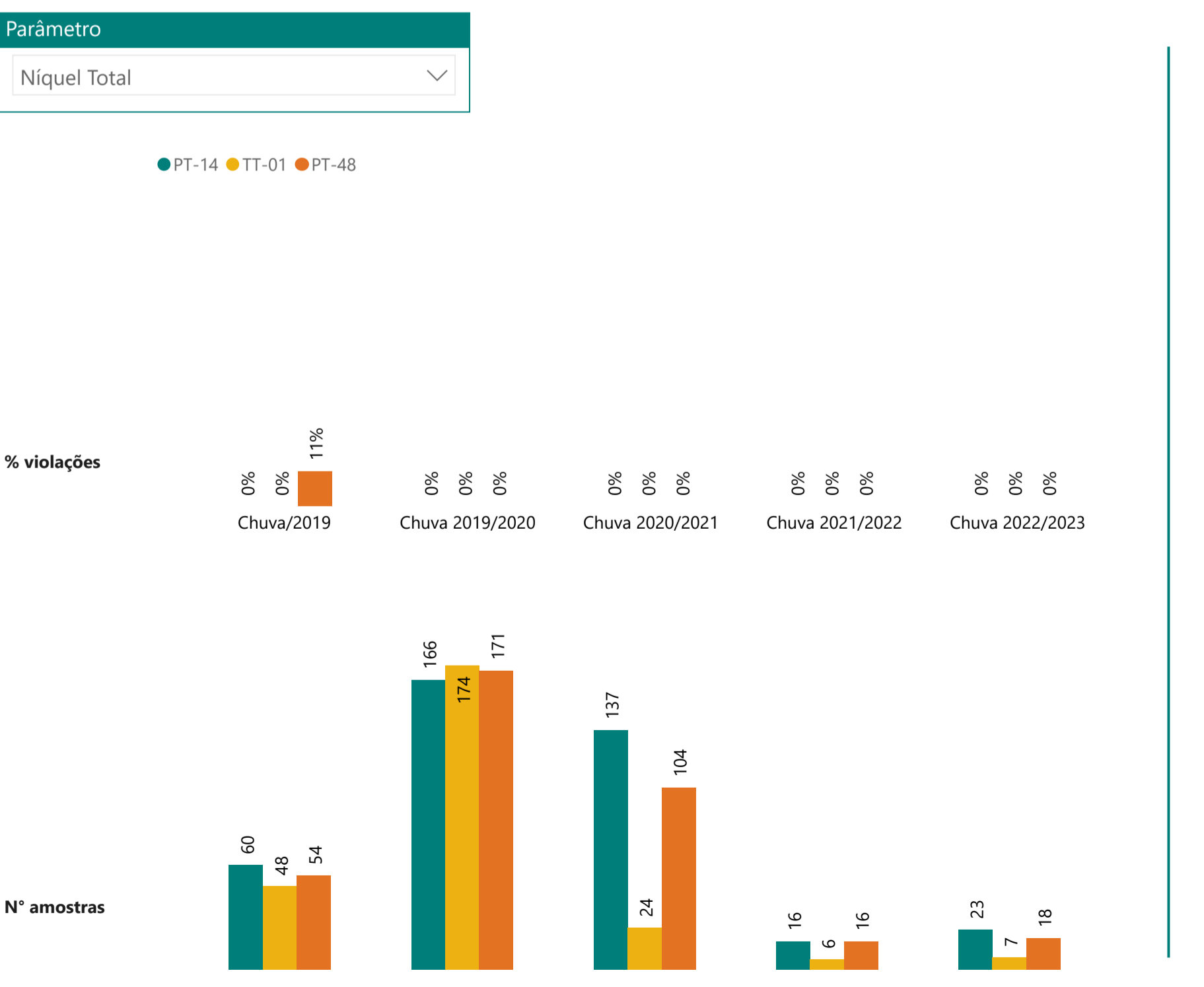
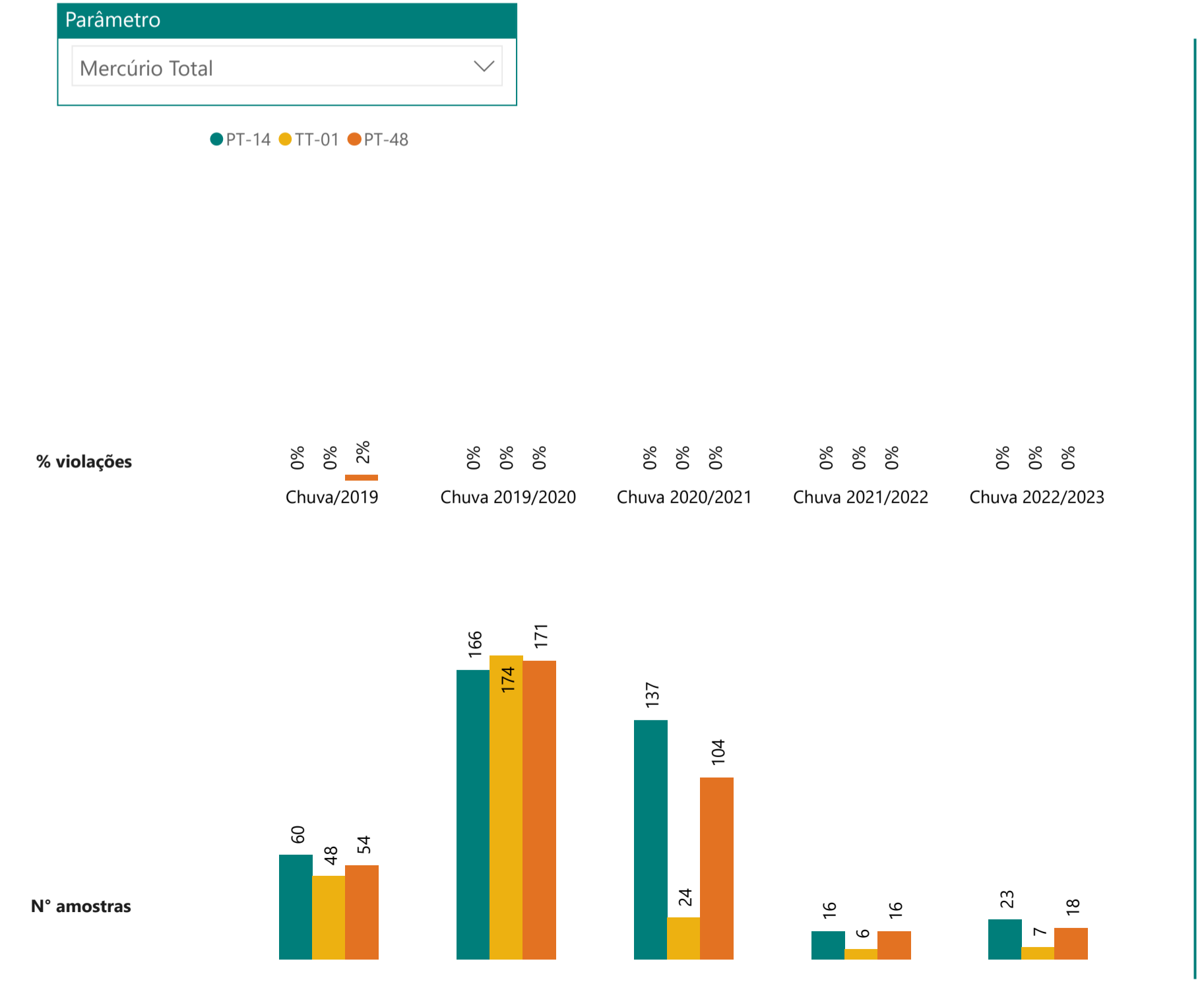
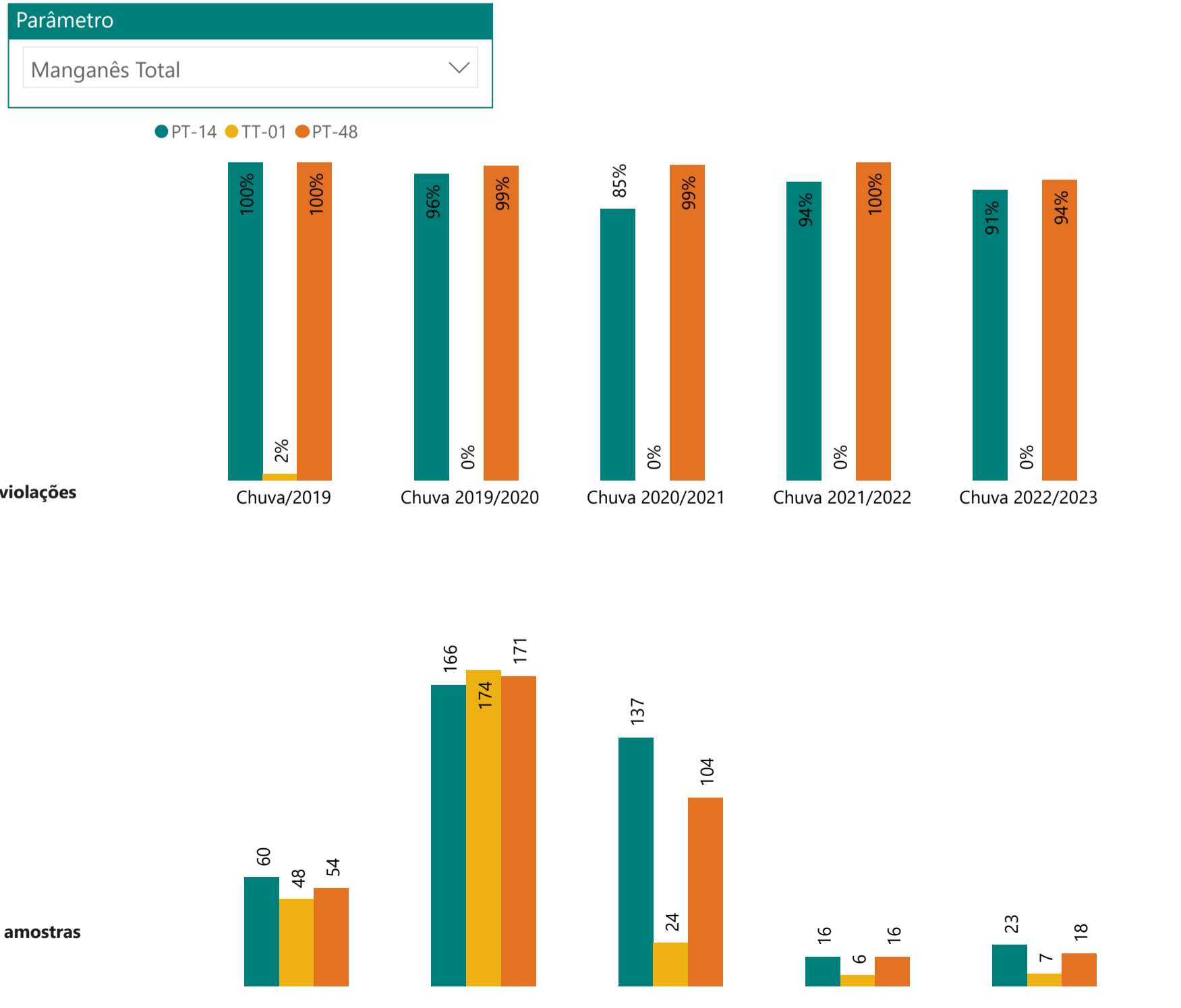
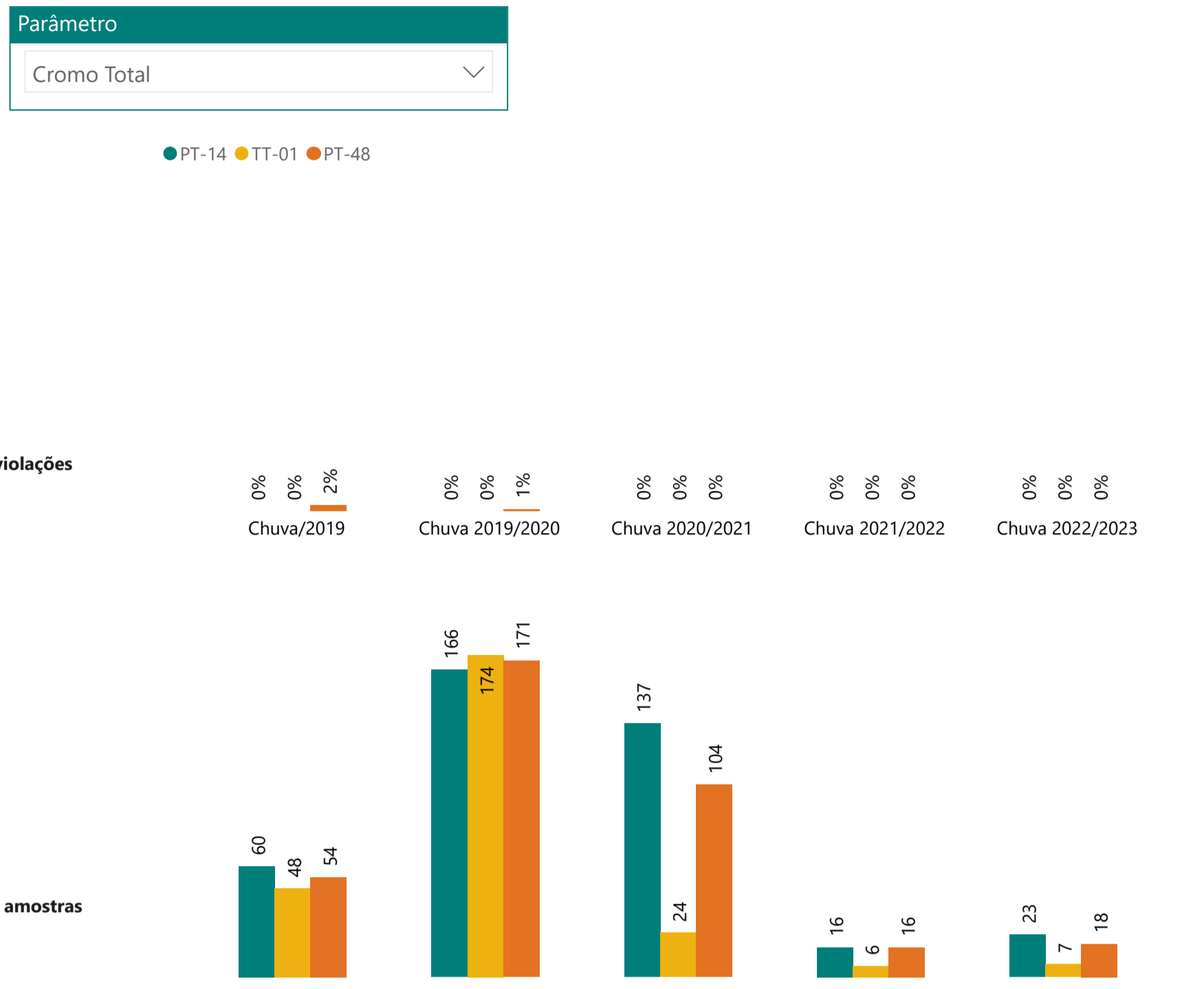
Parâmetro
Cobalto Total



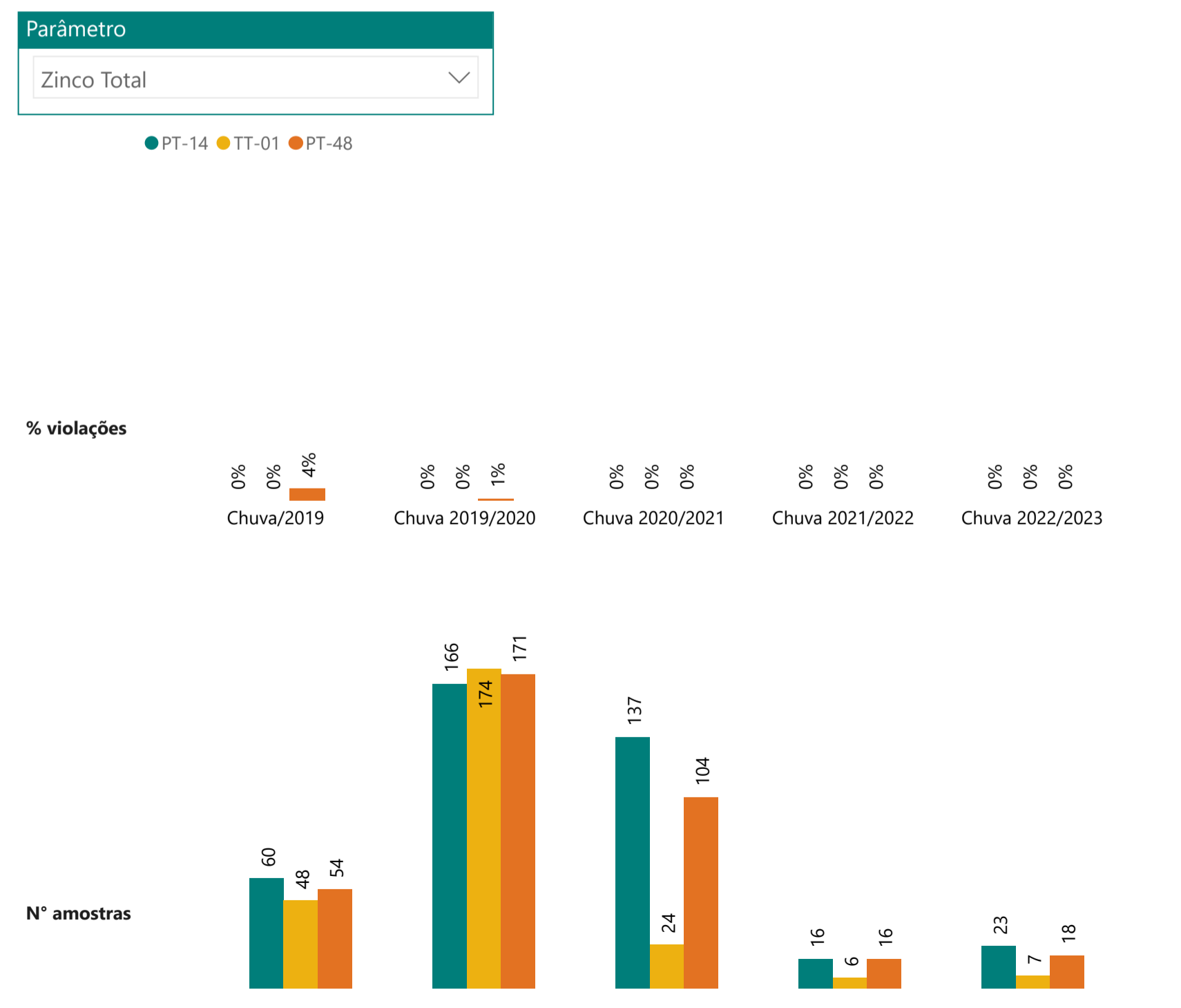
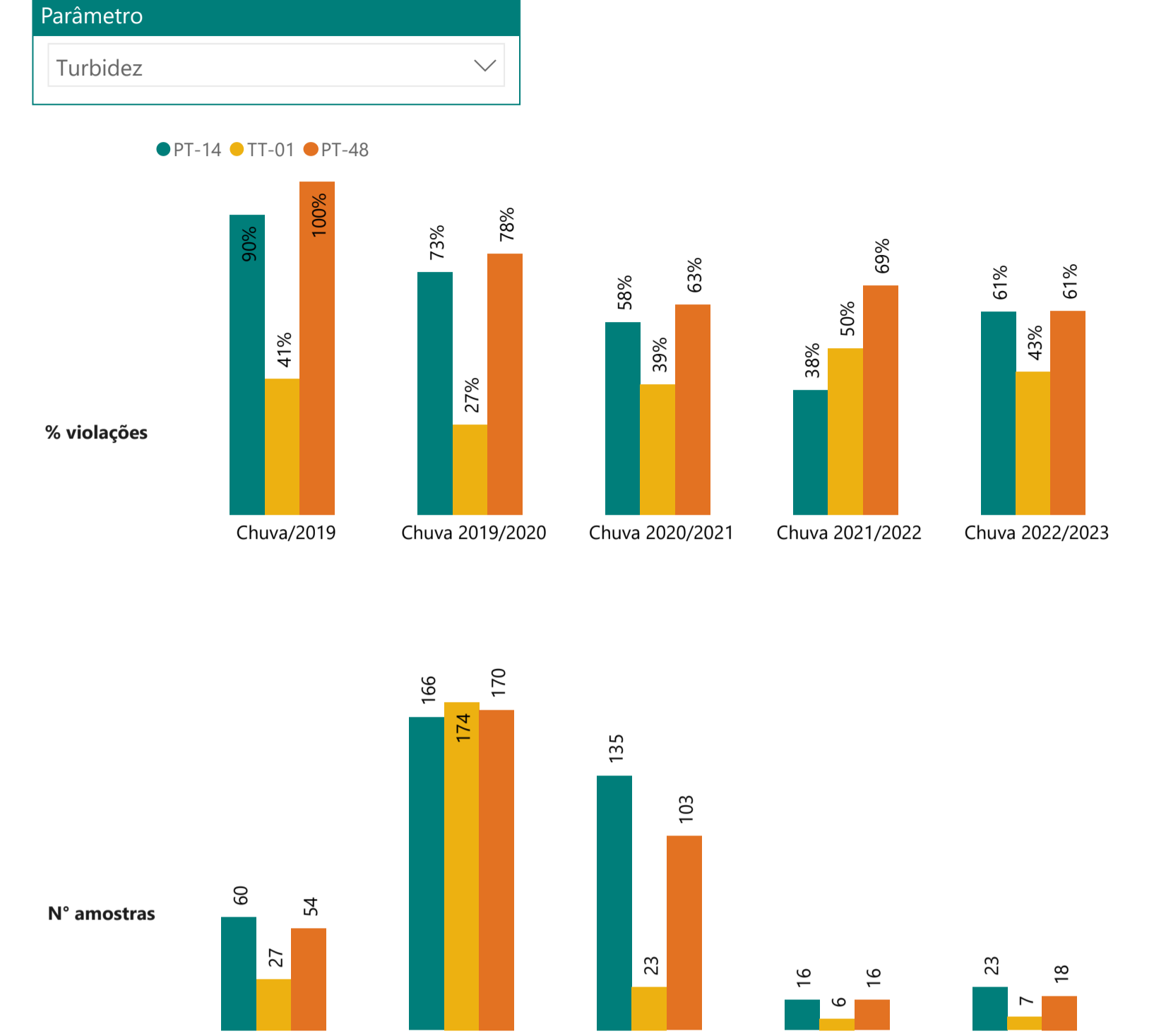
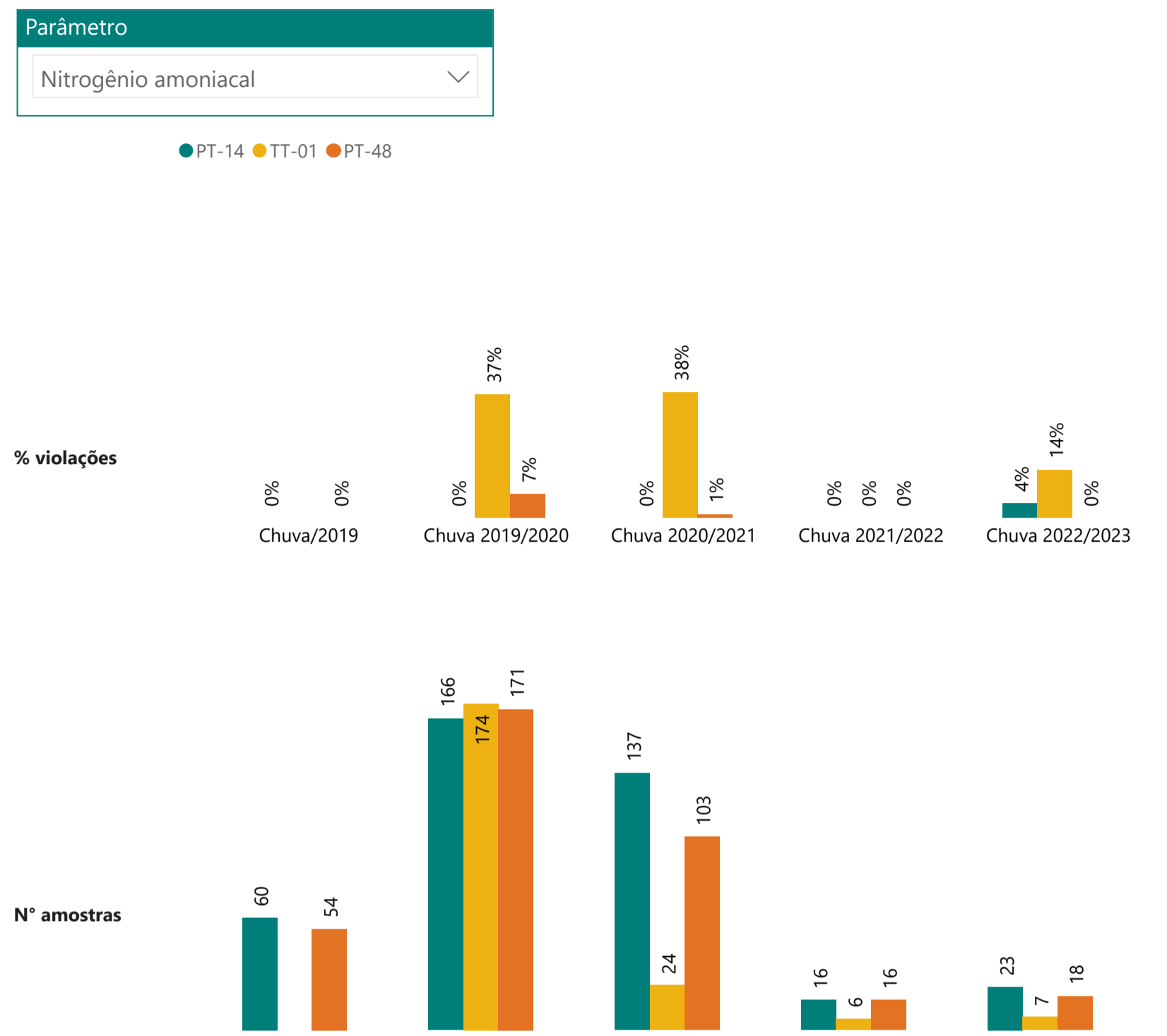
Parâmetro
Cobre Dissolvido





% 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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 191 / 373



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*, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 para o ponto TT-01 e para os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) localizados no rio Paraopeba. No **Anexo IV-B** podem ser consultados os gráficos para os demais parâmetros e tabelas de apoio com os resultados das diferentes métricas através das quais os *Boxplots* são gerados.

Assim como analisado para o tributário ribeirão Sarzedo, para o rio Betim as concentrações dos parâmetros também são influenciadas pela sazonalidade, quando se detectam concentrações mais elevadas nos períodos de chuva devido ao escoamento superficial da bacia e das vazões fluviais, principalmente dos metais marcadores Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total que compõem a matriz geológica da região.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do Igam (BP070), observou-se que os teores medianos no tributário foram, em geral, próximos ou inferiores à condição do *baseline* sazonal para os parâmetros majoritários. Os pontos localizados no rio Paraopeba também apresentaram relativa proximidade com os resultados do *baseline* de chuva. 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.

Para Alumínio dissolvido, ao longo dos períodos de chuva monitorados as concentrações oscilaram no rio Betim, e as medianas permaneceram abaixo do VMP (0,2 mg/L para Classe 3) e próximas ao valor de *baseline* sazonal. Do período chuvoso anterior (2021/2022) para o atual (2022/2023) houve, de modo geral, uma redução nas concentrações desse analito no referido curso. Por outro lado, nos pontos PT-14 e PT-48 houve incremento nos resultados do metal ao longo dos períodos de chuva (mais intensamente no PT-14), como também observado para outros pontos monitorados no rio Paraopeba, com a maioria dos resultados acima do VMP (0,1 mg/L para Classe 2) e o período de referência (2022/2023) apresentando as maiores medianas. Comparativamente, as medianas no tributário permaneceram próximas ou inferiores àquelas observadas no Paraopeba, exceto pelo PT-14 no ciclo de 2019 que apresentou, de modo geral, os menores valores da série analisada.

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 chuvosos, mas ainda com grande parte dos resultados acima do VMP (0,1 mg/L), incluindo a condição do *baseline* sazonal.

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 192 / 373

Desse modo, comparativamente, as concentrações de Manganês total no tributário foram inferiores e com menor variabilidade àquelas observadas no rio Paraopeba.

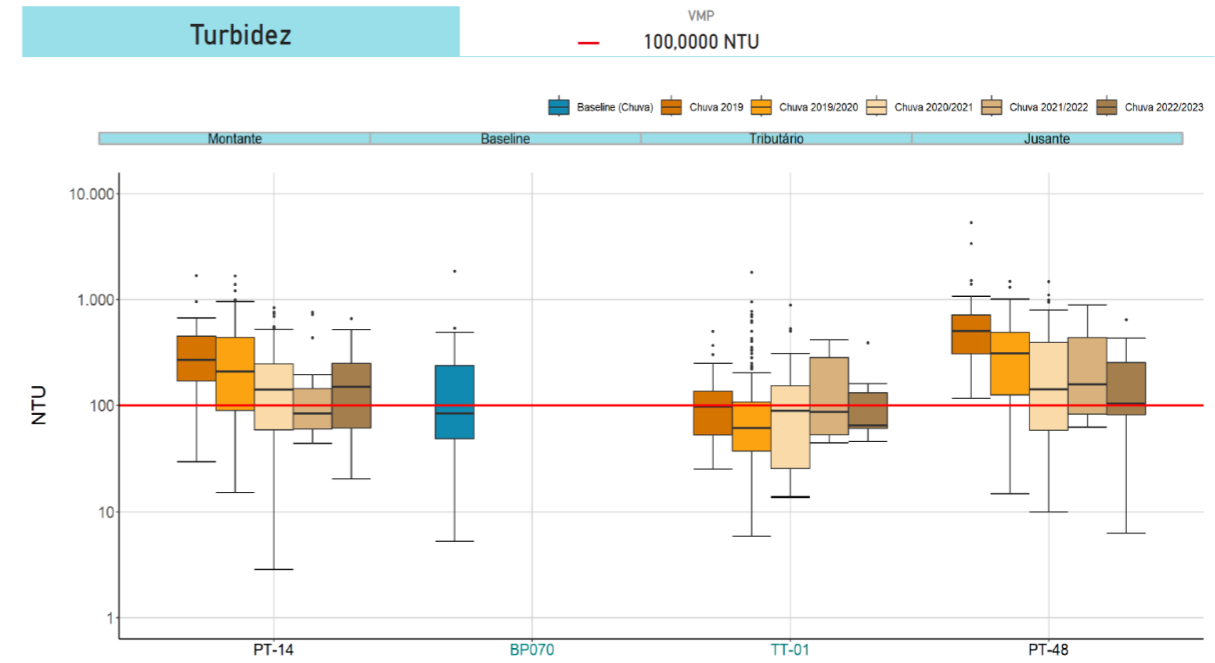
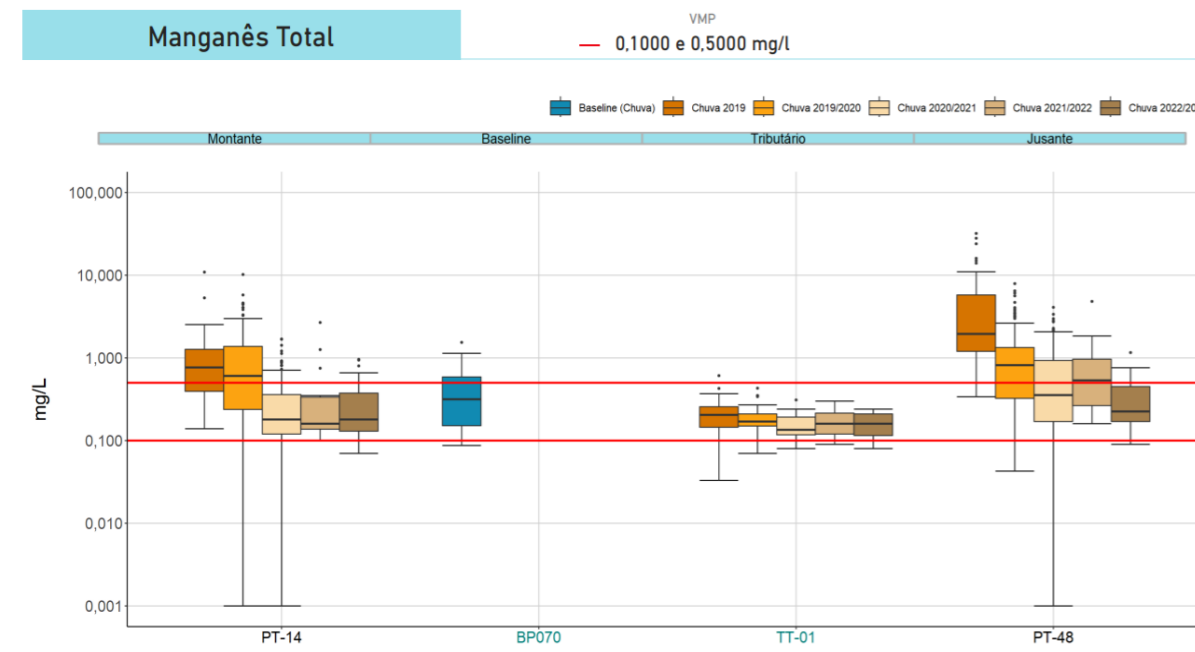
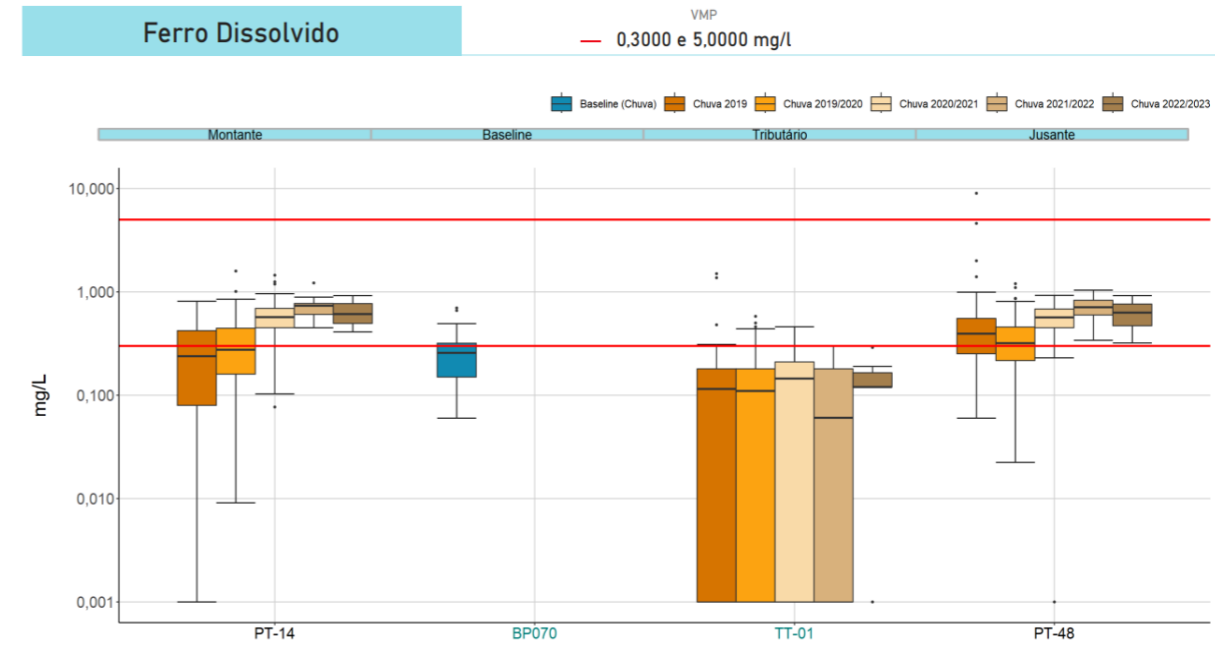
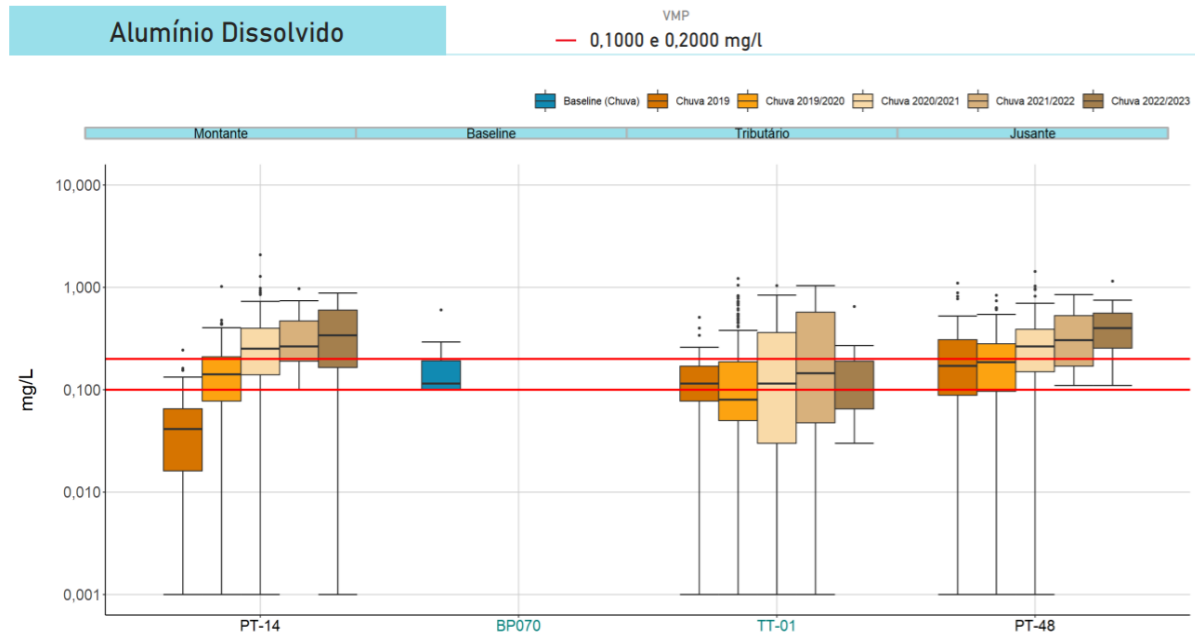
Para Ferro dissolvido, os resultados no TT-01 apresentaram-se mais próximos entre os diferentes períodos de chuva (principalmente 2019, 2019/2020 e 2020/2021), com ligeira redução na mediana em 2021/2022 e nova elevação em 2022/2023, mantendo-se majoritariamente abaixo do *baseline* sazonal. Para o ciclo chuvoso de referência (2022/2023), especificamente, houve menor dispersão dos dados, ainda que a mediana tenha se mantido próxima aos demais períodos. Com exceção do período de chuva 2019, pelo menos 50% dos resultados ficaram acima do VMP nos pontos PT-14 e PT-48. Nestes pontos os resultados do monitoramento Vale também ficaram acima do *baseline* e dos resultados obtidos no tributário.

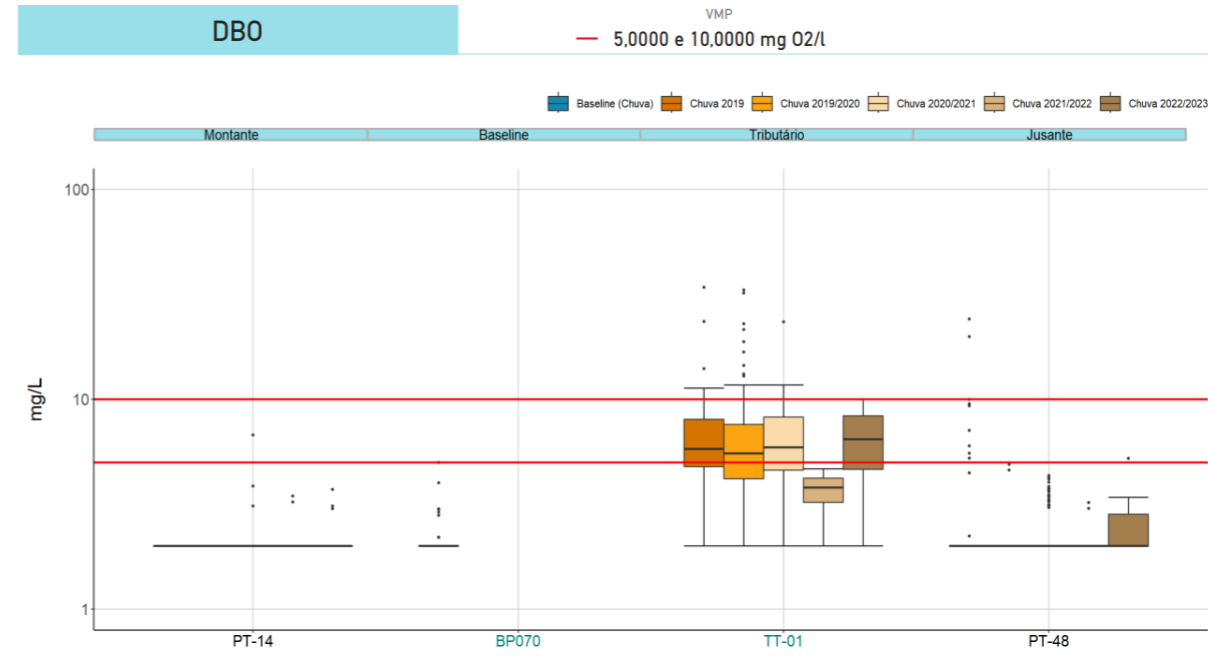
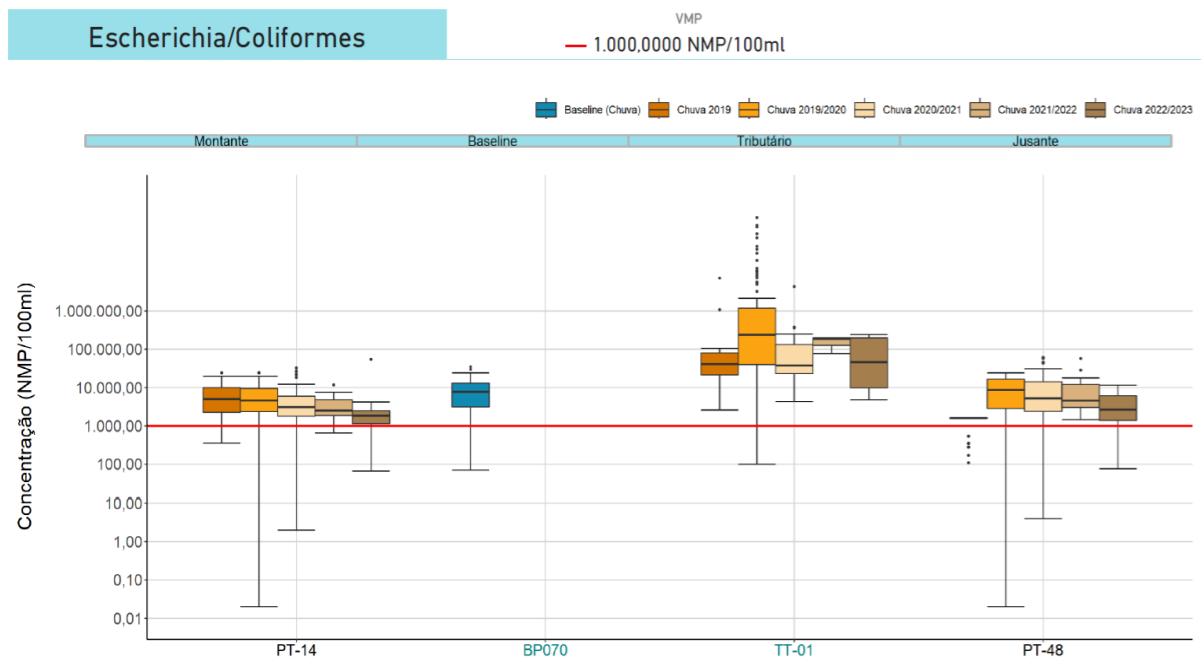
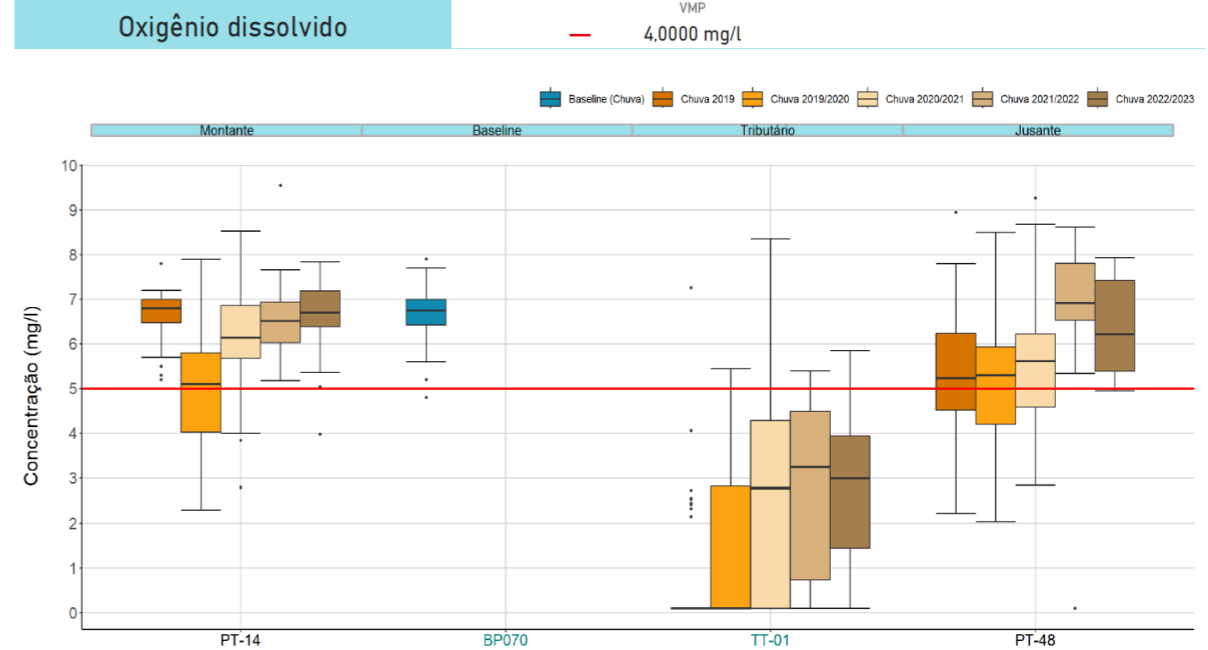
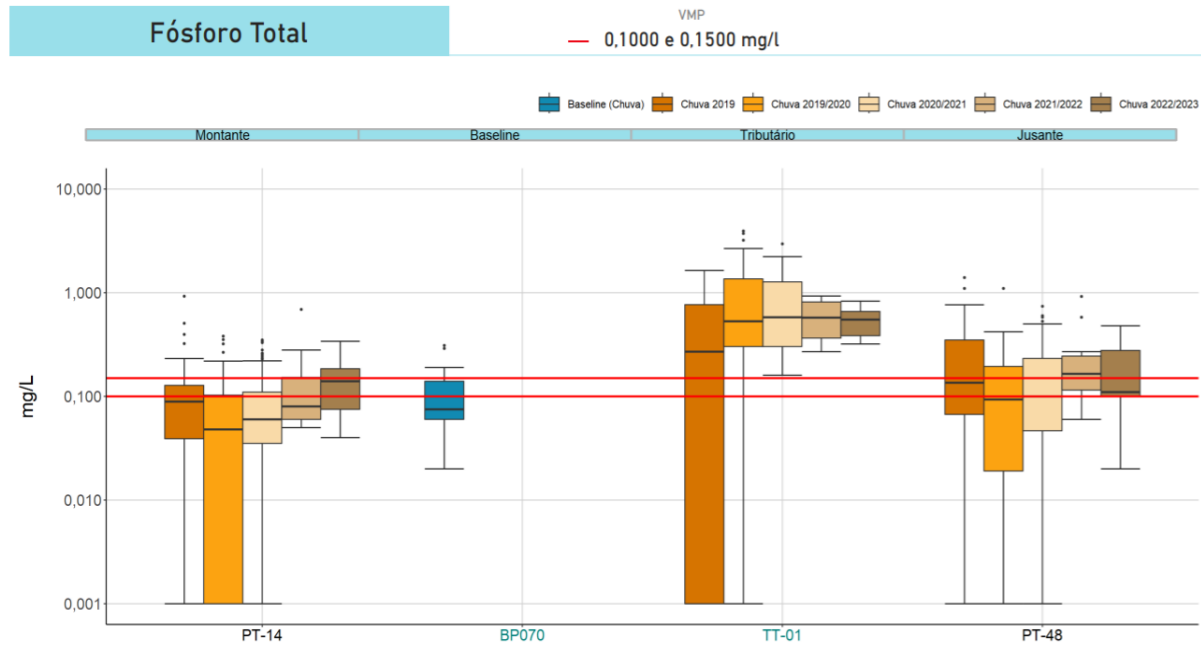
Para Turbidez, nota-se, nos pontos localizados no Paraopeba, decréscimo dos teores entre 2019, 2019/2020 e 2020/2021, seguidos de elevação entre 2021/2022 e 2022/2023 no PT-14 e redução no PT-48. De modo geral, a maior parte dos resultados ficaram acima do VMP (100 NTU) e das condições de *baseline* para chuva. No TT-01 nota-se comportamento oscilatório entre os períodos analisados, com redução, de modo geral, dos resultados obtidos do ciclo chuvoso anterior (2021/2022) para o atual (2022/2023). As medianas obtidas nesse tributário permaneceram abaixo do VMP (100 NTU) e próximas àquela verificada no *baseline* sazonal. Desse modo, nota-se que os resultados do parâmetro no tributário foram, de maneira geral, próximos ou inferiores aos observados no rio Paraopeba.

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. Exceto para o período chuvoso de 2019, cuja mediana ficou abaixo das observadas nos demais períodos para o TT-01, nota-se uma proximidade das medianas obtidas temporalmente, ainda que seja perceptível uma menor dispersão dos resultados nos dois últimos períodos analisados. Além disso, no tributário, em geral, grande parte dos resultados ultrapassaram o VMP 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.

Situação semelhante foi identificada para os parâmetros sanitários *E.coli*/Coliformes termotolerantes e DBO, com resultados mais elevados e, em geral, acima dos respectivos VMPs e *baselines* no ponto TT-01 se comparado aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba. Temporalmente, percebe-se oscilação nos valores de *E.coli*/Coliformes termotolerantes, com redução de resultados de 2021/2022 para 2022/2023, enquanto para a DBO o comportamento se apresentou similar ao longo dos anos, exceto para o ciclo anterior (2021/2022) que apresentou, de modo geral, menores valores. As concentrações de Oxigênio dissolvido foram inferiores no tributário e em grande parte abaixo da concentração mínima de 5 mg/L exigida pela legislação. Tal condição ressalta a poluição orgânica presente no rio Betim.

Gráfico 9.3.2-2 Boxplots - TT01





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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

Tabela 9.3.2-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim

PT-14 (Mont.) X PT-48 (Jus.)	Chuv. 2019	Chuv. 2019/2020	Chuv. 2020/2021	Chuv. 2021/2022	Chuv. 2022/2023
Manganês Total	0,000	0,059	0,000	0,007	0,462
Ferro Dissolvido	0,000	0,075	0,654	0,925	0,969
Alumínio Dissolvido	0,000	0,001	0,634	1,000	0,478
Turbidez	0,000	0,087	0,081	0,036	0,773
Fósforo Total	0,012	0,000	0,000	0,035	0,703
DBO	0,000	0,167	0,000	0,922	0,203
EColi / ColiTermot.	0,000	0,000	0,000	0,019	0,138
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,000	0,018	0,003
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,350	0,000	0,118	0,722
Sólidos Suspensos T.	0,000	0,022	0,003	0,052	0,969



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 chuvosos 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, *E.Coli*/Coliformes termotolerantes e Nitrogênio amoniacal, sendo que o último foi significativamente diferente em todos os períodos chuvosos e todos os parâmetros supracitados possuem origem sanitária. 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 consequente piora da qualidade da água no ponto de jusante.

Temporalmente, percebe-se que as chuvas de 2019 e 2020/2021 tiveram as maiores ocorrências de diferenças significativas, sendo que para a primeira foi verificada diferença para todos os parâmetros avaliados no teste estatístico. No período chuvoso mais recente (2022/2023), apenas houve diferença estatística entre os resultados de 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 (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 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,

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 196 / 373

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 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, chuva 2022/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Nitrogênio amoniacal e Turbidez. Dentre esses parâmetros, as violações foram mais expressivas no tributário (TT-05) em relação aos pontos a montante e a jusante da confluência para Alumínio dissolvido (montante: 90%, tributário: 100%, jusante 75%), Ferro dissolvido (montante: 90%, tributário: 100%, jusante: 83%) e Turbidez (montante: 60%, tributário: 67%, jusante: 58%). Entretanto, nenhum desses parâmetros apresentou percentual de violações superior no ponto de jusante em relação ao ponto de montante.

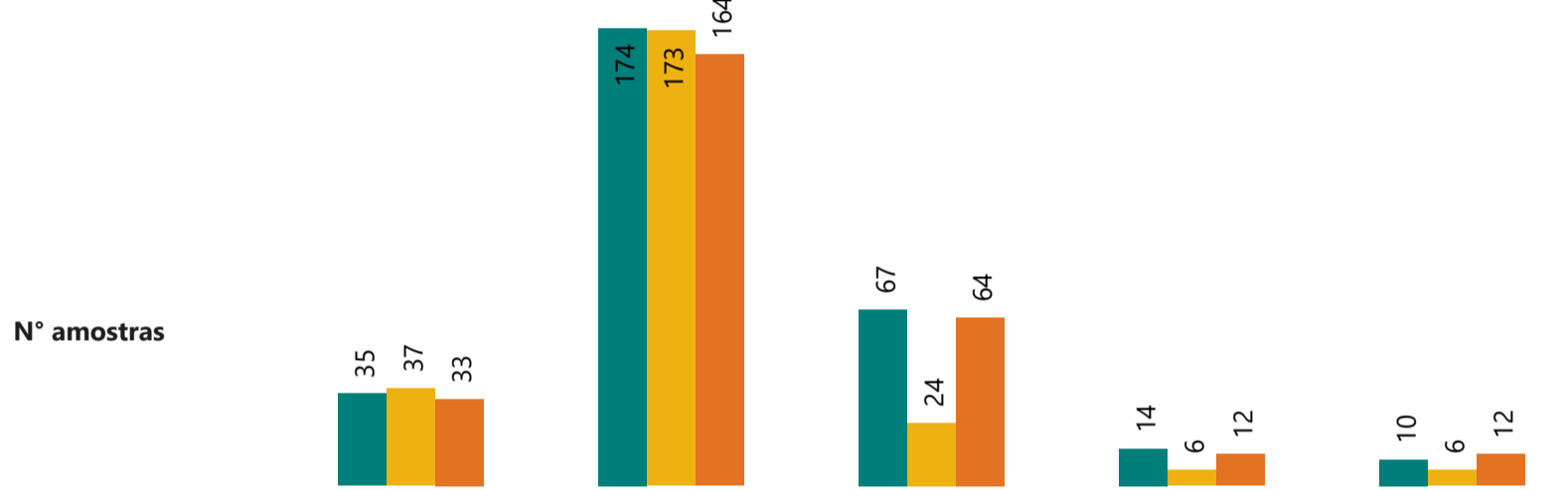
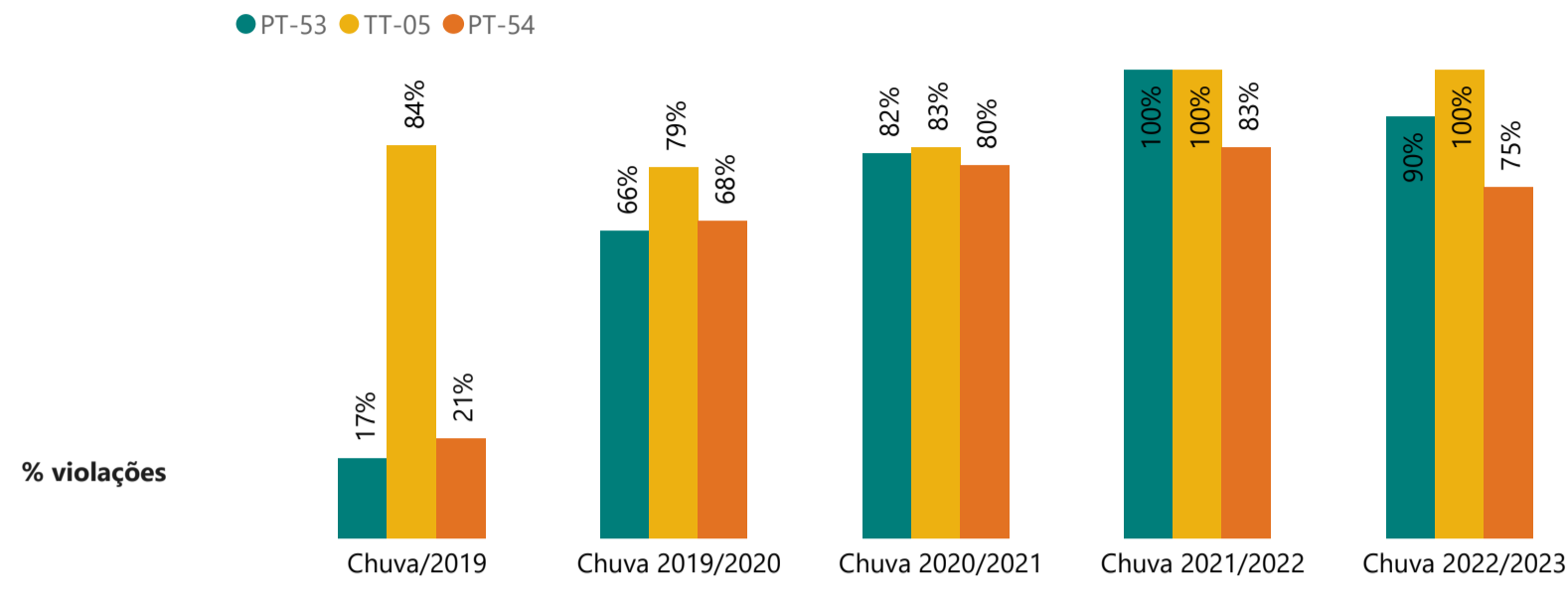
Temporalmente, para Alumínio, percebe-se que houve aumento nos percentuais de violação no TT-05 desde a chuva 2019/2020, sendo que os desvios ocorreram em 100% das coletas nas chuvas de 2021/2022 e 2022/2023. No entanto, nos pontos de montante e de jusante houve redução dos desvios na chuva mais recente (2022/2023) em relação à chuva 2021/2022. Para Ferro dissolvido, houve aumento dos percentuais no tributário durante a maior parte dos períodos chuvosos, excetuando-se a chuva 2021/2022, que apresentou redução em relação à chuva imediatamente anterior.

Embora o percentual de desvios de Fósforo total no TT-05 tenha sido inferior em relação aos pontos de montante e jusante para a maior parte dos períodos chuvosos, exceto para a chuva 2019/2020, vale ressaltar que as porcentagens de resultados inconformes no ponto de jusante se manteve superior ou igual ao ponto de montante em todos os períodos chuvosos, o que pode indicar contribuição do ribeirão das Abóboras na qualidade da água do rio Paraopeba após a confluência. Por fim, ressalta-se que no período atual não houve violação de metais traço no TT-05.

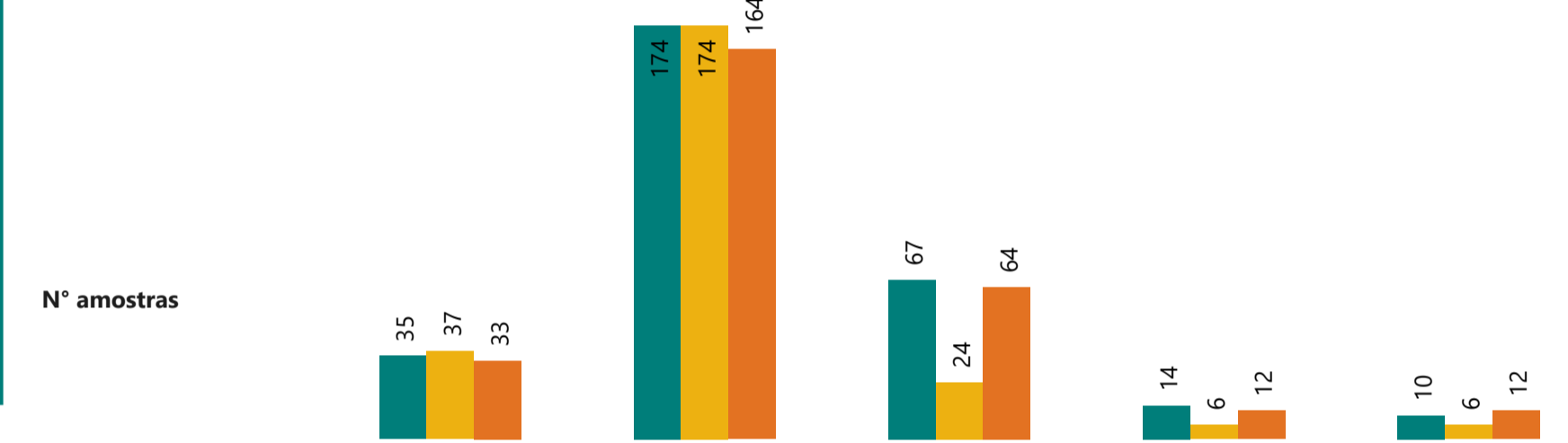
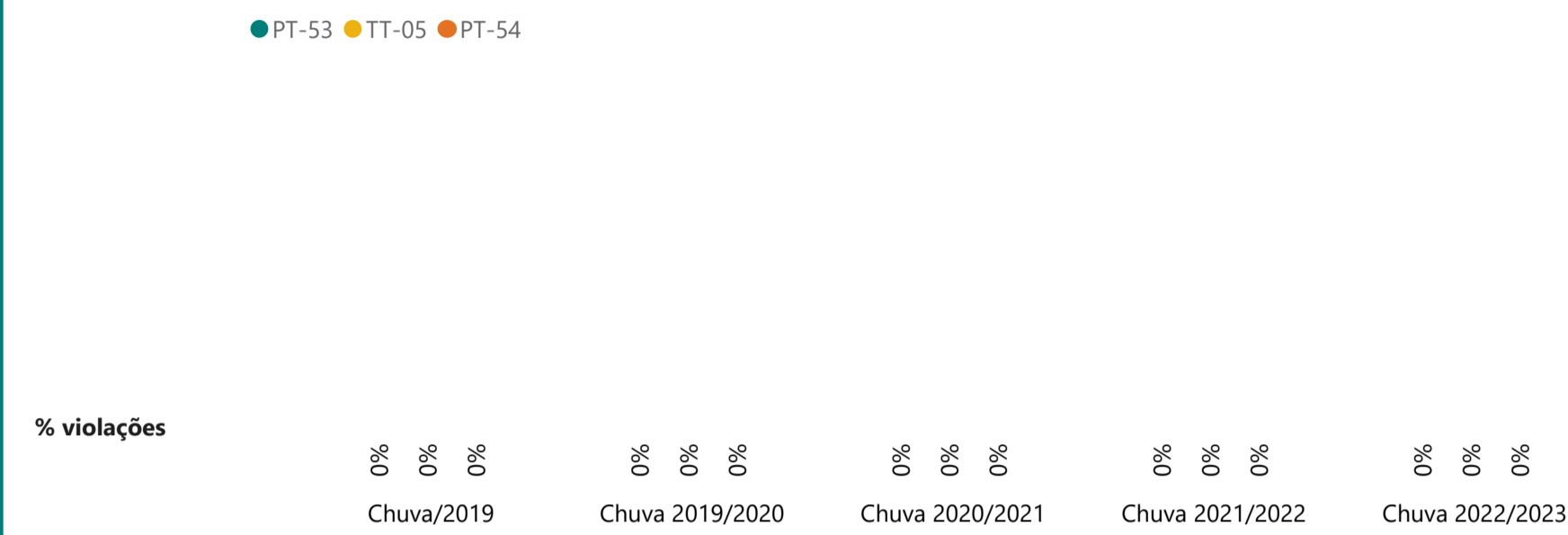
Gráfico 9.3.3-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 no TT-05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante

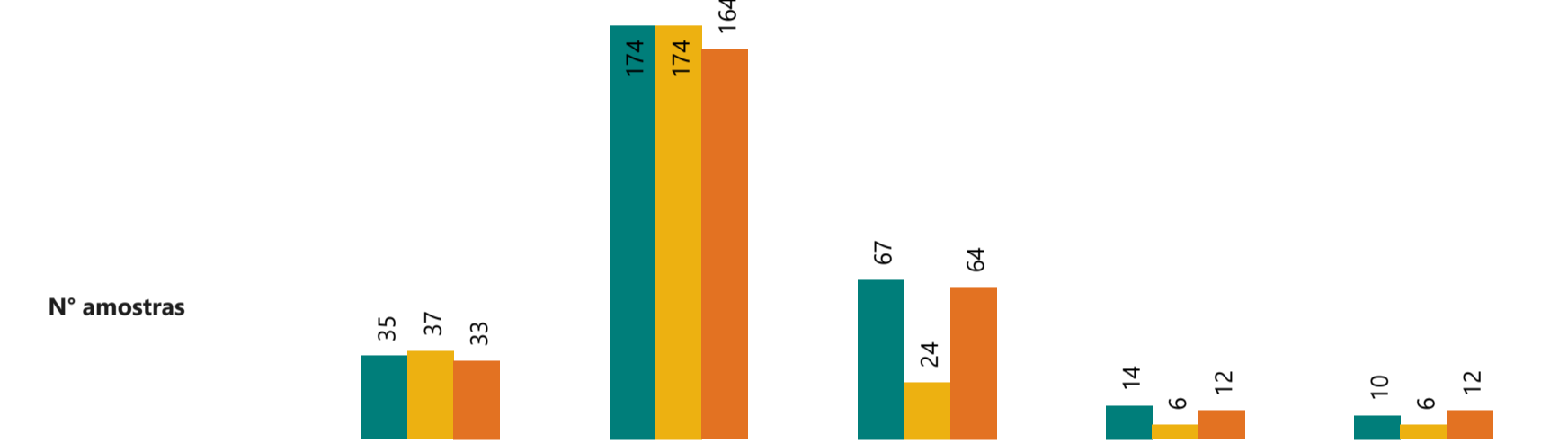
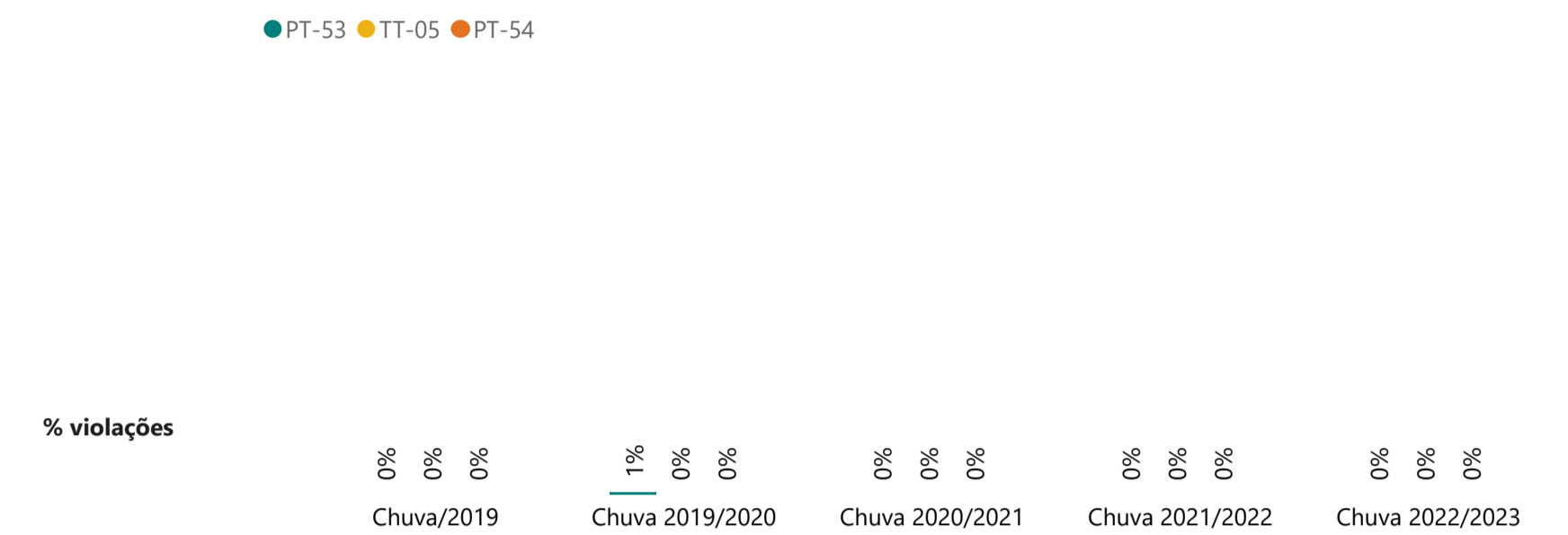
Parâmetro
Alumínio Dissolvido



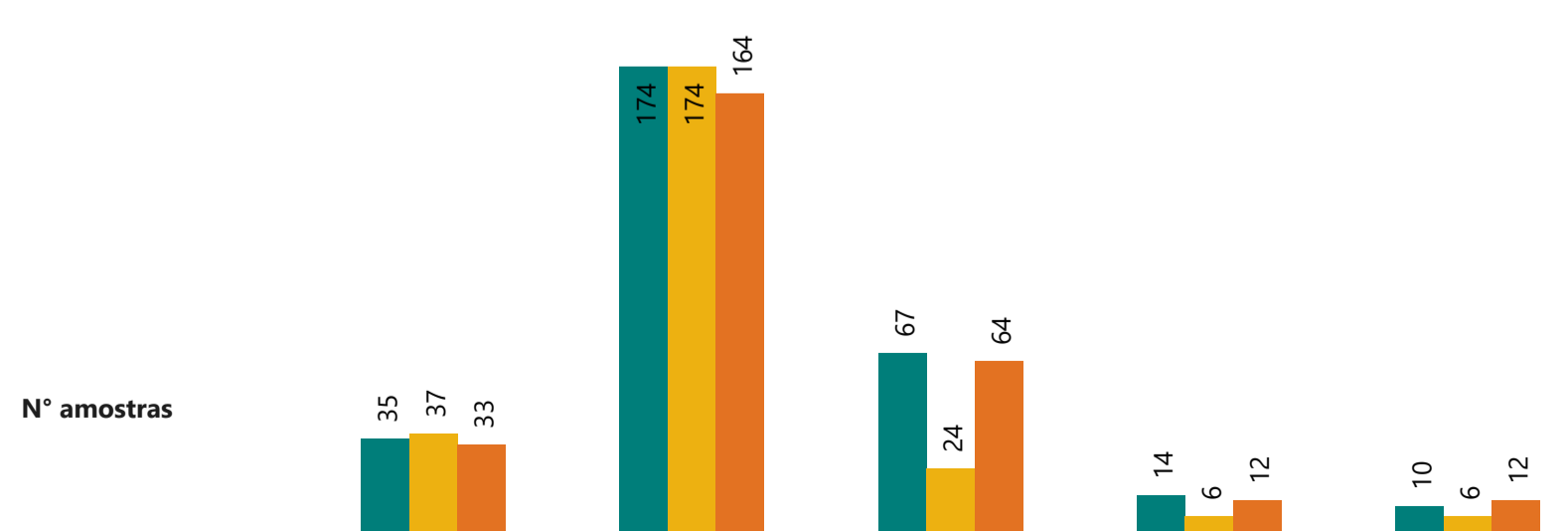
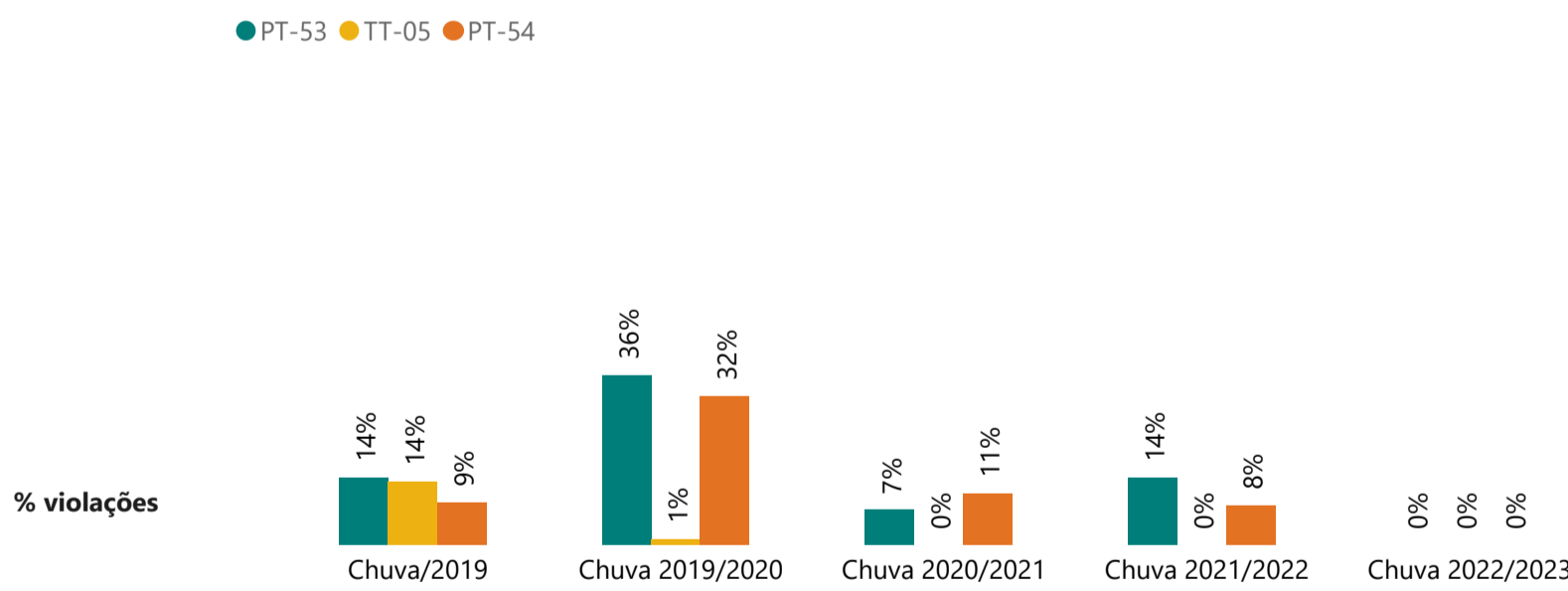
Parâmetro
Arsênio Total



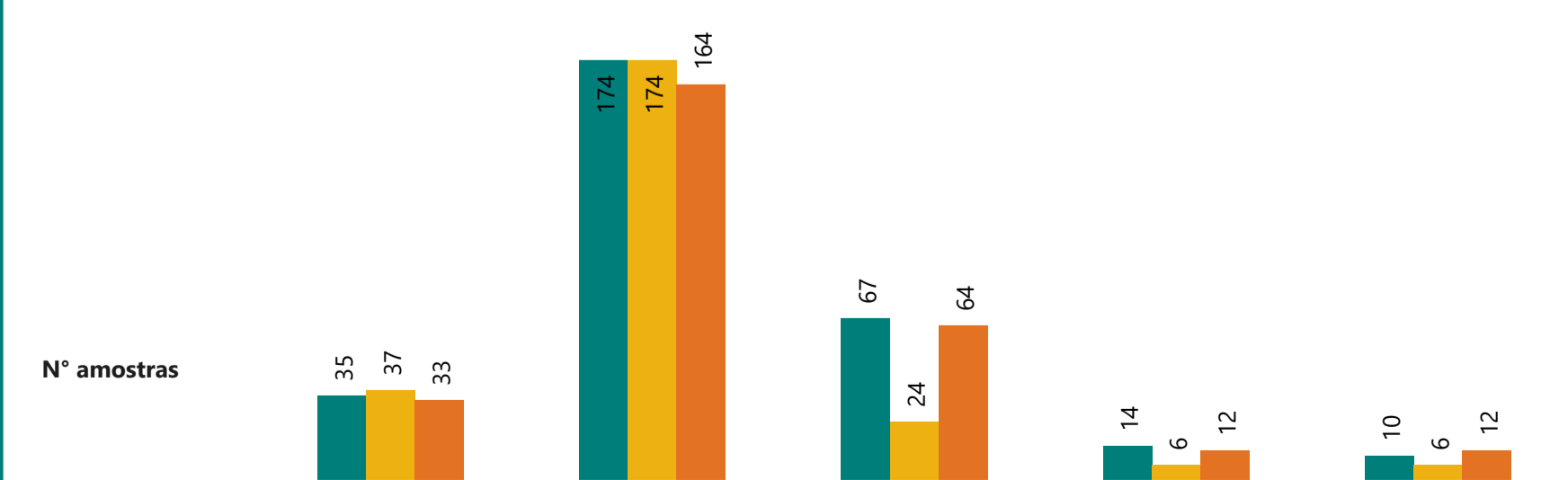
Parâmetro
Cádmio Total



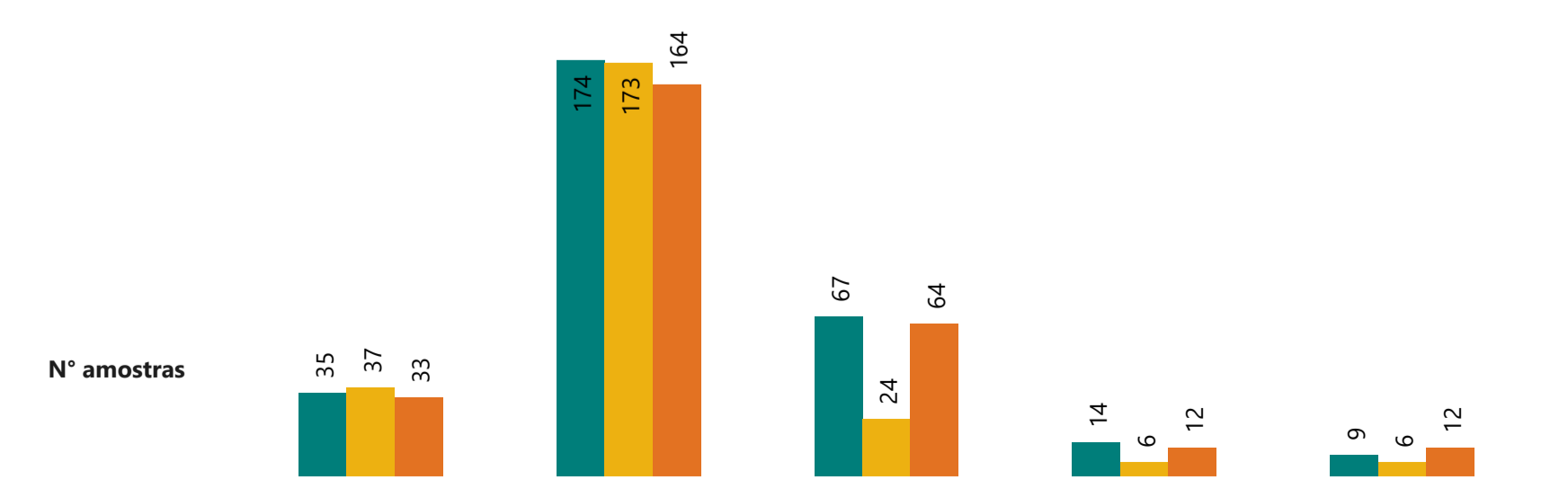
Parâmetro
Chumbo Total



Parâmetro
Cobalto Total



Parâmetro
Cobre Dissolvido



% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante

Parâmetro
Cromo Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

0% 0% 0%
Chuva/2019

1% 0% 0%
Chuva 2019/2020

0% 0% 0%
Chuva 2020/2021

0% 0% 0%
Chuva 2021/2022

0% 0% 0%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

174 174 164
Chuva 2019/2020

67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

Parâmetro
Ferro Dissolvido

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

77% 65% 70%
Chuva/2019

36% 77% 37%
Chuva 2019/2020

85% 92% 88%
Chuva 2020/2021

100% 83% 100%
Chuva 2021/2022

90% 100% 83%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

174 173 164
Chuva 2019/2020

67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

Parâmetro
Fósforo Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

80% 46% 82%
Chuva/2019

45% 64% 48%
Chuva 2019/2020

52% 42% 52%
Chuva 2020/2021

64% 50% 75%
Chuva 2021/2022

90% 83% 100%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

174 173 164
Chuva 2019/2020

67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

Parâmetro
Manganês Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

97% 54% 100%
Chuva/2019

98% 49% 89%
Chuva 2019/2020

100% 38% 98%
Chuva 2020/2021

100% 17% 100%
Chuva 2021/2022

100% 67% 100%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

174 173 164
Chuva 2019/2020

67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

Parâmetro
Mercúrio Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

0% 0% 0%
Chuva/2019

0% 0% 0%
Chuva 2019/2020

0% 0% 0%
Chuva 2020/2021

0% 0% 0%
Chuva 2021/2022

0% 0% 0%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

174 174 164
Chuva 2019/2020

67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

Parâmetro
Níquel Total

● PT-53 ● TT-05 ● PT-54

% violações

0% 0% 0%
Chuva/2019

0% 0% 0%
Chuva 2019/2020

0% 0% 0%
Chuva 2020/2021

0% 0% 0%
Chuva 2021/2022

0% 0% 0%
Chuva 2022/2023

N° amostras

35 37 33
Chuva/2019

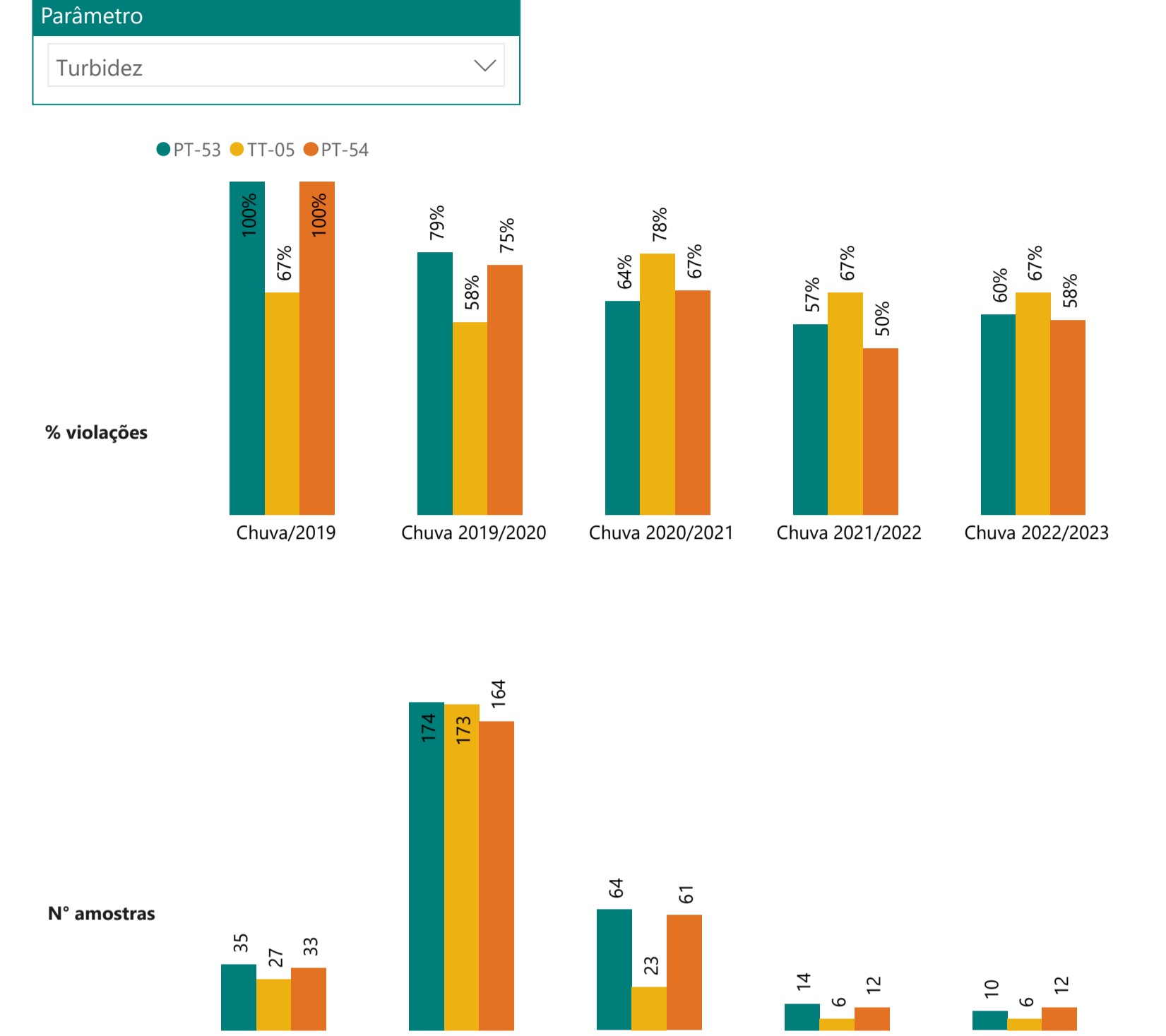
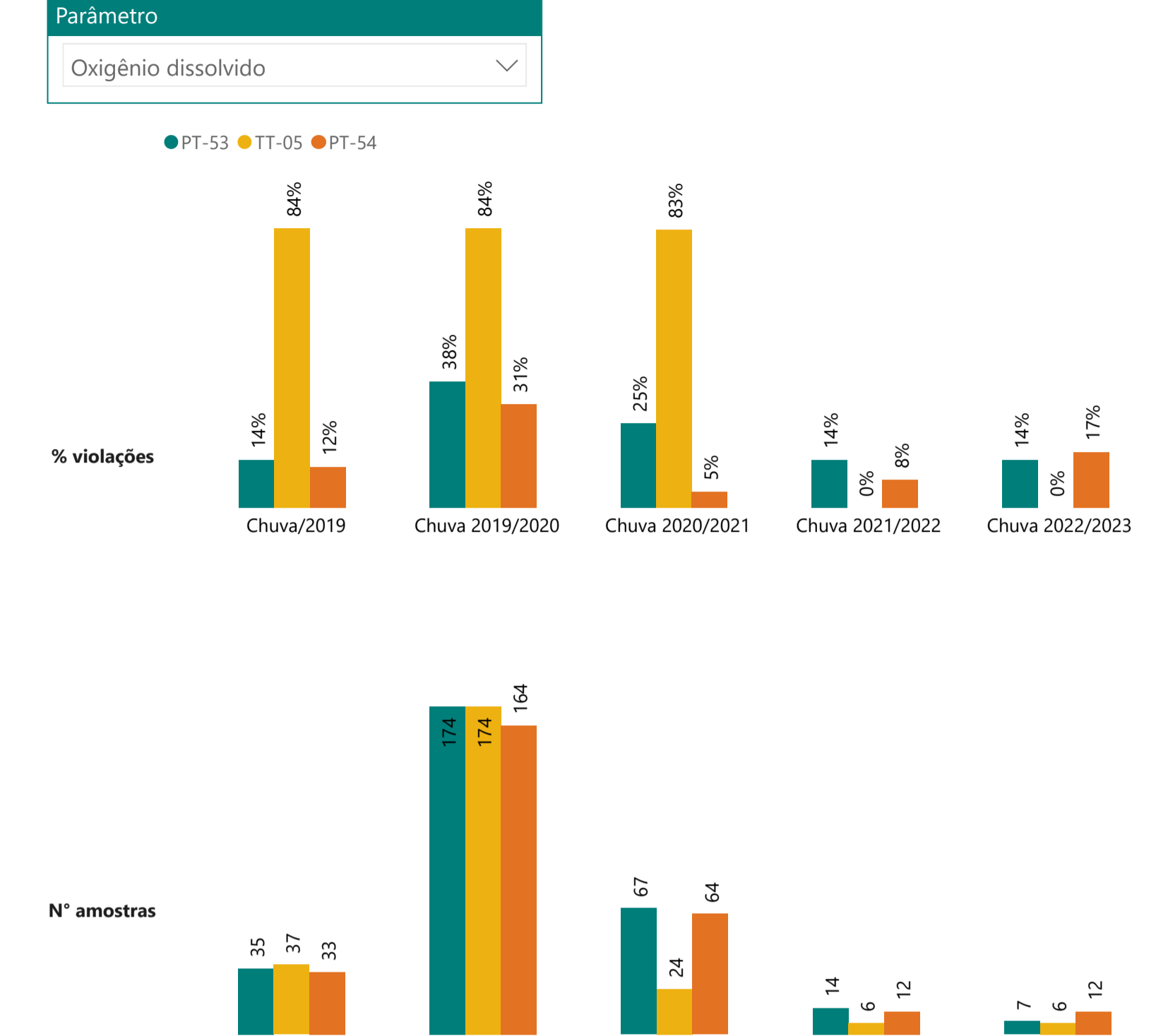
174 174 164
Chuva 2019/2020



67 24 64
Chuva 2020/2021

14 6 12
Chuva 2021/2022

10 6 12
Chuva 2022/2023

% Violações TT-05 (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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 200 / 373

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 chuva 2019/2020 (outubro/2019 a abril/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a abril/2021), chuva 2021/2022 (outubro/2021 a abril/2022) e chuva 2022/2023 (outubro/2022 a abril/2023) para o ponto TT-05 e para os pontos de montante (PT-53) e jusante (PT-54) localizados no rio Paraopeba. No **Anexo IV-B**, podem ser consultados os gráficos para os demais parâmetros.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do Igam (BP072), observou-se que os teores medianos nos pontos de montante e jusante, foram, em geral, próximos ou superiores à condição do *baseline* sazonal para os parâmetros majoritários e próximos ou inferiores para os demais parâmetros analisados. Além disso, para grande parte dos parâmetros analisados, o comportamento dos teores do ponto de jusante (PT-54) permaneceu próximo ao indicado para o ponto de montante da confluência (PT-53). Ressalta-se que, de modo geral, observam-se resultados medianos do *baseline* inferiores aos valores máximos permitidos segundo a classe de enquadramento para os parâmetros no período sazonal analisado.

Em relação ao TT-05, percebe-se comportamento semelhante aos pontos de montante e jusante, e, portanto, com as mesmas inferências diante o *baseline*, para a maioria dos parâmetros, com maior diferenciação para Manganês total e Oxigênio dissolvido, principalmente nos primeiros ciclos de chuva.

As concentrações medianas de Alumínio dissolvido em todos os pontos apresentaram elevação ao longo dos períodos chuvosos analisados, com uma menor dispersão dos resultados nos dois últimos ciclos (2021/2022 e 2022/2023). Comparativamente, nota-se manutenção da mediana entre esses dois períodos no PT-53, aumento no TT-05 e redução no PT-54.

Para o Ferro dissolvido, as concentrações nos pontos oscilaram ao longo dos anos, observando-se, nos três últimos períodos, aumento (chuva 2020/2021 para chuva 2021/2022) com posterior redução (chuva 2021/2022 para chuva 2022/2023) das medianas. Nota-se ainda que, de modo geral, esses três ciclos apresentaram os maiores valores da série, com uma menor dispersão dos dados e valores moderadamente superiores ao *baseline* sazonal (BP072). Ademais, mais de 50% dos resultados ficaram acima do VMP (0,3 mg/L) para os pontos e períodos analisados (exceto na chuva 2019/2020 nos PT-53 e PT-54).

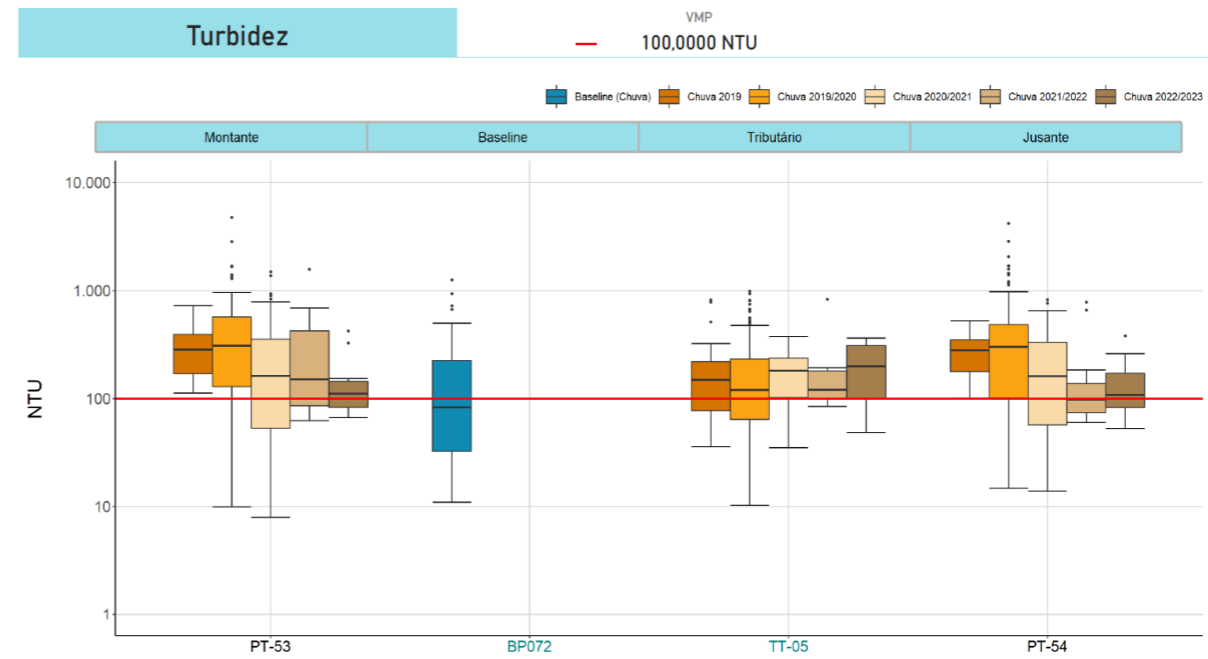
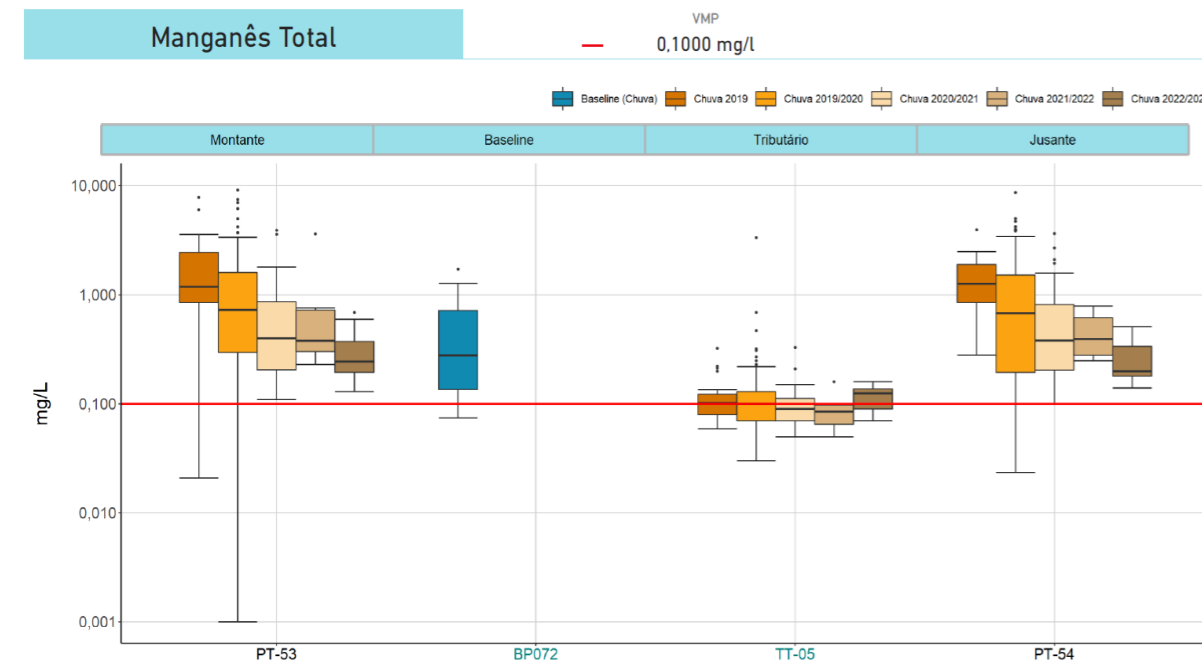
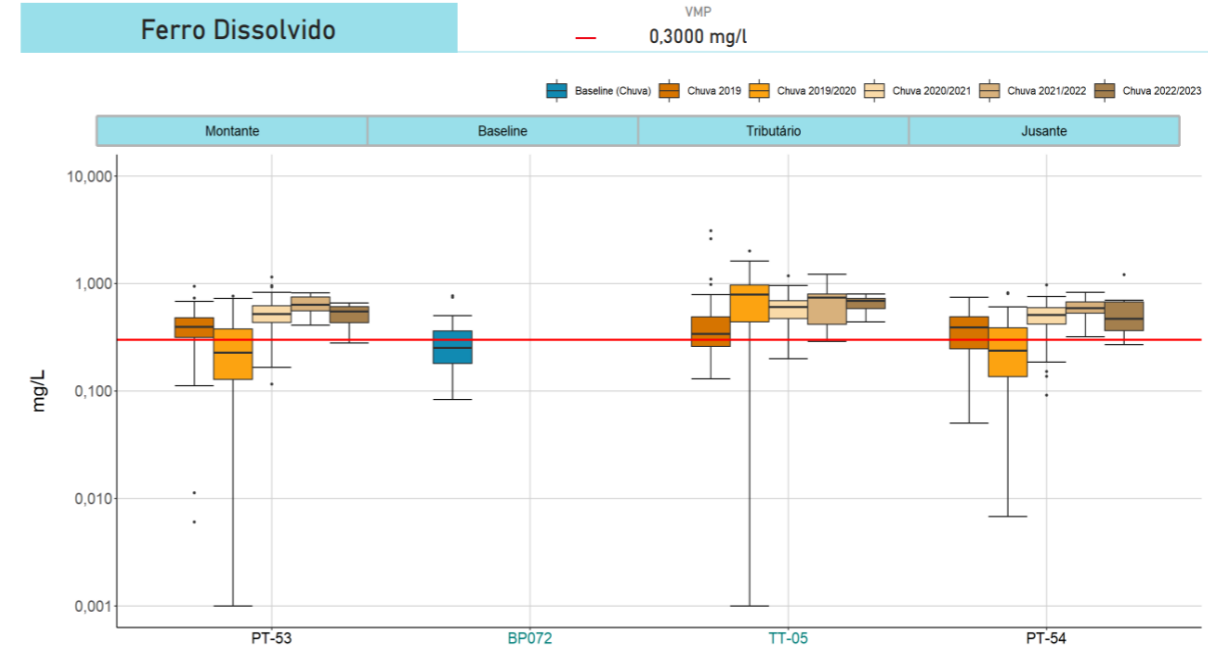
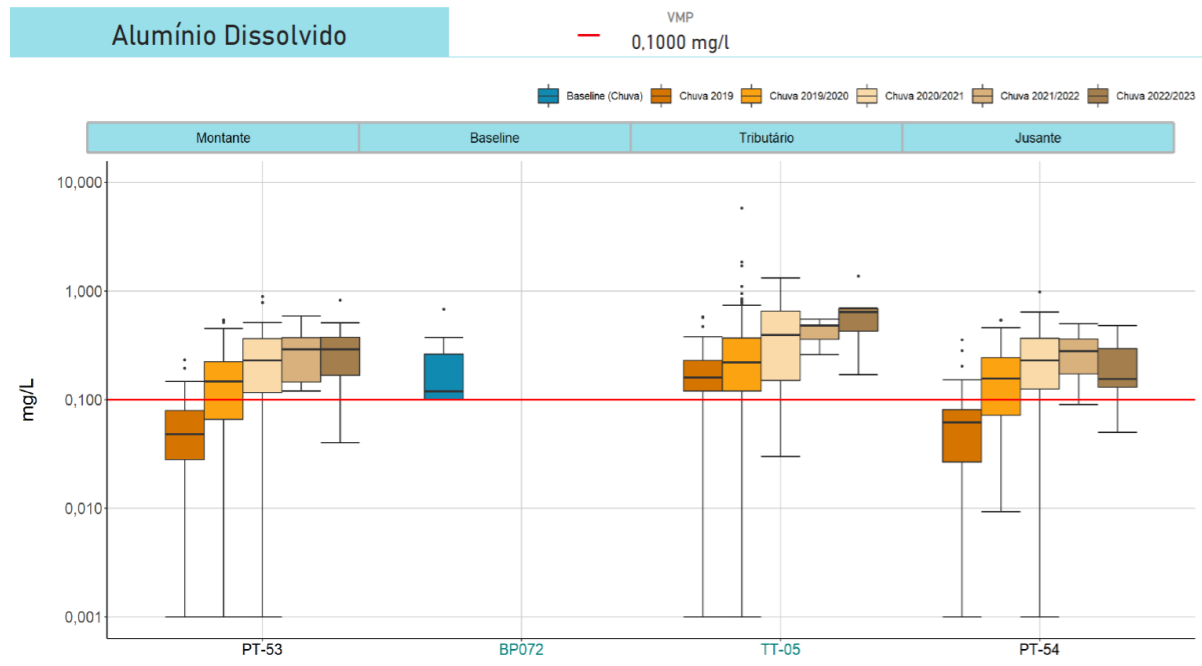
Já para o Manganês total, comportamento contrário ao Alumínio total foi observado, uma vez que se nota um decréscimo nos valores ao longo dos períodos, principalmente nos pontos localizados no Paraopeba (PT-53 e PT-54). Desse modo, nesses pontos, o ciclo atual (2022/2023) foi o que apresentou, de modo geral, as menores concentrações desse analito. Em relação ao ponto do tributário TT-05, percebe-se uma constância nos valores medidos ao longo dos anos, ainda que a mediana do ciclo de referência (chuva 2022/2023) tenha ficado um pouco acima das demais. Além disso, nos pontos PT-53 e PT-54, os resultados ficaram majoritariamente acima do VMP (0,1 mg/L) e do respectivo *baseline* de chuva (BP072).

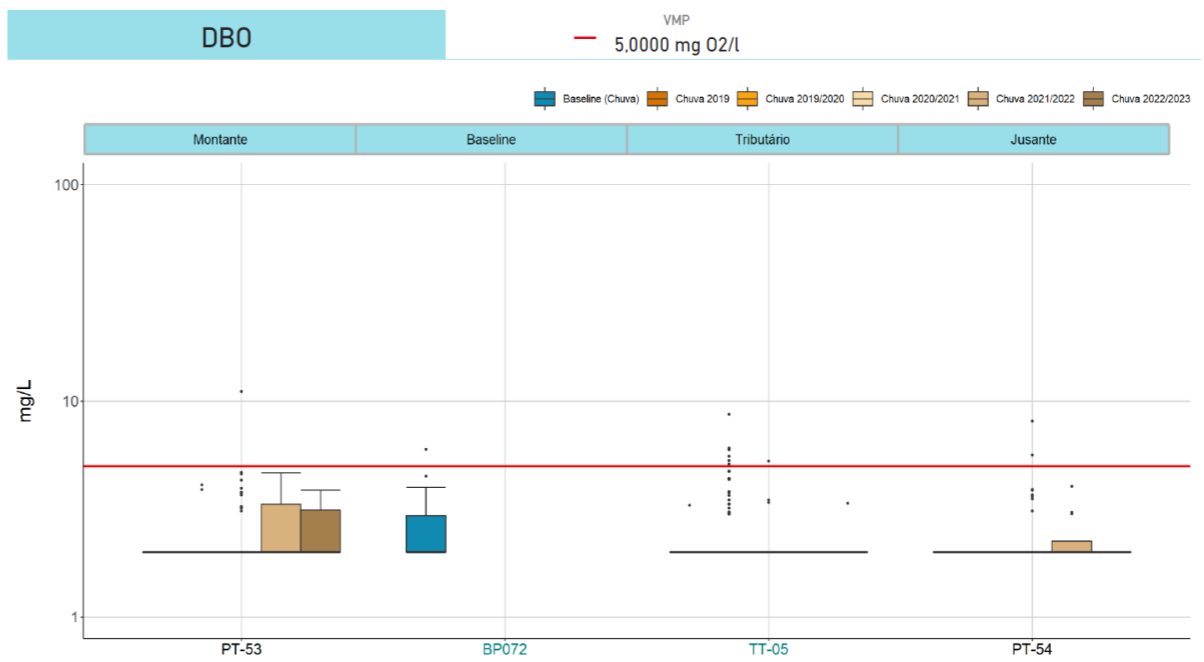
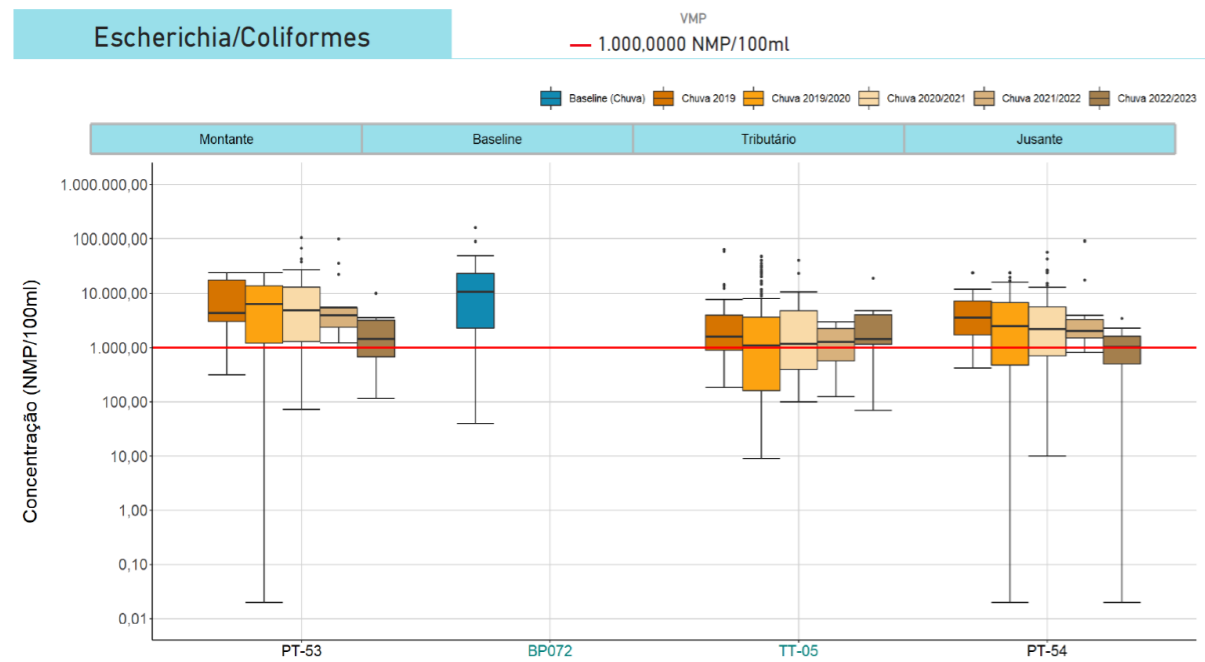
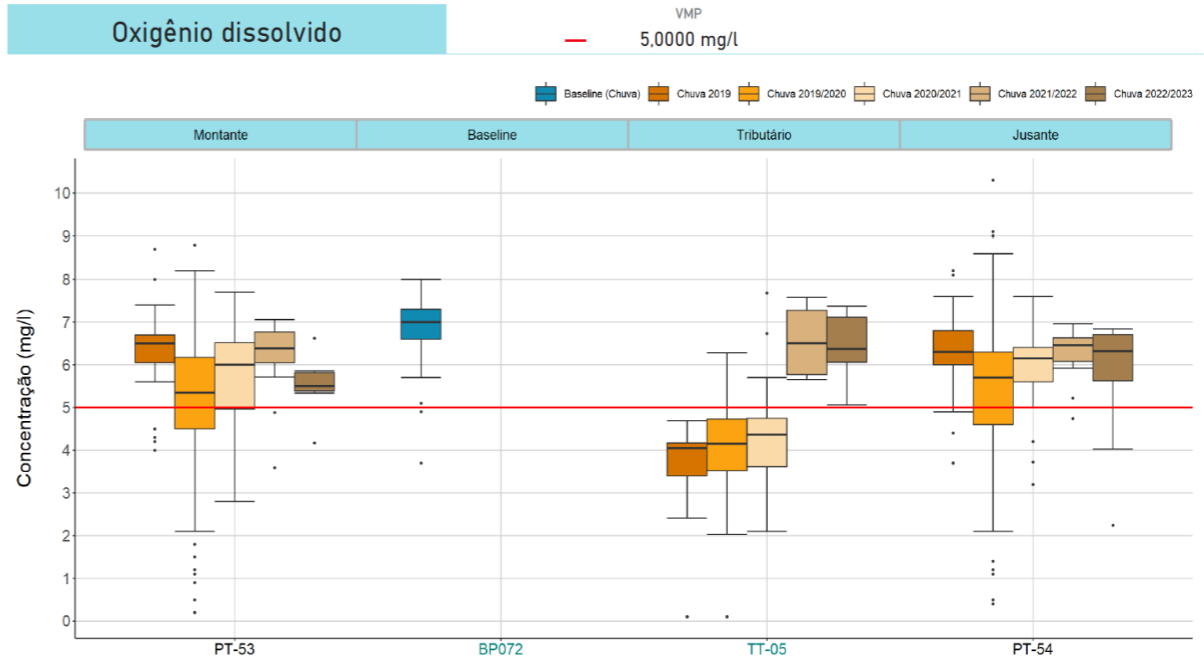
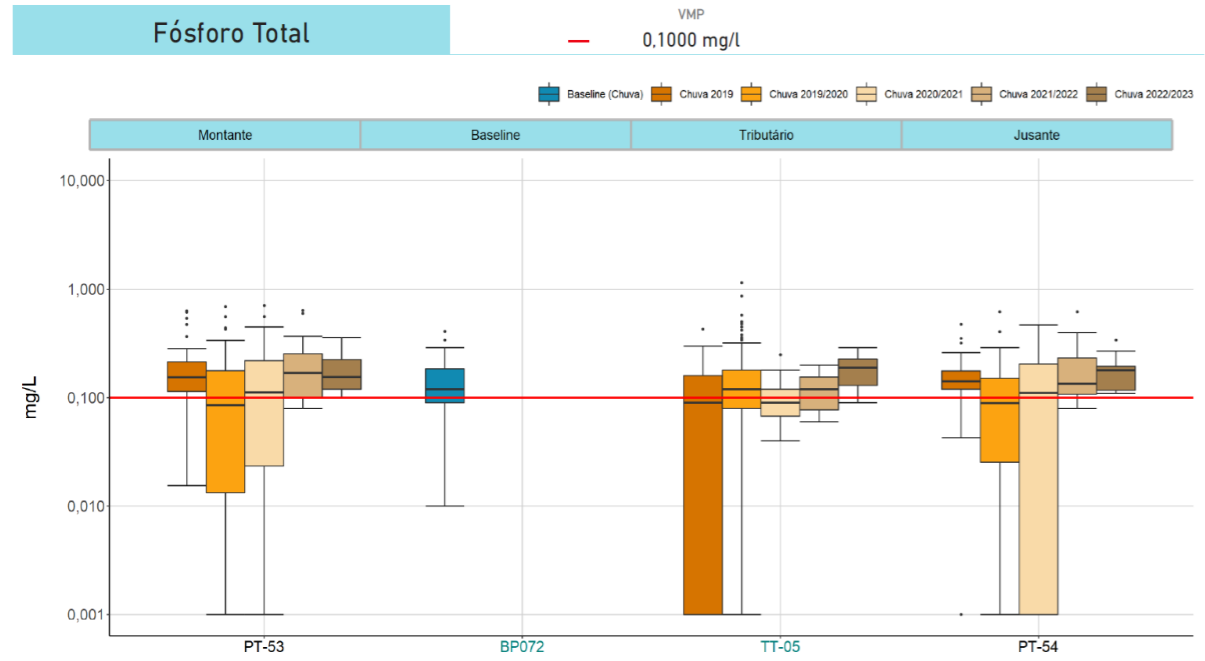
Para Turbidez, notou-se oscilação dos valores entre os períodos para todos os pontos de monitoramento, ainda que a diferença entre os ciclos tenha sido menor no TT-05. Comparativamente ao ciclo anterior, nota-se clara redução e dispersão dos resultados no PT-53 em relação ao período de 2021/2022. Já para o TT-05 e PT-54 as medianas sofreram elevação. De modo geral, os resultados ficaram majoritariamente acima do VMP (100 NTU).



Para Fósforo total, as concentrações oscilaram entre os períodos considerados e entre os pontos analisados. Considerando os últimos ciclos de chuva, nota-se uma leve redução da mediana entre 2021/2022 e 2022/2023 no PT-53 e um aumento no TT-05 e PT-54, semelhante ao observado para Turbidez. Nos três pontos os resultados medianos foram próximos ou superiores ao *baseline* sazonal e ao VMP (0,1 mg/L).

Para *E. coli*/Coliformes termotolerantes, teores um pouco mais elevados foram verificados no ponto de montante, ainda que temporalmente, de modo geral, o comportamento tenha sido semelhante entre os pontos de monitoramento, exceto quando comparado exclusivamente os dois últimos ciclos, com redução de medianas para os pontos de montante e jusante e aumento no tributário. No PT-53, os resultados permaneceram, em geral, em mais de 75% dos casos, acima do VMP (1000 NMP/100 mL), enquanto para o TT-5 e PT-54 pelo menos 50% dos dados apresentaram desvio para cada período. Para DBO, nota-se desvios pontuais do VMP para toda a malha amostral e série de dados. Nos três pontos, os resultados foram pouco variáveis, destacando-se o PT-53 nos dois últimos períodos chuvosos com condições próximas ao *baseline* sazonal (mas ainda abaixo do VMP), enquanto os demais dados foram próximos os iguais ao LQ do método analítico. Ainda assim, piores condições de oxigenação foram identificadas no ribeirão das Abóboras, principalmente nos anos de 2019, 2019/2020 e 2020/2021, quando mais de 75% das concentrações ficaram abaixo do limite legal (5 mg/L) e quase totalmente abaixo dos valores de *baseline*. Comparativamente a maior diferença entre os valores obtidos nos dois últimos ciclos se deu no PT-53, com redução de grande parte dos resultados no ciclo de 2022/2023.

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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 204 / 373

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

Tabela 9.3.3-1- Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras

PT-53 (Mont.) X PT-54 (Jus.)	Chuv. 2019	Chuv. 2019/2020	Chuv. 2020/2021	Chuv. 2021/2022	Chuv. 2022/2023
Manganês Total	0,727	0,156	0,845	0,857	0,620
Ferro Dissolvido	0,764	0,686	0,438	0,487	0,974
Alumínio Dissolvido	0,722	0,327	0,773	0,643	0,306
Turbidez	0,589	0,402	0,824	0,316	0,974
Fósforo Total	0,615	0,674	0,961	0,897	0,868
DBO	1,000	0,172	0,421	0,489	0,064
EColi / ColiTermot.	0,251	0,000	0,014	0,122	0,338
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,000	0,236	0,259
Oxigênio Dissolvido	0,708	0,111	0,335	0,877	0,118
Sólidos Suspensos T.	0,708	0,485	0,789	0,440	0,921

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

Nos períodos de chuva analisados, percebe-se que apenas parâmetros de aspecto sanitário apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre o ponto de montante e o de jusante, sendo eles *E.Coli/Coliformes* termotolerantes e Nitrogênio amoniacal. Por outro lado, para os metais majoritários (Ferro, Alumínio e Manganês) e para Turbidez em nenhum período houve indicativo de diferenças significativas nas comparações estabelecidas, e, dessa forma, não há evidências 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.

No **Gráfico 9.3.4-1**, podem ser observados os percentuais de violação para os períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 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, chuva 2022/2023, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação de Alumínio dissolvido, Chumbo total, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Oxigênio dissolvido e Turbidez, sendo que, para todos os parâmetros, os percentuais foram superiores no tributário em relação aos pontos de montante e jusante à confluência, inclusive para Chumbo total que não teve desvios no PT-57 bem como no CE-02. Analisando de forma espacial, dentre esses parâmetros, as violações foram mais expressivas de forma majoritária no ponto de jusante em relação ao de montante, exceto para Alumínio dissolvido. Sendo assim, de acordo com o panorama verificado, infere-se que o tributário ribeirão dos Gomes/das Almas, representado pelo ponto CE-01, impacta na qualidade da água do rio Paraopeba após a confluência (CE-02).

Estabelecendo uma avaliação temporal, percebe-se que, embora de forma moderada, houve atenuação do percentual de desvios na chuva 2022/2023 em relação à chuva 2021/2022. Entretanto, de modo geral, os percentuais de violação oscilaram entre os períodos chuvosos comparados, mantendo-se com certa estabilidade.

Gráfico 9.3.4-1 Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 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

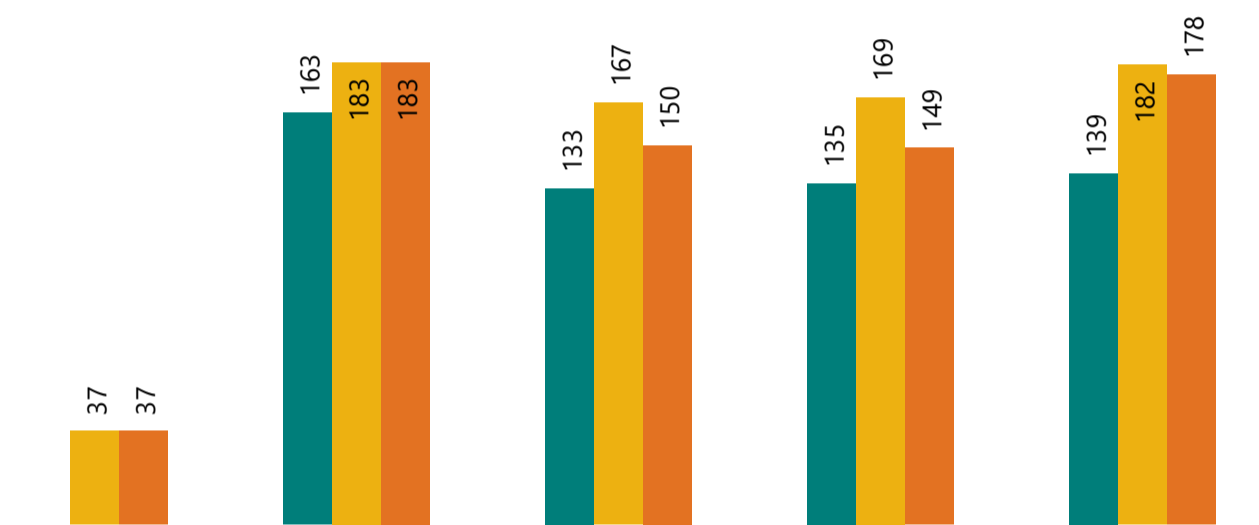
Parâmetro
Alumínio Dissolvido

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



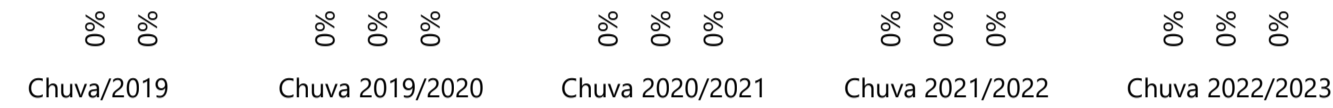
N° amostras



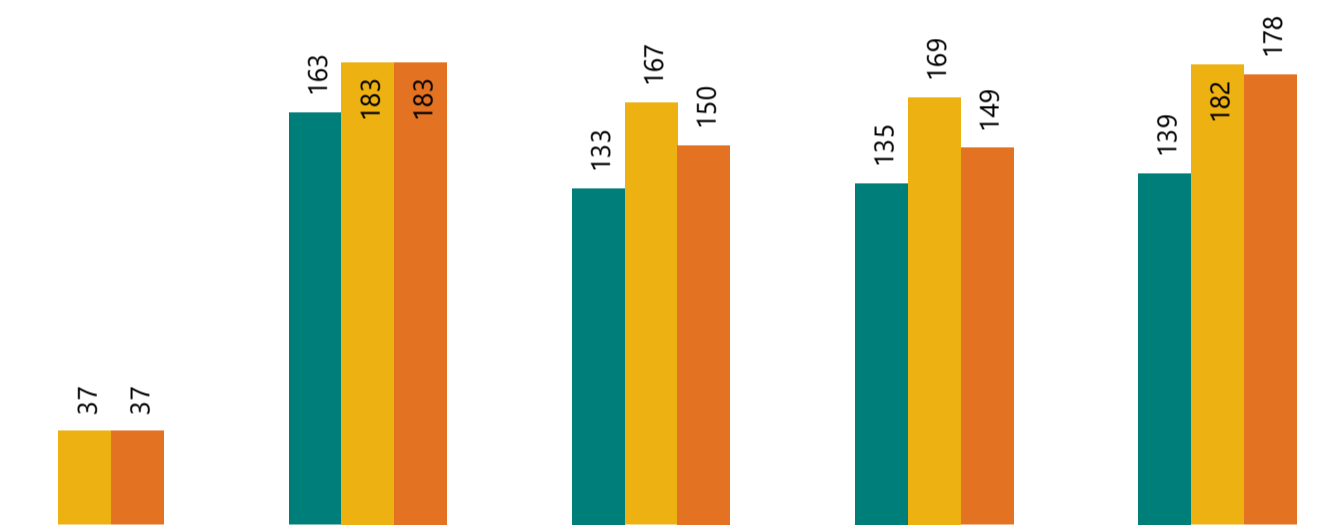
Parâmetro
Arsênio Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



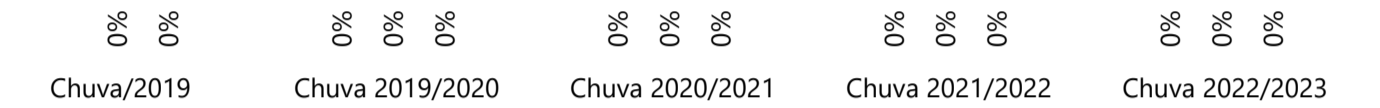
N° amostras



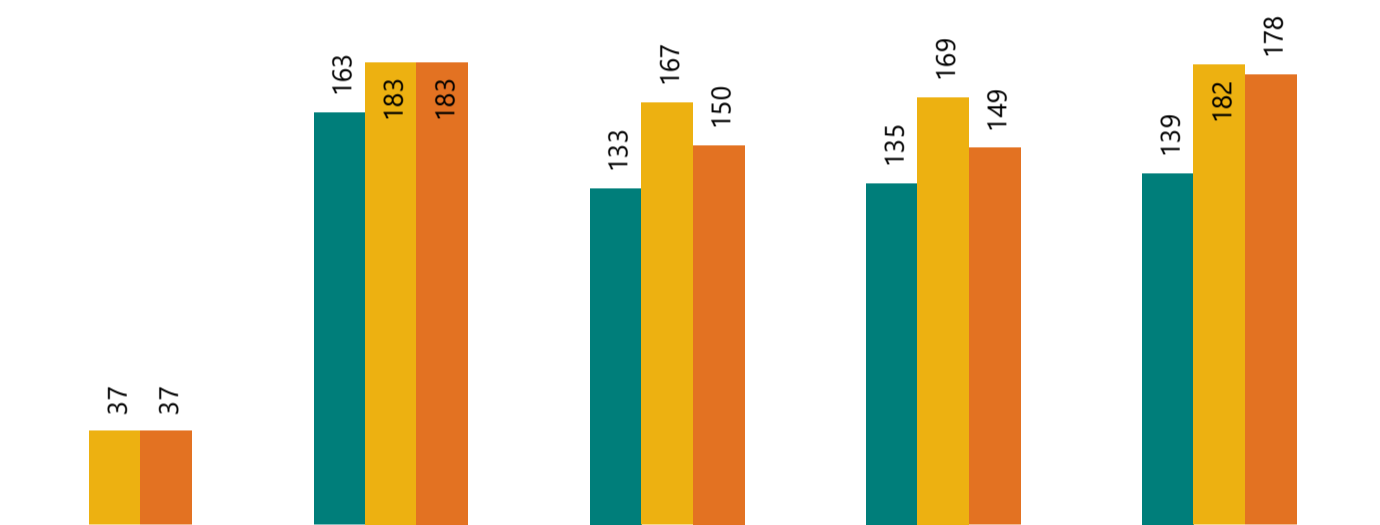
Parâmetro
Cádmio Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



N° amostras



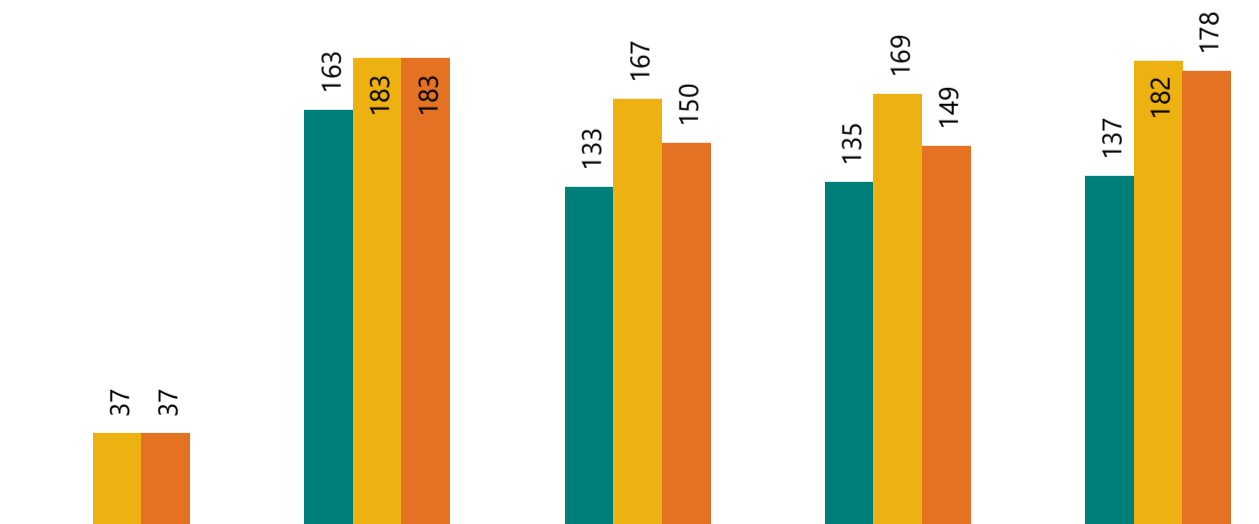
Parâmetro
Chumbo Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



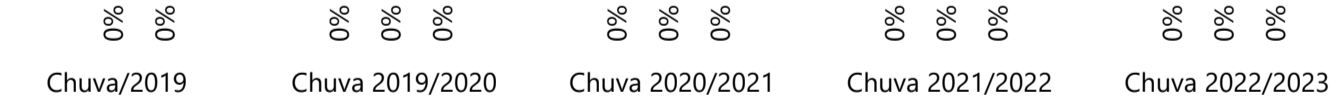
N° amostras



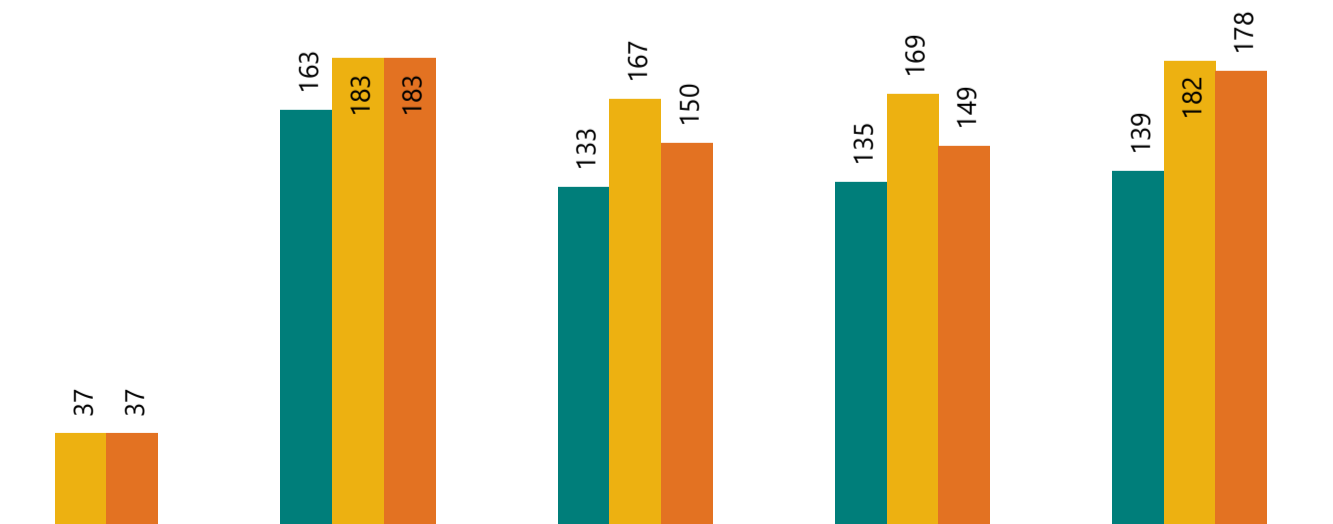
Parâmetro
Cobalto Total

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

% violações



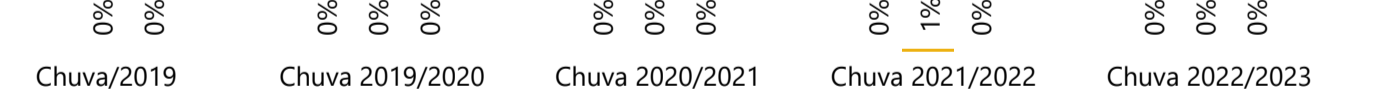
N° amostras



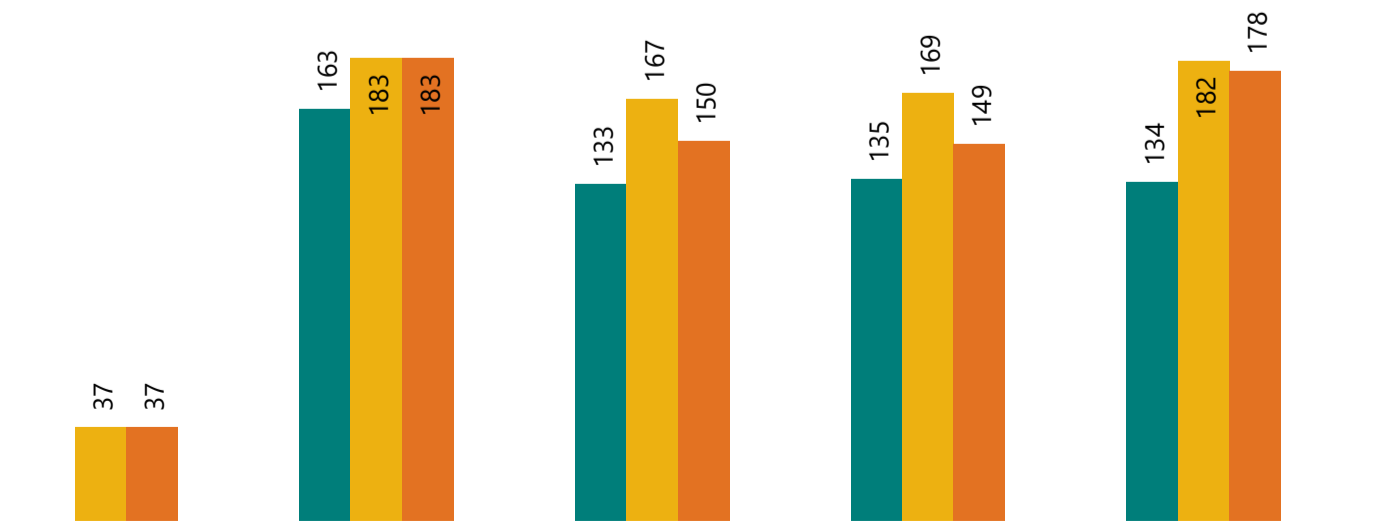
Parâmetro
Cobre Dissolvido

● PT-57 ● CE-01 ● CE-02

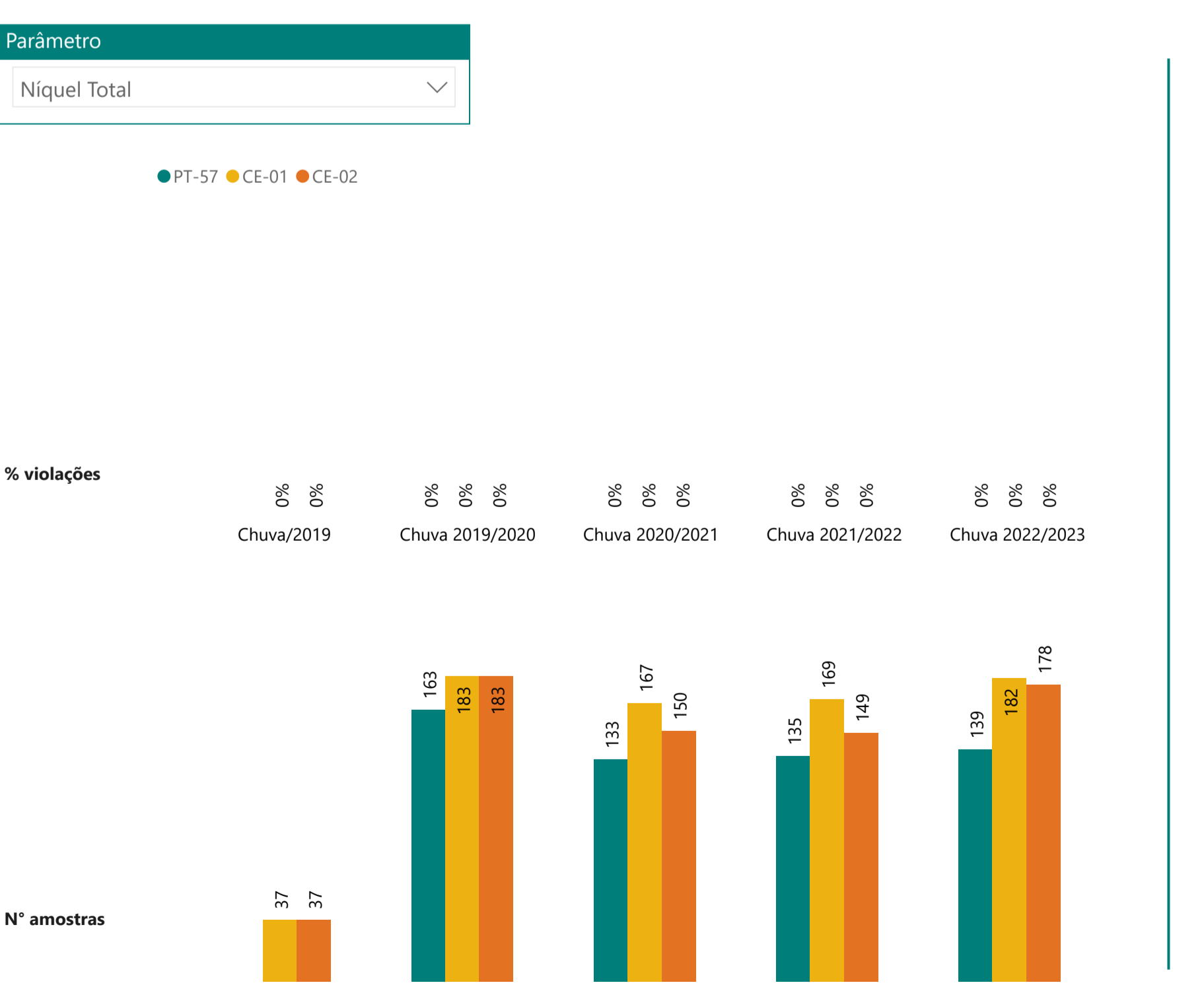
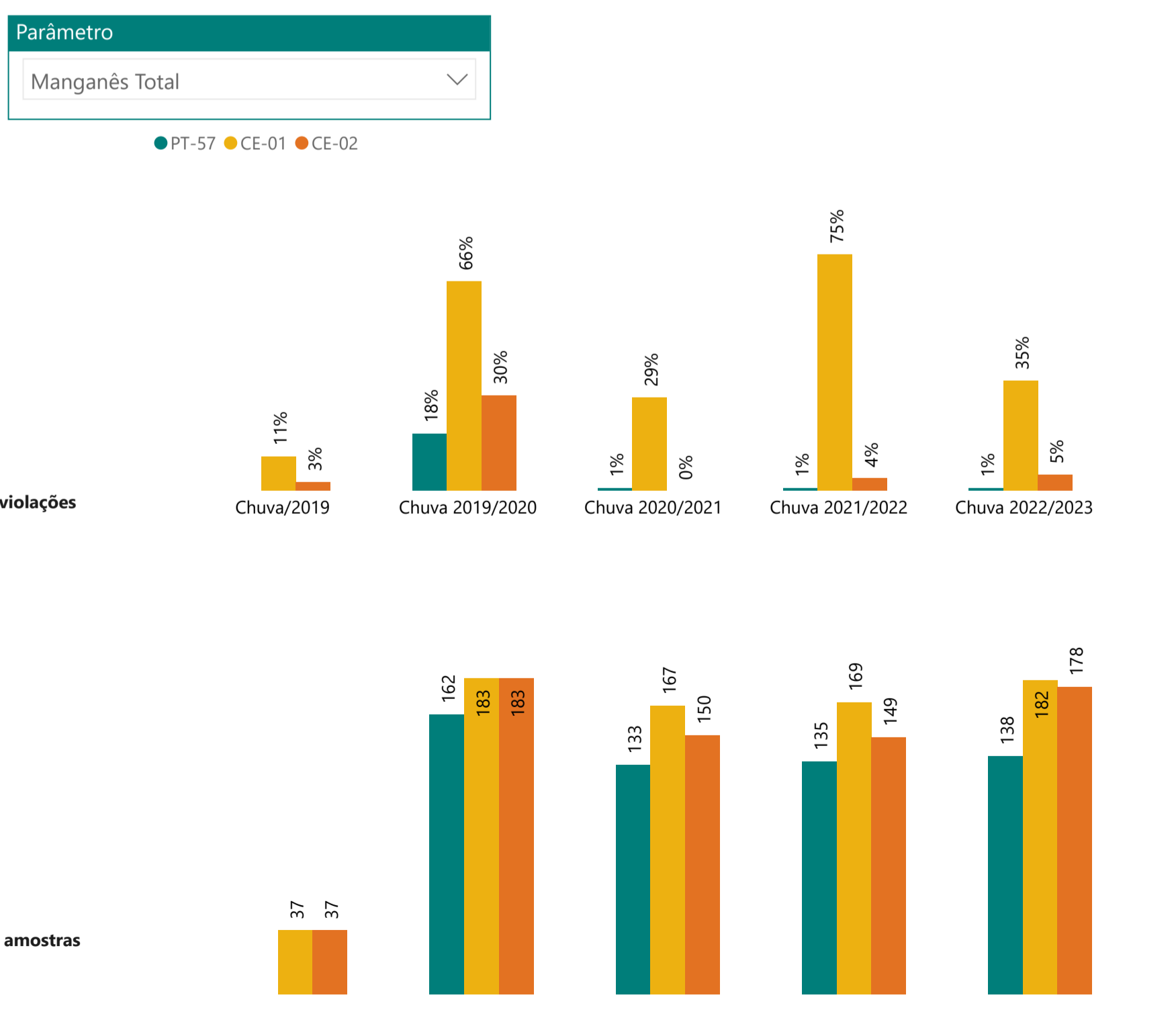
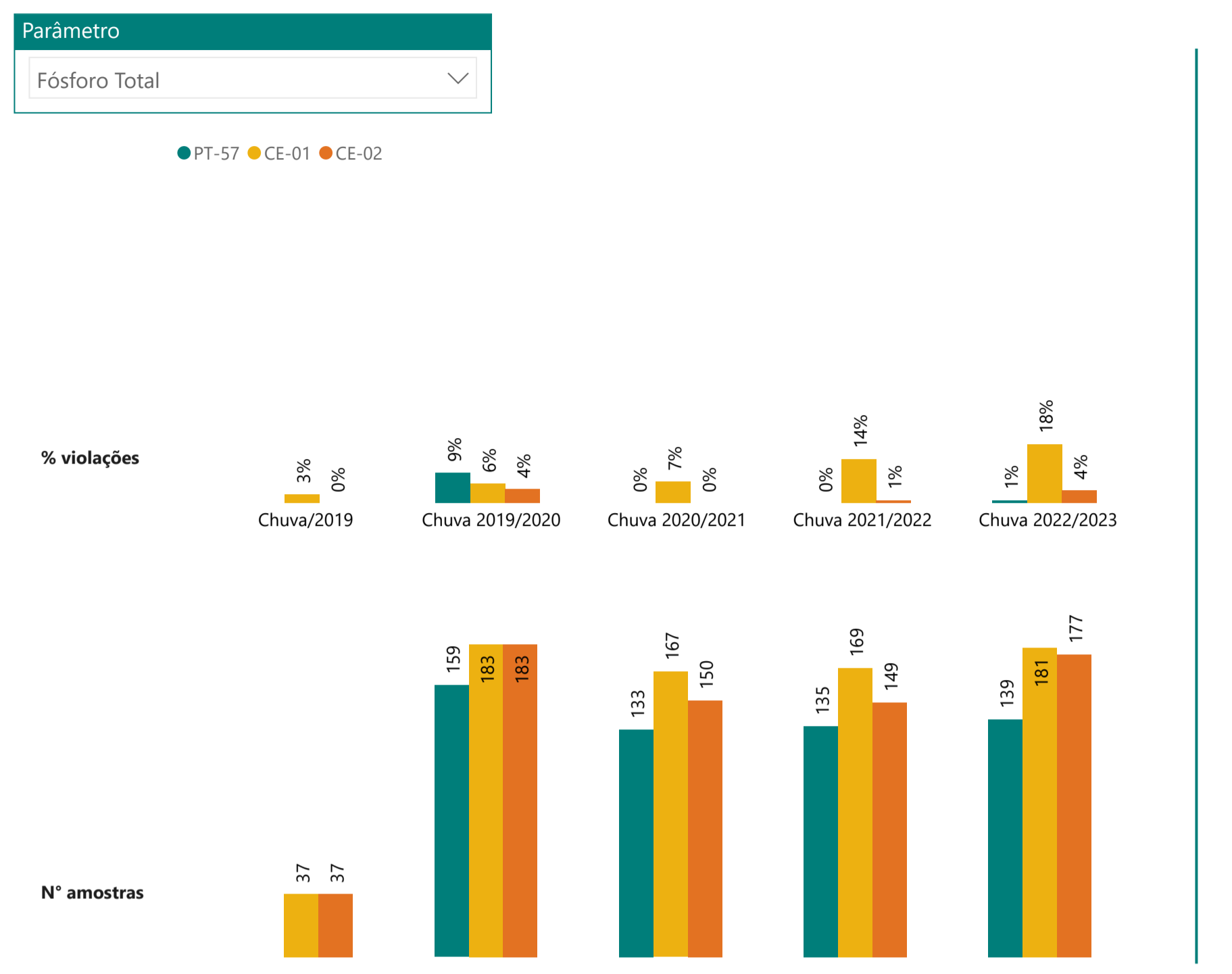
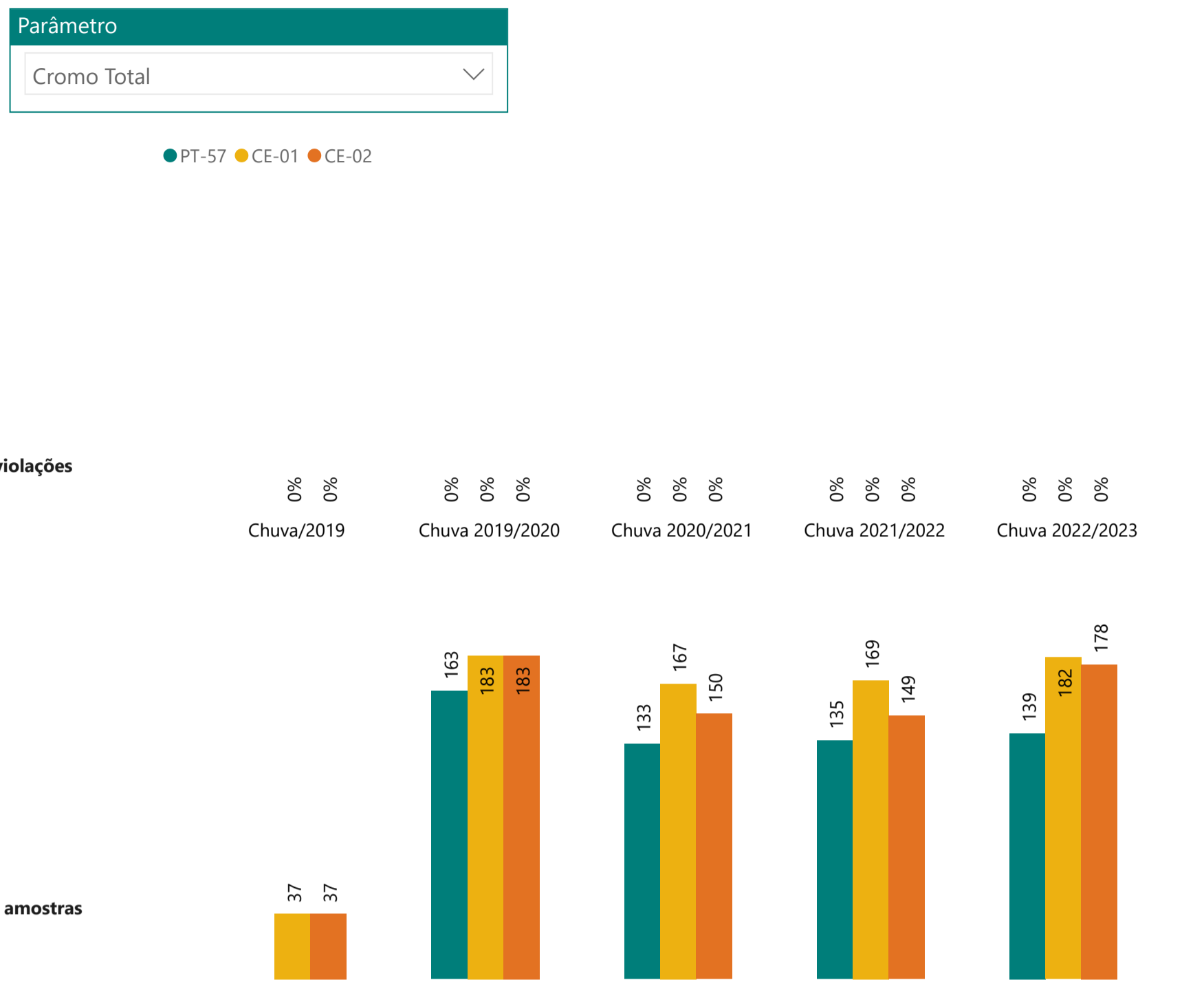
% violações



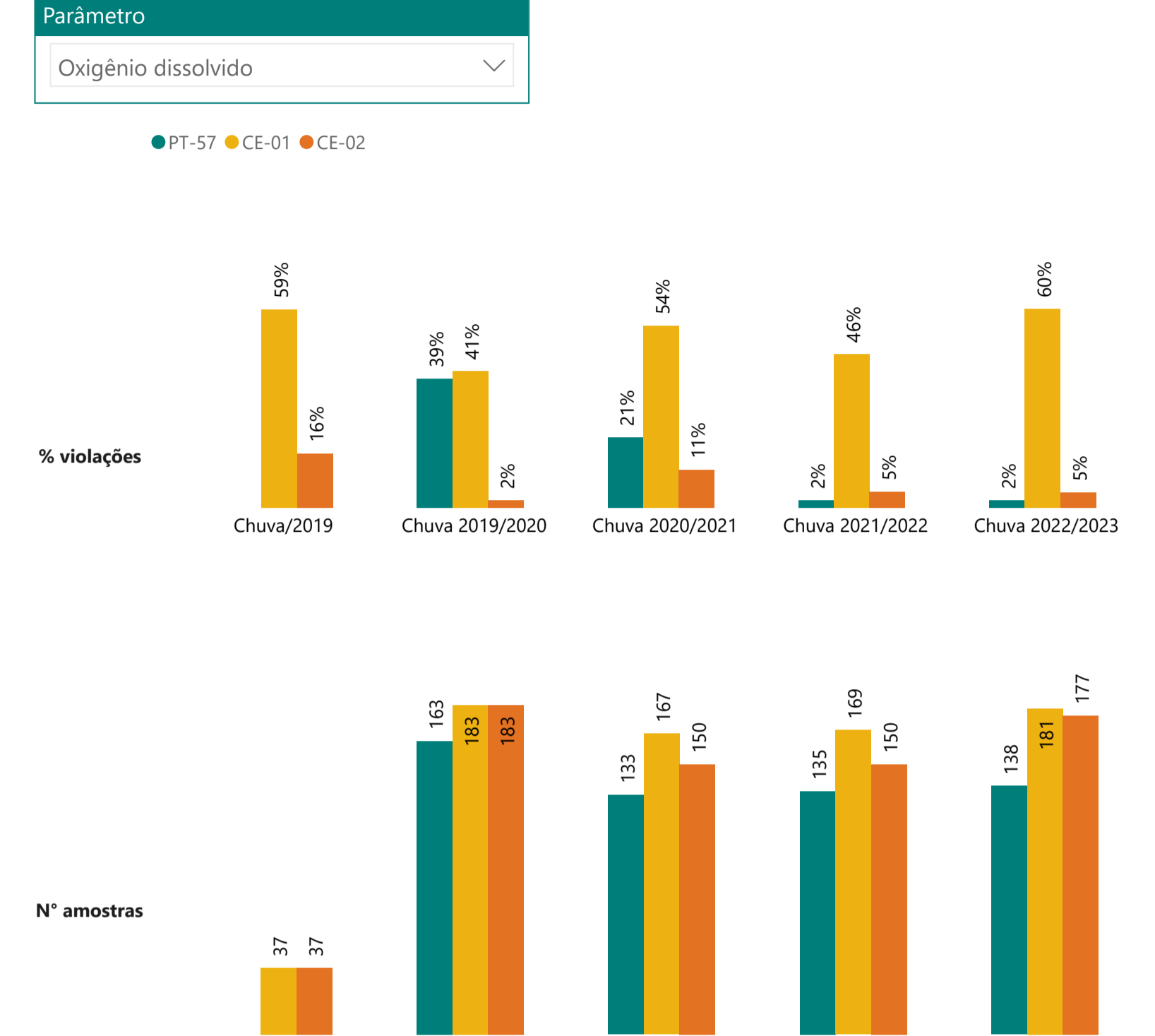
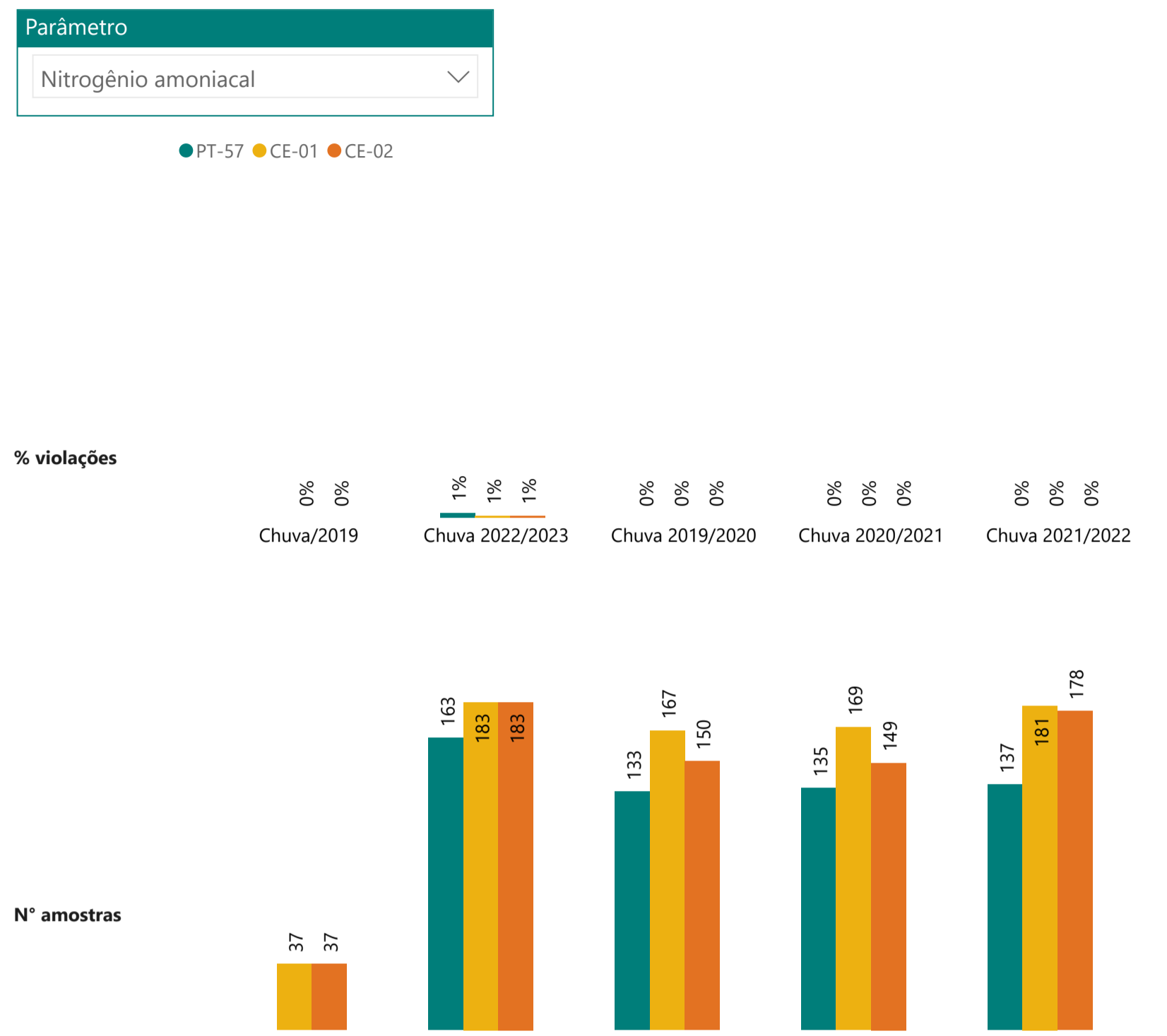
N° amostras





% Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante



% 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 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 209 / 373



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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 para o ponto CE-01 e para os pontos de montante (PT-57) e jusante (CE-02) localizados no rio Paraopeba. No **Anexo IV-B**, podem ser consultados os gráficos para os demais parâmetros.

De modo geral, nota-se comportamento e medianas semelhantes para os parâmetros majoritários entre os pontos de montante e jusante e distinto desses em relação ao tributário, o qual apresentou medianas superiores (exceto para Alumínio dissolvido, que apresentou condições similares nos três pontos). Para os demais parâmetros, essa condição variou, conforme será descrito nos próximos parágrafos. Além disso, nos três pontos monitorados, em sua maior parte, os teores medianos foram próximos ou superiores ao *baseline* do Igam (BP099) para os majoritários e próximos ou inferiores para os demais parâmetros analisados.

Para Alumínio dissolvido, ao longo dos períodos de chuva monitorados, nota-se, de modo geral, um acréscimo nas concentrações para os três pontos monitorados. Especificamente no ribeirão dos Gomes, percebe-se leve redução entre 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. Especialmente, percebe-se medianas próximas entre os pontos, principalmente entre CE-01 e CE-02 ao longo dos períodos chuvosos, até o ciclo de 2021/2022. No último ciclo, no entanto, nota-se no CE-01 medianas inferiores àquelas observadas nos demais pontos. Ademais, a maior parte dos resultados permaneceu acima do VMP (0,1 mg/L), exceto para o período chuvoso de 2019 (em todos os pontos em que os *Boxplots* foram gerados) e para 2019/2020 (no PT-57).

Para Manganês total, nos pontos do rio Paraopeba, notou-se decréscimo das concentrações deste analito, se estabilizando nos últimos períodos, com o ciclo atual (2022/2023) com concentrações próximas ao ciclo anterior (2021/2022). Com exceção de alguns resultados pontuais, não houve superação do VMP (0,1 mg/L) e, de modo geral, as medianas calculadas em ambos os pontos ficaram abaixo do *baseline* sazonal. No ribeirão dos Gomes, os resultados deste analito oscilaram entre os períodos considerados e foram, em sua maior parte, superiores em relação aos dos pontos localizados no rio Paraopeba. As medianas observadas ao longo dos anos foram próximas ou superiores ao *baseline* sazonal e a maior parte dos desvios ao VMP (0,1 mg/L) ocorreu nos períodos chuvosos de 2019/2020 e 2021/2022, ainda que em 2020/2021 e 2022/2023 pelo menos 25% dos resultados também tenham violado a legislação.

Para Ferro dissolvido, os teores medianos para os pontos de montante e de jusante localizados no rio Paraopeba apresentaram-se mais próximos e os dados tiveram o mesmo comportamento entre os diferentes períodos de chuva comparados, com ampla dispersão dos resultados obtidos no ciclo chuvoso de 2022/2023. No ribeirão dos Gomes, assim como observado para o Manganês total, os resultados deste analito oscilaram entre os períodos considerados e foram, em sua maior parte, superiores em relação aos dos pontos localizados no rio Paraopeba. Ao contrário dos pontos localizados no rio principal, observa-se baixa dispersão das concentrações medidas em 2022/2023. As medianas observadas ao longo dos anos nos três pontos foram superiores ao

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	Folha 210 / 373

baseline sazonal e a maior parte dos dados apresentaram desvios ao VMP (0,3 mg/L), principalmente no CE-01.

Para Turbidez, os teores medianos entre os períodos de chuva, de modo geral, foram próximos entre si em relação a cada ponto de monitoramento, principalmente nos CE-01 e CE-02. Especificamente no PT-57 as medianas nos últimos períodos sofreram redução. Espacialmente, os valores medianos foram próximos entre os pontos localizados no rio Paraopeba e superiores no CE-01, no qual em todos os períodos sazonais ficaram acima do VMP (40 NTU) e da mediana calculada para o *baseline* sazonal. Violações em menor magnitude também foram observadas nos pontos PT-57 e CE-02, que apresentaram condições próximas ao *baseline*.

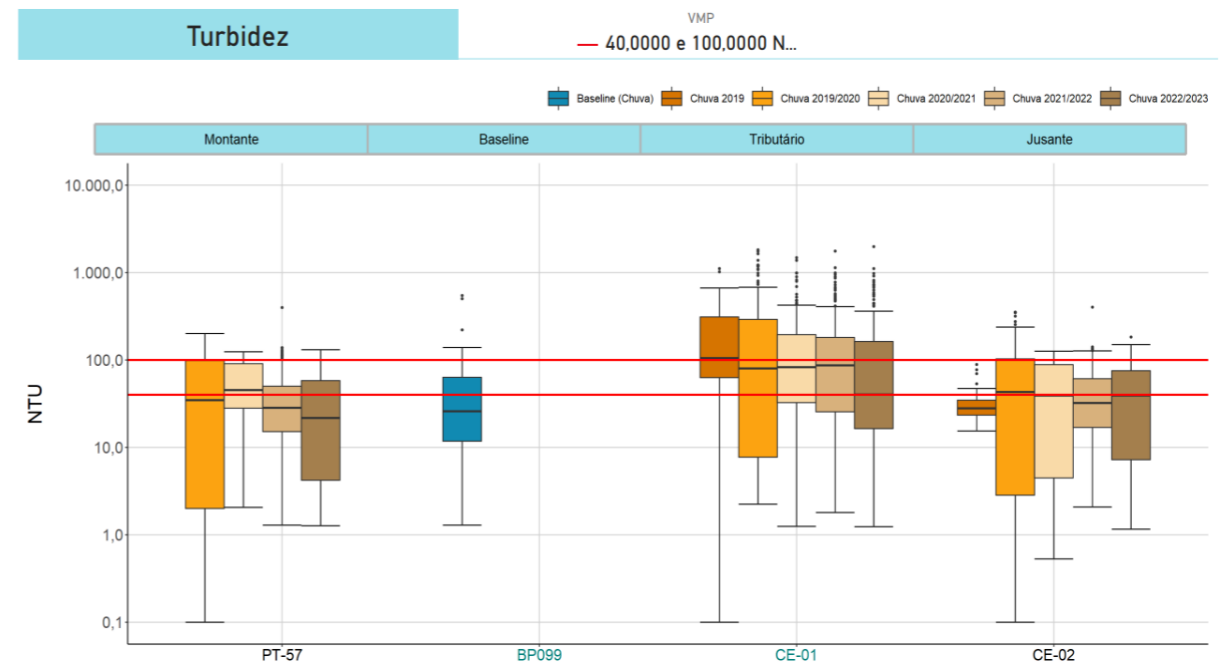
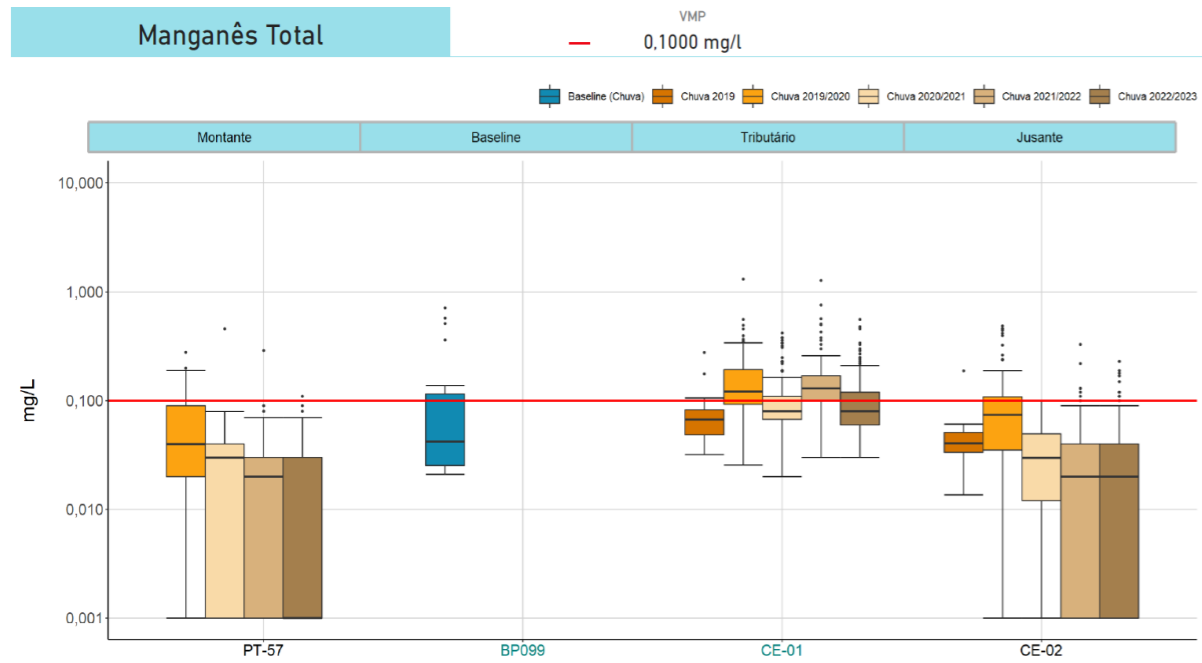
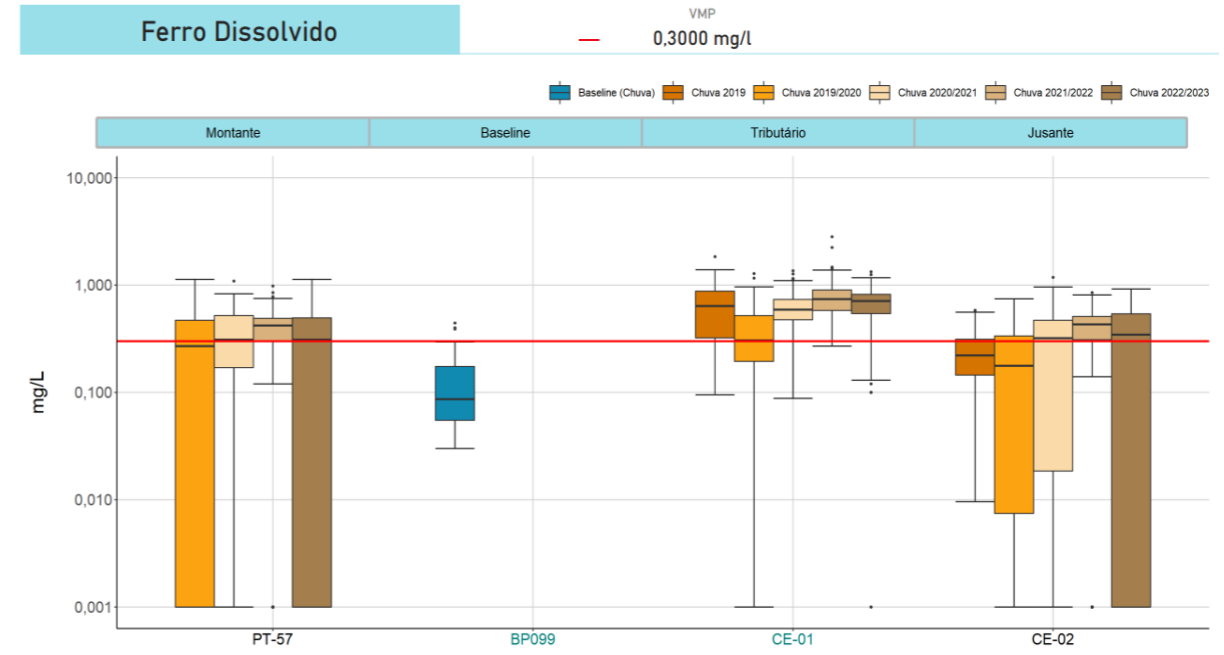
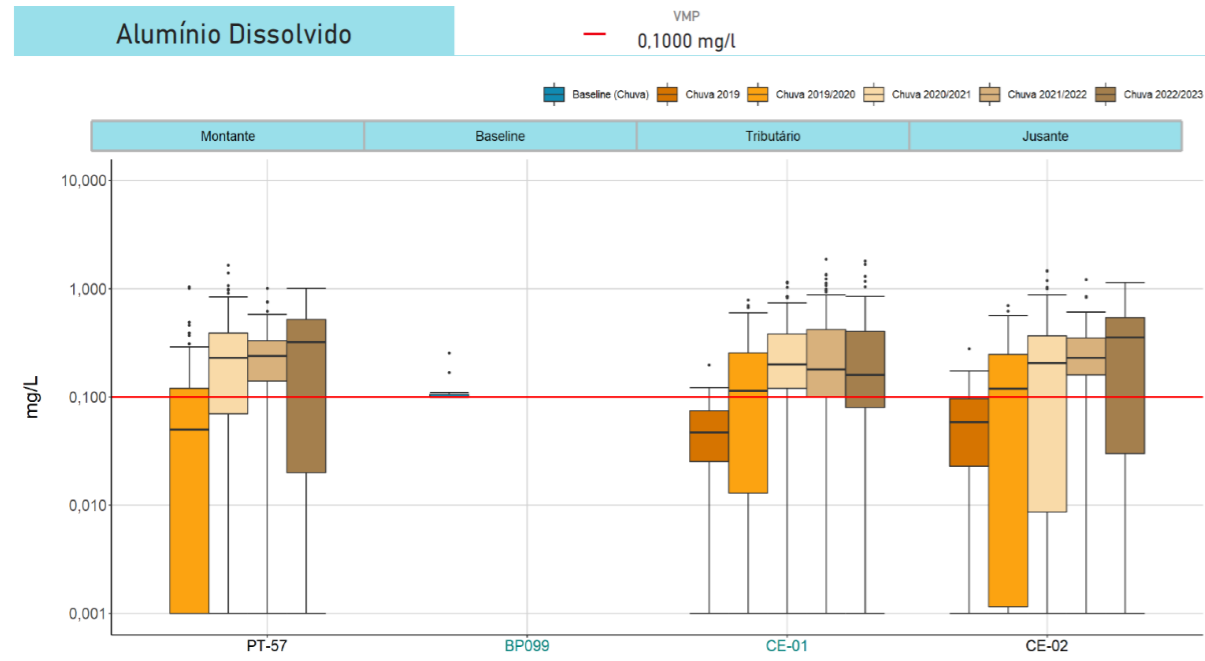
Para Fósforo total, nota-se comportamento semelhantes entre o CE-01 e seu ponto a jusante, demonstrando possível influência do tributário na qualidade da água do rio Paraopeba em relação ao referido parâmetro. Nesses pontos, nota-se menor dispersão dos dados e aumento das medianas nos dois últimos períodos chuvosos em relação aos anteriores, ficando acima da mediana calculada no *baseline* sazonal especificamente nesses ciclos. Para o PT-57 os dados do ciclo de 2022/2023 apresentaram alta variabilidade e a sua mediana ficou acima das obtidas para os demais períodos analisados e da mediana de *baseline*. Com exceção de alguns resultados, as concentrações deste analito permaneceram abaixo do limite legal.

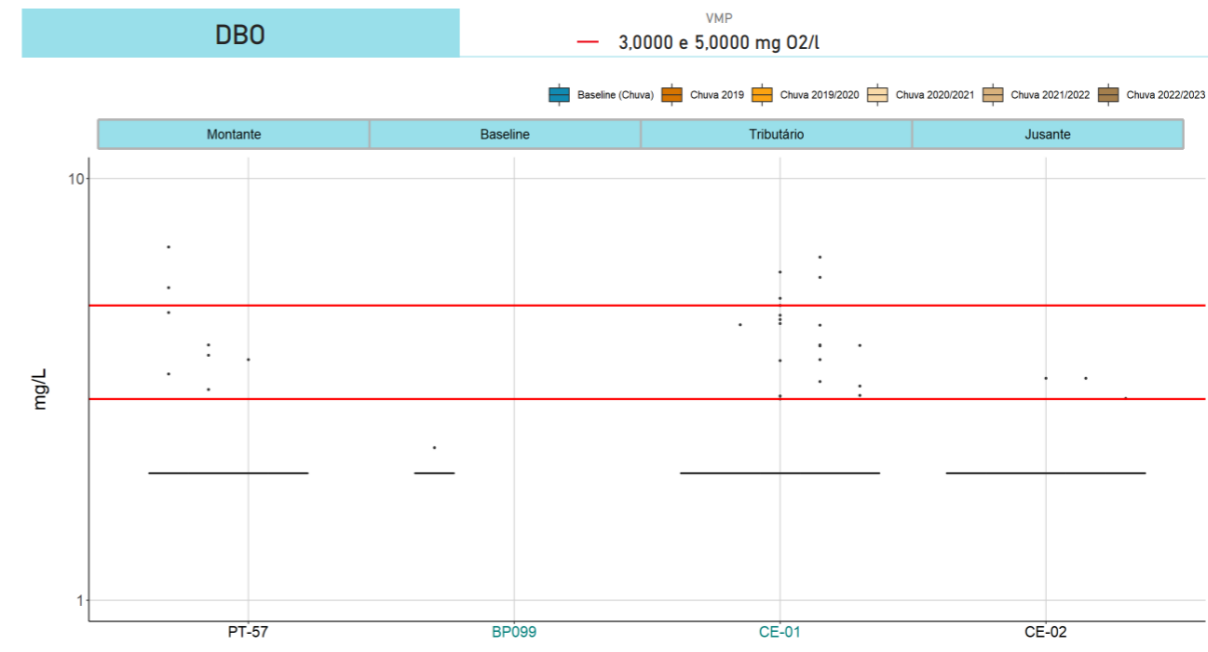
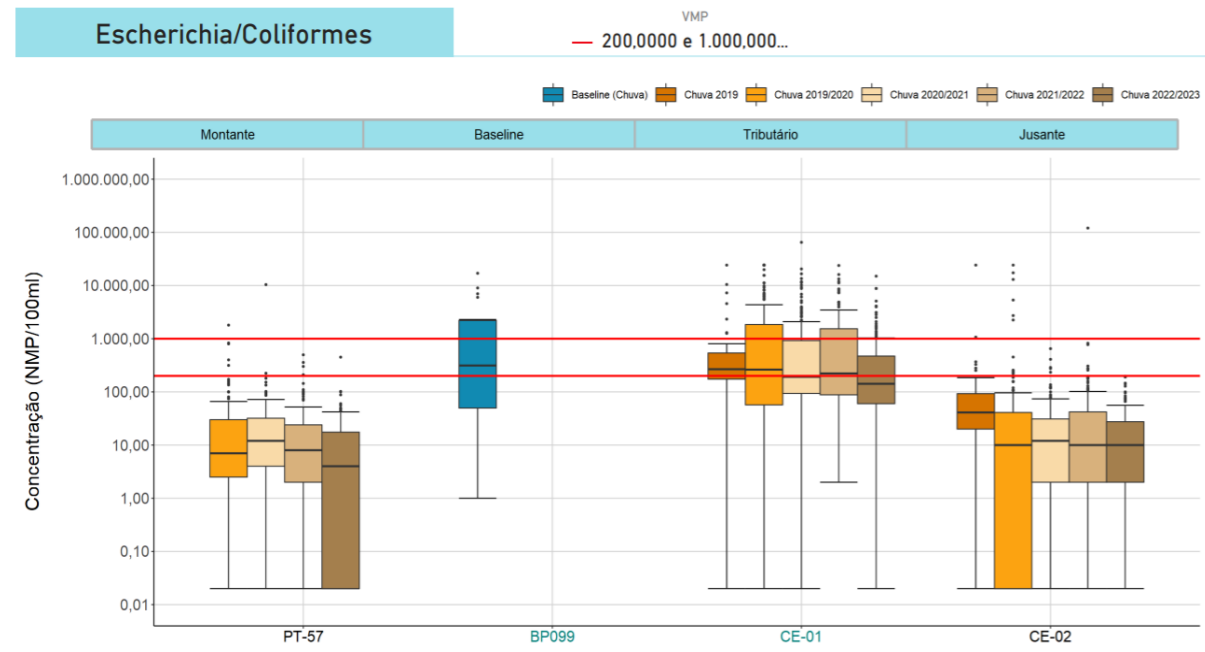
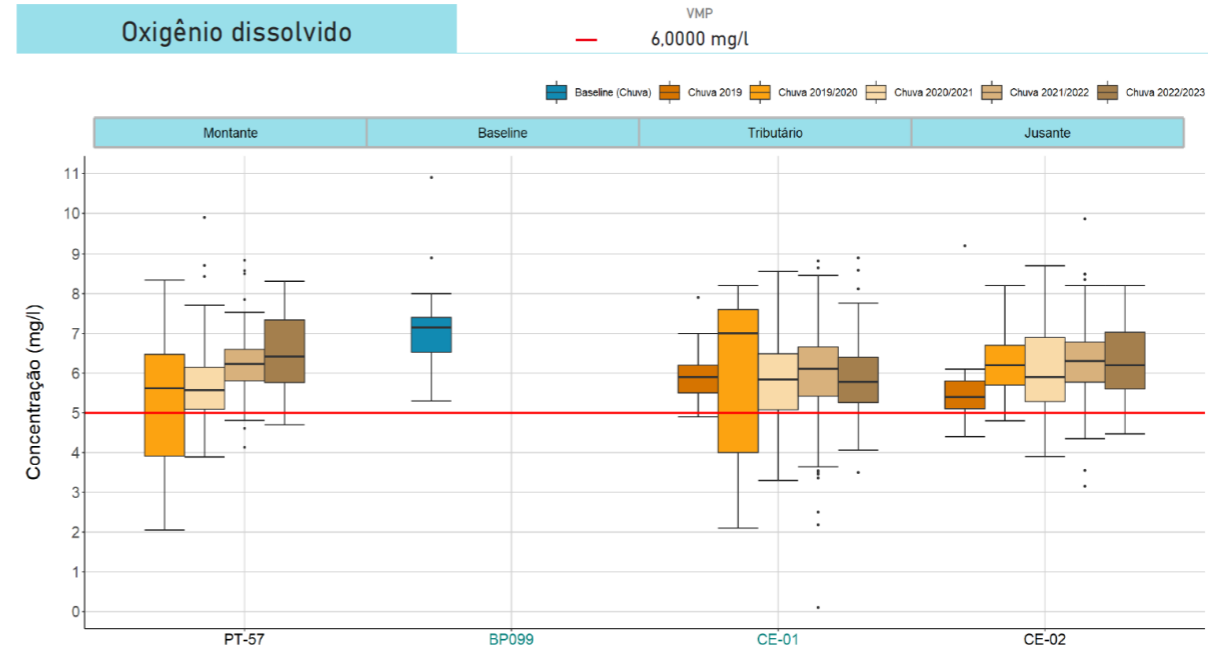
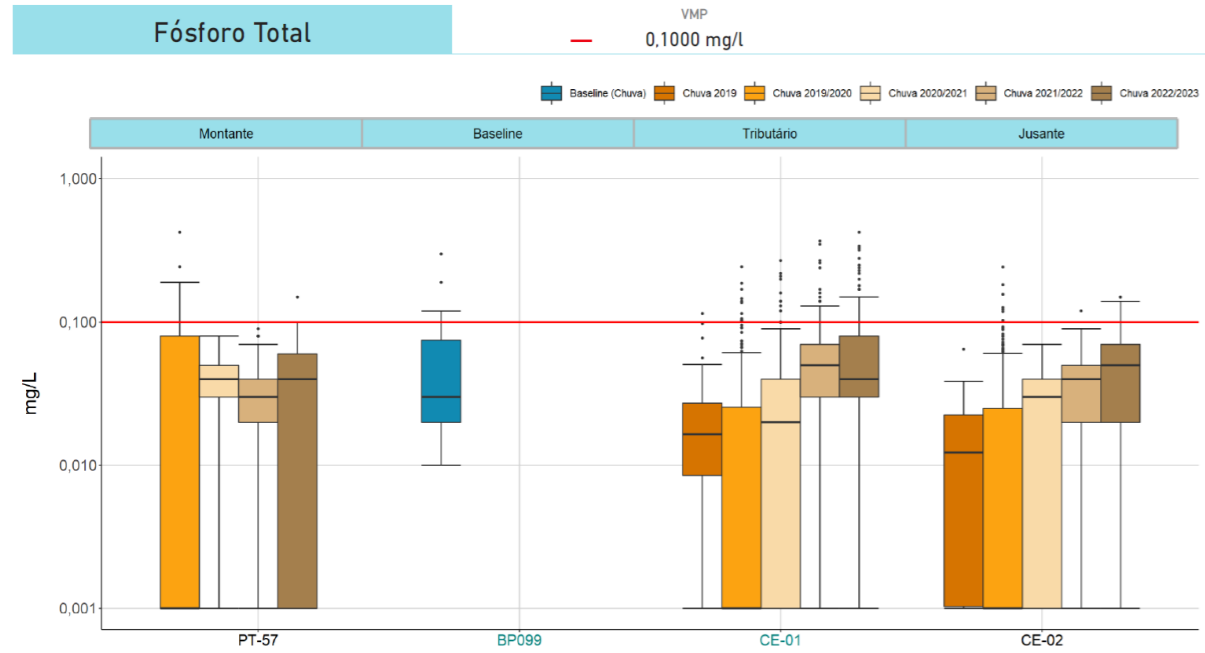
Já para *E.coli*/Coliformes termotolerantes, os resultados foram mais elevados no CE-01 se comparados aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba, mas ainda assim permaneceram próximos do *baseline*. De modo geral, mais da metade dos resultados ficaram acima do VMP (200 NMP/100 mL) para a Classe 1, conforme enquadramento do ribeirão dos Gomes. Temporalmente, para cada ponto, nota-se, de modo geral, uma manutenção das medianas observadas principalmente no CE-01 e CE-02, estando elas abaixo do VMP e do *baseline* sazonal para os pontos localizados no Paraopeba. Para o PT-57 as medianas apresentaram leve decréscimo nos três últimos períodos.

Para Oxigênio dissolvido, o comportamento e os teores medianos foram semelhantes principalmente entre o CE-01 e CE-02. Para o PT-57 as medianas nos três últimos ciclos tiveram um acréscimo. De modo geral, a referida métrica, em todos os pontos e períodos (exceto 2019/2020 no CE-01) ficaram abaixo da calculada para o *baseline* sazonal, indicando menores condições de oxigenação nesses pontos. Ainda assim, percebe-se que a maioria dos resultados ficaram acima do mínimo estipulado na legislação. Para DBO, os resultados ficaram majoritariamente abaixo do LQ do método analítico, salvo alguns valores pontuais que violaram o VMP, observados principalmente no CE-01 ao longo de todo o período analisado.

Além disso, cabe ressaltar 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, conforme já mencionado.

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

Tabela 9.3.4-1 Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes

PT-57 (Mont.) X CE-02 (Jus.)	Chuv. 2019	Chuv. 2019/2020	Chuv. 2020/2021	Chuv. 2021/2022	Chuv. 2022/2023
Manganês Total	NA	0,000	0,022	0,104	0,016
Ferro Dissolvido	NA	0,984	0,897	0,413	0,256
Alumínio Dissolvido	NA	0,000	0,232	0,531	0,644
Turbidez	NA	0,297	0,064	0,168	0,015
Fósforo Total	NA	0,009	0,002	0,138	0,118
DBO	NA	0,036	0,262	0,944	0,380
EColi / ColiTermot.	NA	0,271	0,934	0,448	0,006
Nitrogênio Amoniacal	NA	0,000	0,000	0,149	0,765
Oxigênio Dissolvido	NA	0,000	0,001	0,409	0,114
Sólidos Suspensos T.	NA	0,780	0,118	0,510	0,045

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 chuva 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 o Manganês total. No período chuvoso mais recente (2022/2023), além de Manganês total, ocorreram diferenças significativas entre os resultados do ponto de montante e de jusante para Turbidez, *E.Coli*/Coliformes Termotolerantes e Sólidos suspensos totais.

Estabelecendo uma análise conjunto, assim como observado para os demais tributários avaliados no **item 7.3**, percebe-se que os parâmetros ligados aos aspectos sanitários da bacia são os que possuem maior frequência de diferenças significativas durante os períodos chuvosos, além da Turbidez que, conforme o **Gráfico 9.3.4-2**, 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 sanitários e de Turbidez 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 chuva. Por fim, em relação às violações, percebe-se que o parâmetro

com desvios mais recorrentes é o Manganês, com resultados inconformes igual ou superior a 98% tanto no tributário como no rio Paraopeba, no período de chuva 2022/2023.

No que tange ao ribeirão Betim, representado pelo TT-01, os pontos localizados no rio Paraopeba apresentaram relativa proximidade com os resultados do *baseline* de chuva. 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. Em termos de desvios, destaca-se o Fósforo total, que teve 100% de amostras inconformes no tributário nos três últimos ciclos chuvosos (2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023).

Já no ribeirão das Abóboras, monitorado pelo TT-05 e localizado em bacia mais rural, os parâmetros que se sobressaíram com concentrações mais destoantes em relação aos respectivos pontos no rio Paraopeba foram Manganês total e Oxigênio dissolvido, principalmente nos primeiros ciclos de chuva. Para os dois parâmetros mencionados foram verificadas menores concentrações no tributário. 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, diferentemente do cenário visto nos outros tributários.

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, os maiores percentuais foram vistos para Ferro dissolvido na chuva mais recente (2022/2023), entretanto, conforme o teste estatístico, os valores não 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 (ribeirão dos Gomes). As águas do afluente são confinadas hidraulicamente 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 *E.Coli/Coliformes* termotolerantes, sólidos suspensos totais, Manganês total e Turbidez no ponto CE-01 durante os períodos chuvosos 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 mais característicos da própria bacia, vinculadas aos metais majoritários, e àqueles que são compatíveis com o uso e ocupação do solo mais preponderantes em suas respectivas sub-bacias, 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 cobre 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 março/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 podem gerar alterações associadas às condições de uso e ocupação típicos da bacia onde estão inseridos.

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 chuva 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, 1922.

10.3. Resultados

O histórico de evolução da pluma de rejeitos em suspensão mostrou que até o dia 31 de janeiro de 2019, a pluma alcançou o PT-06 no km 51,5; chegou no PT-16 (km 122,6) em 07/02/2019; alcançou o PT-19 (km 249,8) em 14/02/2019; o PT-20 (km 297,9) em 28/02/2019 e em 08/03/2019, alcançou o PT-21 (km 315,1) no barramento da UHE Retiro Baixo e lá permaneceu. Com a estiagem de 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, 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, transporte de materiais por arraste/salteamento/suspensão e que, novamente, com o retorno da estiagem e diminuição do nível/vazão dos rios, 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.

Neste documento, focou-se na análise sequencial da granulometria dos sedimentos de corrente nos períodos de chuva de 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 chuva, incluindo os períodos de 25/01/2019 a 31/03/2019 (**Gráfico 10.3-1**) 01/10/2019 a 31/03/2020 (**Gráfico 10.3-2**); 01/10/2020 a 31/03/2021 (**Gráfico 10.3-3**); 01/10/2021 a 31/03/2022 (**Gráfico 10.3-4**) e 01/10/2022 a 31/03/2023 (**Gráfico 10.3-5**), entre o ponto de monitoramento PT-52, em Belo Vale, e o PT-22, a jusante de Retiro Baixo.

A distribuição dos perfis granulométricos foi avaliada ao longo dos períodos sazonais de chuva e dispostos de forma a facilitar a verificação das granulometrias no espaço, razão pela qual, este documento específico não incluiu curvas para cada ponto e data de amostragem. Os sedimentos foram coletados no rio Paraopeba, entre o ponto PT-52 (em Belo Vale) e o PT-22 (a jusante de Retiro Baixo).

Em relação aos pontos avaliados tem-se a ponderar que os pontos de monitoramento PT-50 e PT-51 foram descontinuados em março/21; os pontos de monitoramento 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. Destaca-se que as informações referentes aos pontos não coletados estão destacadas em cada gráfico, referente aos anos de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

A análise do comportamento granulométrico indicou, de forma geral, que para o período de chuva (outubro a março) nos diferentes anos (2019 a 2023) houve variação na deposição de sedimentos ao longo do rio Paraopeba. O primeiro estágio chuvoso, que marca o início do monitoramento, é compreendido entre 25/01/2019 a 31/03/2019. Esse ciclo chuvoso de 2019 exibiu predominância de sedimentos finos (silte) na maioria dos pontos analisados e no trecho sinuoso entre os pontos PT-53 e PT-16 (região 2A) foi observada predominância de sedimentos na fração areia. Ressalta-se que, este ciclo chuvoso apresenta um intervalo de tempo incompleto, correspondendo ao final de janeiro a março de 2019. Para os anos subsequentes (2020 a 2023), foram observadas variações no comportamento da granulometria, com aumento na ocorrência de sedimentos mais grossos (areia fina, média e grossa e muito grossa) em alguns pontos monitorados e manutenção na ocorrência de argila. De modo geral, os sedimentos finos (argila e silte) predominaram nos trechos de menor velocidade do rio (*i.e.* dique/barramento de contenção, zonas de remanso de rio e pilares de pontes) e os sedimentos mais grossos, nos trechos de ambientes lóticos.

A partir do **Gráfico 10.3-1**, constatou-se que no período chuvoso de 2019 (janeiro a março/2019) houve predominância de sedimentos siltosos e argilosos ao longo do rio Paraopeba. Entre PT-01 e PT-15, a granulometria fina pode ser resultante de coletas em margem de rio, onde, devido a menor velocidade de transporte do rio, se depositam os sedimentos mais finos. Apesar do PT-53 e do PT-43 ao PT-17 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.

O **Gráfico 10.3-2**, que aponta para o período de chuva de 2019-2020 (primeiro ciclo chuvoso completo), de outubro/2019 a março/2020, percebeu-se predomínio das frações granulométricas siltosas, exceto na região 2A, entre os pontos PT-53 e PT-49 e PT-55, onde predominaram sedimentos mais grossos (areia muito fina a muito grossa). Este período chuvoso (2019/2020) foi o que mostrou os menores teores de argila, inclusive com alguns pontos não apresentando tal fração em seu perfil (PT-01, PT-54, PT-18 e PT-49). A granulometria fina (silte e argila) indicada entre os pontos PT-11 a PT-13 pode estar relacionada às coletas terem ocorrido em margem de rio, onde potencialmente se depositaram materiais finos e rejeitos das barragens B1, B4, B4A, devido à menor velocidade de transporte do rio e ao rompimento próximo, respectivamente. Na região 2A, a fração siltosa foi predominante no ponto PT-19, e com pouca presença de argila (menos de 4%) em toda a região 2A.

As frações arenosas entre os pontos PT-53 e PT-16, no período anterior de chuvas (2019), predominaram num intervalo maior, entre o PT-53 ao PT-49, e PT-55. Tal fato pode ter ocorrido em função da deposição do rio, mas também pode ter sido influenciado por posição das coletas direcionadas para o centro do rio, que possui maior energia de transporte em relação às bordas

e podem acumular sedimentos que possuem frações mais grossas. A região 2B, no interior do reservatório de UHE Retiro Baixo, por apresentar característica mais lântica (intermediária), permitiu a dissipação e deposição de materiais em suspensão de natureza mais fina, onde as frações silte e argila predominaram, principalmente o silte, enquanto o conteúdo de argila variou de 0,88% (PT-20) a 10,09% (PT-28). No PT-22 (Região 2C) foi observado um padrão de acúmulo de sedimentos na fração silte (90,23%).

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. 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 o ciclo chuvoso de 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021), o ponto PT-16, na região 2A, seguindo o mesmo padrão dos ciclos anteriores, com predominância de materiais mais grossos (areia, ca. 89%), indicando aumento para o período. Tal predomínio desses materiais grossos podem relacionar-se a sinuosidade do trecho, além das chuvas que atingiram a região neste período. Neste contexto, as chuvas podem ter resultado no aumento da energia no rio (maior turbulência), onde associado a declividade do rio, acarreta, por consequência, potenciais erosões marginais, transporte de materiais provenientes de contribuições difusas resultantes do escoamento superficial da bacia e deposição de materiais mais grossos (areia fina a grossa), transportados por arraste, suspensão ou saltação. De modo similar, essa predominância de materiais mais grossos também ocorreu nos pontos PT-01, PT-13, PT-05 e PT-53, 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), e do reservatório 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, 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 e afetado pelos rejeitos da barragem B1, B4, B4A, que também contêm materiais de granulometria fina. Além os pontos supracitados que apresentaram altos teores de areia, o trecho entre os pontos PT-53 a PT-16, assim como nos períodos de chuva anteriores, também apresentaram concentrações de areia significativas. Possivelmente, o transporte e deposição de sedimentos mais grossos no rio ocorreu em função das chuvas intensas que ocorreram no verão de 2019/2020, quando comparadas às de 2019.

Os pontos inseridos na região 2B (PT-20 a PT-21) no contexto da UHE de Retiro Baixo, apresentaram domínio de silte, com teores de argila maiores que 20%. No PT-22, inserido no contexto da região 2C, o predomínio de silte se manteve provavelmente por causa da condição do solo desnudo, e conseqüente facilidade para erosão e acúmulo de sedimentos, além de transporte e deposição de finos provenientes de locais a montante do PT-22. Notadamente, nos pontos PT-03, PT-48 e PT-17 não houve resultado granulométrico para todo o período em razão de não haver acesso seguro ou material disponível para coleta no leito do rio.

O **Gráfico 10.3-4** indica os resultados para o período chuvoso de 2021/2022 (de outubro/2021 a março/2022), apresentou incidência de chuvas intensas e mais contínuas, entre dezembro/2021 e fevereiro/2022, quando comparadas ao ciclo de chuvas anterior (2020/2021) e a estação de estiagem/2021 (ARCADIS, 2021a), de padrão constante de baixa pluviosidade. Neste ciclo chuvoso foi possível observar, do PT-52 ao PT-11, um aumento das frações finas em comparação ao período de chuvas anterior. Os pontos PT-12, PT-13 e PT-05 apresentaram padrões de distribuição granulométrico similares ao período de chuvas/2020-2021, enquanto os pontos PT-09, PT-02 e PT-05 apresentaram diminuição nas frações finas. O PT-14 apresentou domínio absoluto de silte, bem como no período de chuva anterior. O ponto PT-15 apresentou aumento das frações tamanho silte e conseqüente redução nas proporções de areia. O PT-53 indicou aumento dos sedimentos nas frações argila e silte, enquanto os demais pontos da Região 2A (PT-54, PT-16, PT-18, e PT-49 ao PT-55) indicaram aumento nas frações arenosas, o que pode ser em função das chuvas durante o período analisado. Os pontos inseridos nas Regiões 2B e 2C não apresentaram diferenças em seus padrões de distribuição granulométrica entre o atual período sazonal de chuva e o anterior, com domínio de sedimentos nas frações finas. Isso ocorre em função de características hidráulicas desse trecho, bem como, na Região 2C, da condição do solo desnudo nas margens e da facilidade de erosão e acúmulo de sedimentos na localidade.

O **Gráfico 10.3-5** aborda o ciclo de chuva 2022/2023 (outubro/2022 a março/2023) e apresenta bastante similaridade com o período anterior, com manutenção dos teores de argila e variação nas concentrações de silte e areia. Nota-se que os pontos PT-01, PT-48, PT-53, PT-43, exibiram aumento nas concentrações de areia em relação ao período anterior, enquanto os pontos PT-54, PT-16, PT-18, PT-49, PT-19, PT-55 apresentaram redução. Da mesma forma que ocorreu nos anos anteriores, o PT-52 também apresentou predominância de materiais mais finos (ca. 65,29%). O ano de 2022 registrou maior precipitação que 2021, o que pode ter contribuído para a resposta granulométrica monitorada, em resposta a dinâmica sedimentar natural do rio, principalmente nos trechos mais lóticos, como na região 2A. Destaca-se que pontos PT-11 e PT-12 (Estaca-Prancha), PT-14 (próximo a UTE Igarapé), PT-20 a PT-21 (UHE Retiro Baixo) e PT-22 (região 2C) se mantiveram como sendo pontos de ocorrência de acúmulos de sedimentos finos e, dessa forma, apresentam os maiores conteúdos de argila (ca. 21-33%) que o restante da sequência.

Gráfico 10.3-1 Variação granulométrica no período de janeiro/2019 a março/2019

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 25/01/2019 a 31/03/2019

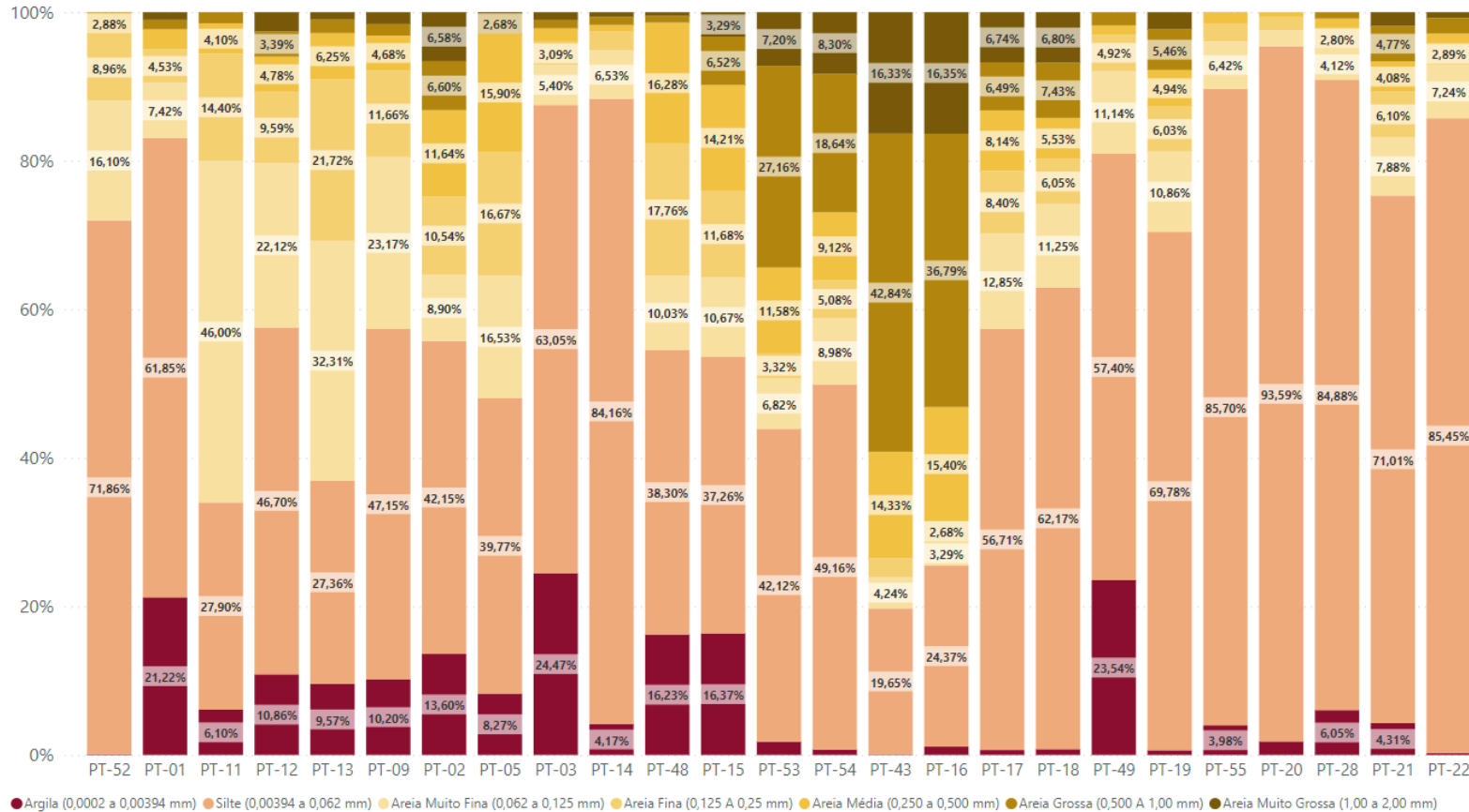


Gráfico 10.3-2 Variação granulométrica no período de outubro/2019 a março/2020

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/10/2019 a 31/03/2020

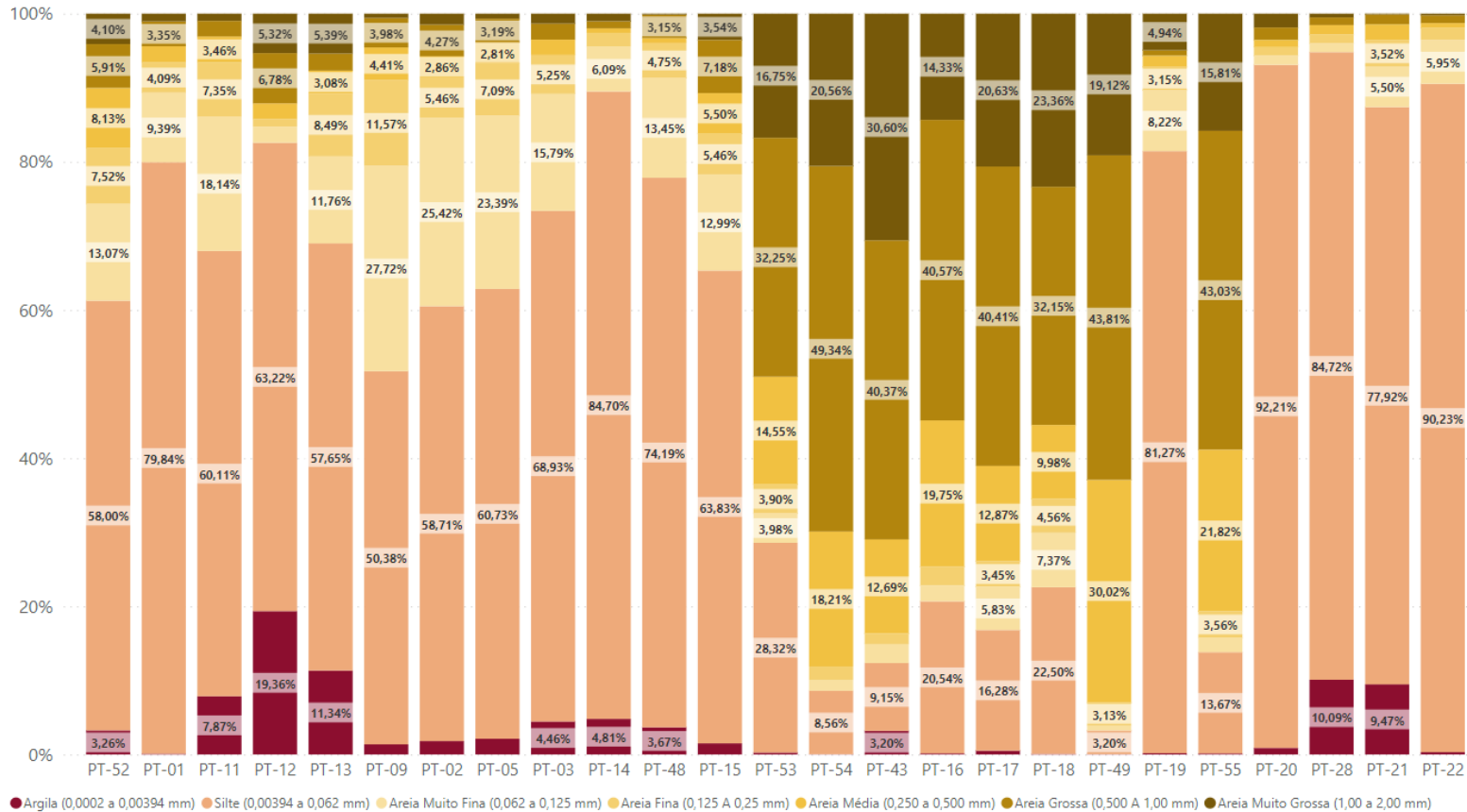
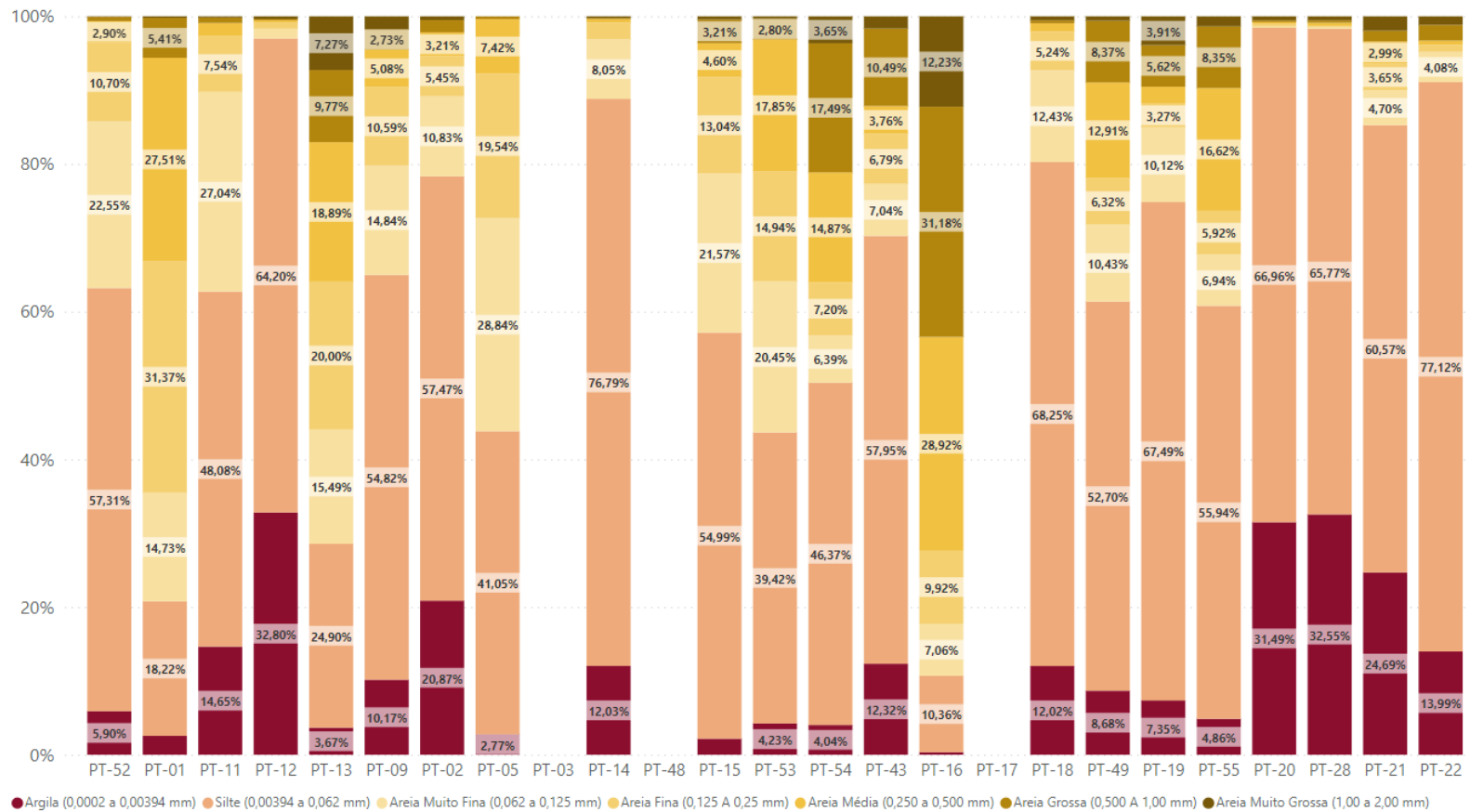


Gráfico 10.3-3 Variação granulométrica no período de outubro/2020 a março/2021

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/10/2020 a 31/03/2021



Nota: Os pontos PT-03, PT-48 e PT-17 não apresentaram dados período em razão de não haver disponibilidade de sedimentos para coleta ou acesso inseguro.

Gráfico 10.3-4 Variação granulométrica no período de outubro/2021 a março/2022

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/10/2021 a 31/03/2022

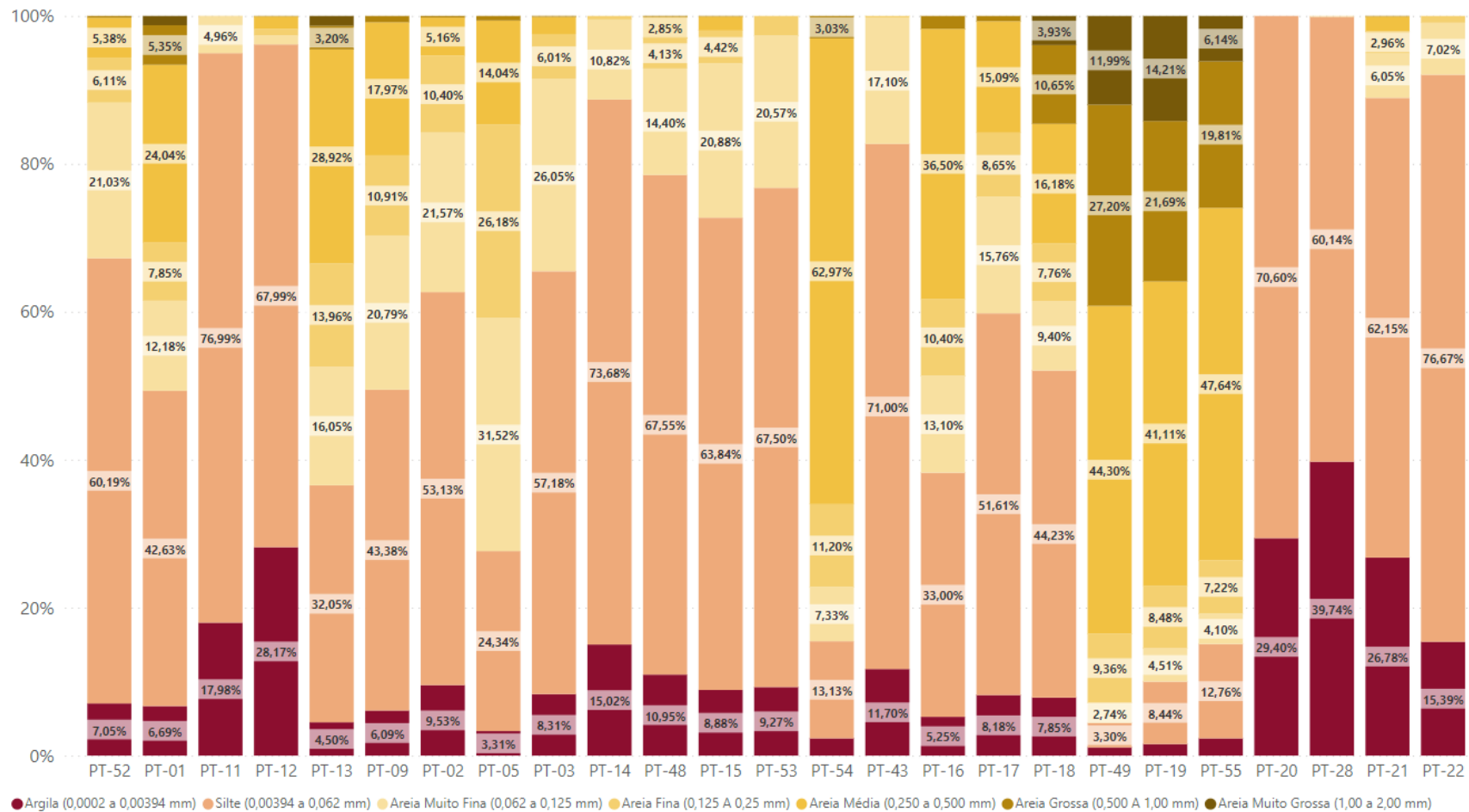
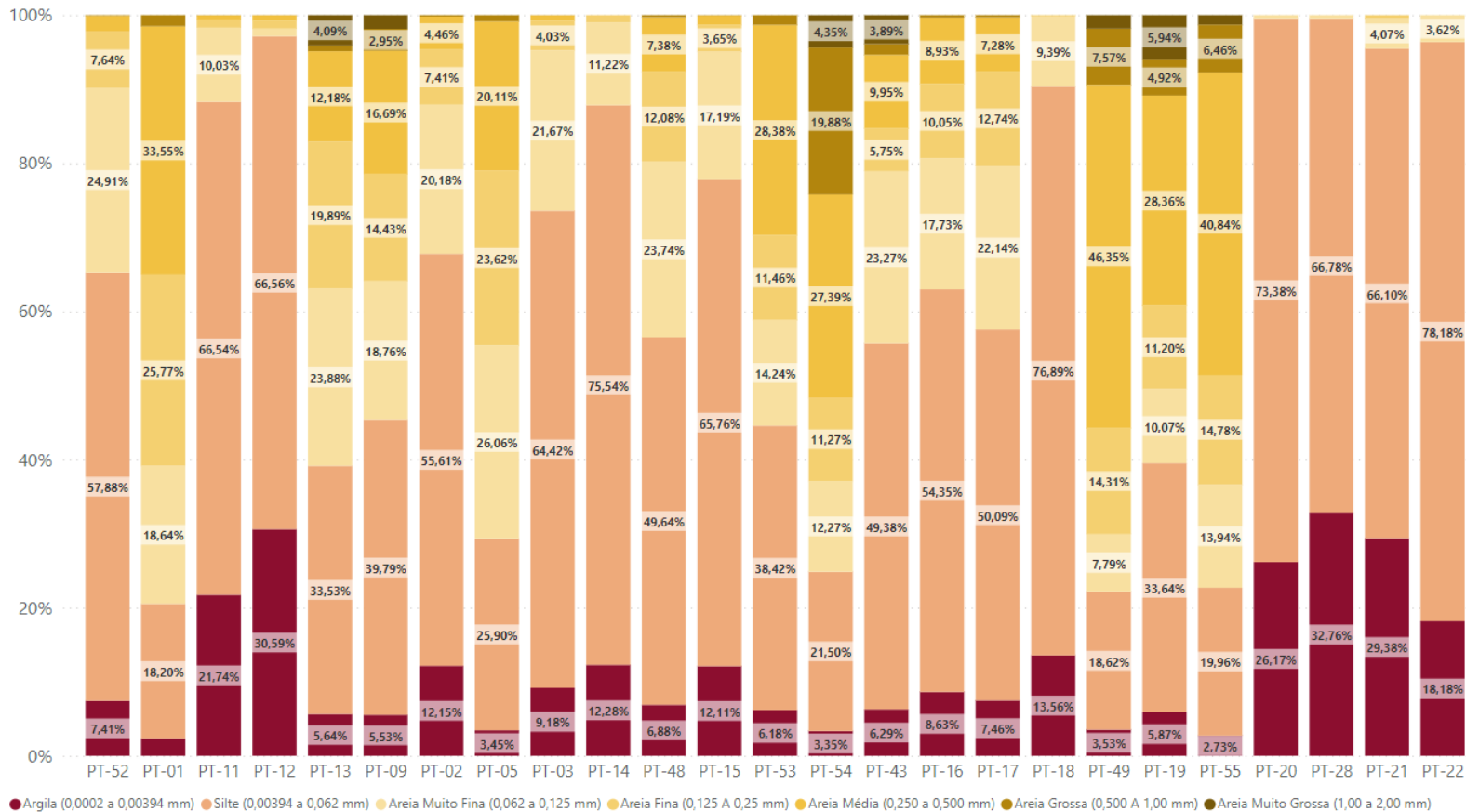


Gráfico 10.3-5 Variação granulométrica no período de outubro/2022 a março/2023

Granulometria das amostras de sedimento de fundo de 01/10/2022 a 31/03/2023



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 chuva (outubro a março) dos anos de 2019 a 2023, permitiu acompanhar a evolução da dinâmica da bacia do rio Paraopeba espacial e temporalmente. O período chuvoso de 2019 foi o que mais concentrou sedimentos de textura fina ao longo do perfil do rio Paraopeba, desde a região montante até a entrada do Reservatório da UHE Três Marias. Constatou-se que os sedimentos mais finos estão predominantes entre PT-01 até o PT-15, em resposta ao evento de rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B-4, B-4A.

É observado gradativo aumento das frações arenosas nos pontos da Região 2A, entre o PT-53 até o PT-17 e entre o PT-18 ao PT-55, região em que predominam os gnaisses do Complexo Bonfim e os metassedimentos do Grupo Bambuí. Esse comportamento é resposta a 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 finas.

Ao se transferir do ambiente lótico do rio para o ambiente intermediário a lêntico do reservatório da UHE Retiro Baixo, nos pontos PT-20, PT-28 e PT-21, é possível observar um padrão de distribuição granulométrico predominantemente composto por sedimentos de textura fina, compreendendo silte, principalmente, distribuídos ao longo de todos os períodos sazonais.

Nos períodos subsequentes a chuva/2019-2020, 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 provenientes das barragens B1, B-4, B-4A, principalmente nas regiões 1A e 1B.

Ao se relacionar as frações granulométricas com os resultados analíticos dos metais prioritários Fe, Al, Mn e traços Ni, Cu, As, Pb, percebeu-se que as frações finas adsorveram mais metais e contribuíram para o aumento da concentração destes parâmetros. Nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B esta condição é clara, uma vez que a granulometria local é predominante fina, majoritariamente na fração silte, ao longo de todo o período monitorado. Na região 2A onde as amostragens ocorreram predominantemente na calha central do rio, ao se deslocar a posição de coleta do centro para a margem percebeu-se redução na granulometria e aumento nas concentrações dos metais, principalmente no trecho entre PT-53 e PT-49. Nos pontos de monitoramento PT-53, PT-43 e PT-16, que tiveram predominância de sedimentos arenosos, as concentrações continuaram baixas.

11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de chuva até 2023

11.1. Objetivo

O objetivo das avaliações estatísticas espaciais e temporais aplicadas aos metais foi verificar a evolução deles em suas respectivas regiões e entre elas ao longo do tempo e do espaço nos períodos chuva até 2023.

11.2. Metodologia

11.3. Método da Estatística descritiva e inferencial

Neste item serão analisados os resultados dos metais majoritários (Mn, Fe, Al) e traço (Pb, Cu, Ni, Cr, Cd e As), além do P, ao longo do tempo e do espaço nos períodos de chuva. A avaliação mais detalhada do parâmetro Fósforo foi adicionado neste item após solicitação da equipe da Aecom, por uma possível relação das alterações das suas concentrações com o rejeito. Importante ressaltar que o Fósforo foi constatado na composição química do rejeito (GEOENVIRON, 2019), mas com valores baixos se comparados ao elemento prioritário Manganês, e no testemunho dos sedimentos do rio Paraopeba (ARCADIS, 2020c). A avaliação deste parâmetro em sedimento se torna relevante dada a possibilidade de influenciar a qualidade da água superficial. Entretanto, conforme indicado no **Item 5**, não foi possível associar as concentrações deste parâmetro diretamente com o rejeito, uma vez que o Fósforo apresenta importantes contribuições de fontes geogênicas e antropogênicas, podendo apresentar oscilações conforme os períodos sazonais.

Já os elementos traço, apresentaram concentrações reduzidas, porém variáveis ao longo das regiões e períodos monitorados, sendo que na chuva 2022/2023, ocorreram concentrações acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 para Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo e Níquel. O Cádmio apresentou concentrações pouco variáveis ao longo tempo monitorado com MAD (desvio mediano absoluto) igual a zero, ou seja, a maioria dos resultados inferiores ao limite de quantificação do método analítico, indicando variabilidade insuficiente para serem utilizados nos testes estatísticos (SABINO *et al.*, 2014).

Previamente à análise descritiva e inferencial dos resultados do monitoramento dos parâmetros de qualidade dos sedimentos nos períodos de chuva, 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 resultados dos parâmetros

majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de chuva 2022/2023. 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*, foi realizada a avaliação espacial e temporal do comportamento dos parâmetros de sedimento por meio de gráficos do tipo *Boxplot*. 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 - Premissas é apresentada 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 chuva entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de chuva 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). A comparação temporal também foi realizada para cada ponto, individualmente, e os resultados constam no **Anexo IV-D**. Neste mesmo anexo, consta a comparação espacial para cada período de chuva separadamente (comparação espacial 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023).

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.

11.3.1. 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 quatro 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.

Primeiramente, a tendência temporal da série de dados completa foi avaliada, desde o início do monitoramento até o final do período de chuva 2022/2023, 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 chuva 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.

11.4. Resultados e discussão

No período de chuvas/2022, 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 no trabalho. Os pontos não amostrados, pelo menos uma vez, e localizados ao longo do rio Paraopeba foram o JRB-02, PT-03, PT-48, PT-17. O ponto JRB-02 foi inserido somente recentemente (agosto/2022) no escopo desse monitoramento (PME v.24). Os pontos JRB-02, PT-03, PT-17 e PT-48, que apresentaram menos amostras, principalmente entre meados de 2020 a meados de 2021, devido as condições de acesso, não foram considerados na análise de cluster.

11.4.1. Análise de cluster

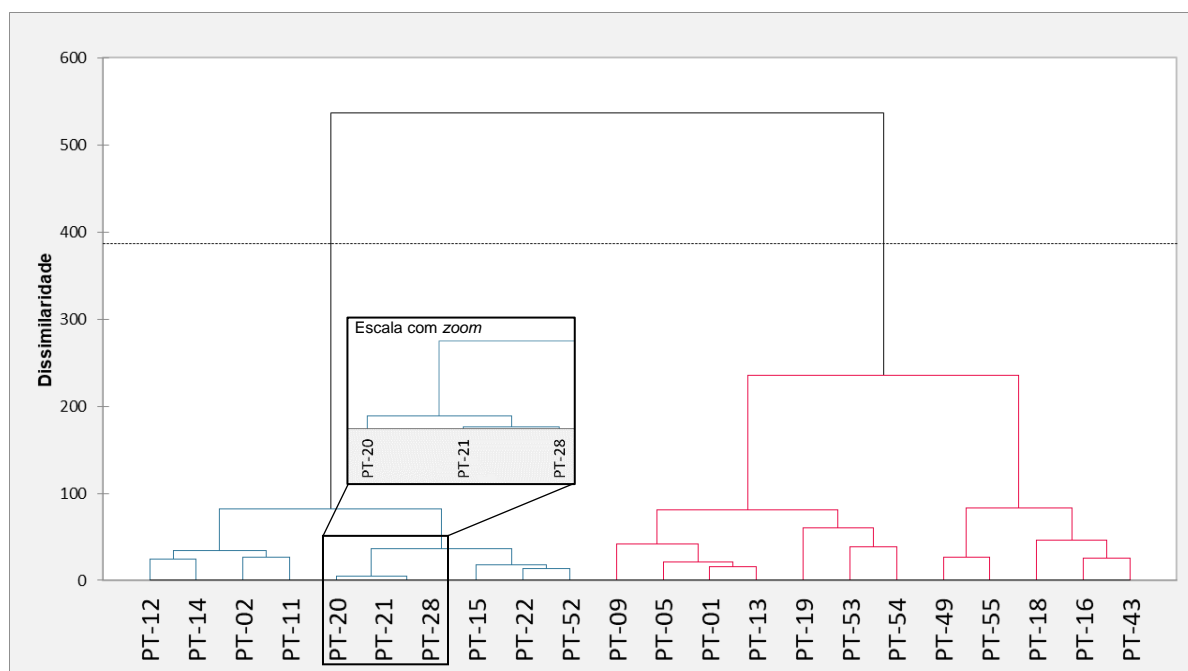
De acordo com o dendrograma (**Figura 11.4.1-1**) evidenciou-se maior distribuição dos pontos de monitoramento no espaço, ou seja, os pontos das regiões Ferro-Carvão, PT-14 na região 1B e PT-02 na região 1A se distribuíram no mesmo agrupamento e apresentaram similaridades estatísticas e são os pontos com sedimentos que apresentaram característica química de rejeito em pelo menos alguns meses deste ciclo de chuvas; além disso estes locais se encontram em áreas de retenção hidráulica, que favorece o acúmulo de finos. O grupo PT-13, PT-09, PT-01 e PT-05, estão espacialmente agrupados na região 1A ficaram mais ao centro do cluster, possivelmente por causa da mistura de rejeitos e sedimentos que ocorrem nessa região, como sedimentos com característica química de rejeitos nos PT-15 e PT-13 e os demais com característica de sedimentos naturais, porém, todos na mesma região.

O agrupamento indicado na **Figura 11.4.1-1** também englobou pontos que estão espacialmente próximos (PT-53, PT-54, PT-49, PT-55, PT-18, PT-16 e PT-43) e que compartilham dos sedimentos naturais de corrente da região 2A. Os pontos PT-54 e PT-53 estão na área de transição entre os sedimentos presentes no Quadrilátero Ferrífero e os sedimentos do Grupo Bambuí, indicando maior similaridade entre eles. Os pontos da região 2A (PT-19, PT-49, PT-55, PT-18, PT-16 e PT-43) estão inseridos em unidade geológica e pedológica mais definidas, o que pode também influenciar no resultado do agrupamento estatístico nesta região e corroboram no diagrama unifilar. O PT-19 apresenta-se um pouco deslocado em relação aos demais pontos, provavelmente por causa de estar em área de constantes escavações de areia e de exploração de ardósia.

Os pontos da região 2B (PT-20, PT-21 e PT-28) se agruparam com o ponto da região Montante (PT-52) e da região 2C (PT-22). Estes pontos estão em regiões com sedimentos com característica química natural, não afetadas pelo rompimento da barragem. Já para o PT-15, que foi incluído neste grupo, foi o que mais se distanciou estatisticamente dos pontos de monitoramento desta região, provavelmente por estar em região de transição entre sedimentos com característica de rejeitos e ora com característica química natural.

Desta avaliação, tem-se que os agrupamentos tendem 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-12, PT-14, PT-02, PT-11, PT-20, PT-21, PT-28 e PT-22) se agruparam. Os pontos da região 2A ficaram todos agrupados com característica recorrente e sem evidência de transições ou misturas de materiais no período. Ainda se percebeu que os sedimentos da região 1A que foram mais afetados pelo rejeito das barragens B1, B4, B4A ficaram agrupados diferenciando-se da região 2A. Neste grupo há locais com mais evidência química de rejeito e locais com evidência de sedimento natural. Tais características mostraram uma evolução dos sedimentos em relação ao ciclo anterior (chuvas 2021/2022) e ao de estiagem/2022.

Figura 11.4.1-1 Análise de Cluster dos sedimentos considerando todos os pontos de monitoramento agrupados até a UHE Retiro Baixo considerando a obrigatoriedade de remoção dos pontos de monitoramento sem os resultados analíticos.



11.4.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial

A análise estatística descritiva dos resultados de sedimentos dos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 foi feita 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 e sua relação com o rejeito.

Do **Gráfico 11.4.2.1-1** até o **Gráfico 5.3.3.6-1**, 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 IV-A**. No **Anexo IV-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 IV-D**, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência.

11.4.2.1. Elementos prioritários

- **Manganês**

A distribuição estatística espacial e temporal do Manganês nos períodos de chuva encontra-se no **Gráfico 11.4.2.1-1** e **Gráfico 11.4.2.1-2** (*Boxplots*) e **Tabela 11.4.2.1-1** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.1-2** (estatística sazonal temporal).

Verifica-se que, espacialmente, as concentrações de Manganês são maiores nas regiões do Ferro-Carvão, 1A e 1B e estas concentrações se reduzem ao longo do tempo e do espaço. Na Região Montante, o Manganês (Mn) apresentou variação nas medianas sendo próximo a 1.910 mg/kg na chuva 2019; 2.070 mg/kg na chuva 2019/2020, 1.305 mg/kg na chuva 2020/2021, e próximo a 1.457 e 1.302 mg/kg, respectivamente na chuva 2021/2022 e 2022/2023. As variações nessas concentrações podem estar associadas com a pluviometria e as condições morfodinâmicas do rio, granulometria e aportes de sedimentos provenientes de contribuições locais 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 1000 mg/kg, sendo estes acúmulos potencialmente decorrentes da atividade de exploração mineral (vide Uso e ocupação do solo, no **Anexo II**), principalmente de Ferro, na porção sul e sudoeste desta bacia. É possível que o intemperismo natural das rochas locais, juntamente com o antrópico, além da erosão do solo local favorece a lixiviação e o escoamento de materiais contendo Ferro e Manganês para o rio Paraopeba.

Na região do Ferro-Carvão, as concentrações de Mn foram significativamente maiores que na região Montante e que todas as demais regiões da calha do rio Paraopeba. Os *Boxplots* mostraram oscilação com aumento na chuva 2019/2020 e manutenção até o período atual.

As medianas em cada um dos períodos foram de: ca. 5.034 mg/kg na chuva 2019; ca. 12,600 mg/kg na chuva 2019/2020; ca. 13.087 mg/kg na chuva 2020/2021; ca. 11.986 mg/kg; e ca. 12.760 mg/kg na chuva 2022/2023. Essas variações são consideradas temporalmente significativas com base em análises estatísticas temporais dispostas na **Tabela 11.4.2.1-2**. 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. Esta ficou represada, captada e vertida para tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETAF 1) instalada pela Vale em meados de 2019. O represamento da água modificou as condições locais para mais lênticas 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 de rejeito *in loco* e 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, e maiores as demais. Pelos *Boxplots*, verifica-se que, temporalmente, redução das concentrações de Mn nessa região, com medianas oscilando entre 3.177 mg/kg, 2.820 mg/kg, 1.954 mg/kg, 1.353 mg/kg e 883 mg/kg, respectivamente nas chuvas 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023.

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 redução das concentrações ao longo do tempo. O período de chuva 2019 mostrou uma maior variação nas concentrações de Mn, cuja mediana foi de 2.919 mg/kg, e subseqüentes oscilações nas medianas ao longo dos períodos chuva, com valores de 4.310 mg/kg (2019/2020), 2.433 mg/kg (2020/2021), 1.844 mg/kg (2021/2022) e 1.572 mg/kg (2022/2023). A chuva 2022/2023 apresentou leve redução da mediana em relação ao período chuvoso anterior (2021/2022), no entanto, não foram observadas diferenças significativas no teste de comparação temporal entre os períodos de chuva 2022/2023 e 2021/2022. Valores significativamente inferiores foram observados nos períodos chuvosos anteriores; 2022/2023 em relação a 2020/2021, a 2019/2020 e a 2019, no período chuvoso 2021/2022 em relação a 2019/2020 e a 2019, e no período chuvoso de 2020/2021 em relação a 2019/2020.

Na Região 2A, os *Boxplots* mostraram oscilação dos valores, com redução das concentrações ao longo do tempo. A concentração mediana no período de chuva 2019 foi de 3.177 mg/kg. No período seguinte, de chuva 2019/2020, mesmo com os aumentos históricos das vazões no rio Paraopeba, a concentração mediana de Manganês nessa região reduziu (215 mg/kg), ao passo que as na chuva 2020/2021 (1.374 mg/kg), houve aumento das concentrações. 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). Nas porções marginais, a granulometria é fina e a capacidade de adsorção de metais aumenta em partículas menores. Portanto, tal elevação não necessariamente se atribui ao deslocamento de massa de rejeito ao longo do rio Paraopeba, visto que a massa densa se manteve predominantemente até a região 1B e os finos em suspensão que se sedimentaram na chuva 2019, que indicaram ocorrência de materiais com composição química de rejeitos. A chuva 2019 apresentou a predominância de frações finas, enquanto nos anos seguintes houve o predomínio de sedimentos mais grossos (areia) até 2020, tendo a partir de 2021 a mistura dos dois padrões, o que corrobora seu aumento sutil. Na chuva 2021/2022, as concentrações medianas reduziram para 276 mg/kg e são bem inferiores às monitoradas do período de chuva anterior, mesmo com coleta em posição marginal e que a chuva 2022/2023 (476 mg/kg). Esse fato é importante visto que, com tais chuvas o rio está em processo de cheia e materiais em suspensão identificados na água com sedimentos mais finos sendo transportados e depositados.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, os *Boxplots* mostraram entre os períodos de chuva um aumento nas concentrações ao longo do tempo. As medianas para os períodos foram de 826 mg/kg (2019); 784 mg/kg (2019/2020); 1.075 mg/kg (2020/2021); 1.096 mg/kg (2021/2022) e 1.204 mg/kg (2022/2023). Diferente das demais regiões, as concentrações de Mn tiveram leve aumento, sugerindo influência das chuvas de 2021/2022 e contribuições e aportes acumulados localmente, haja vista que em outras localidades a montante não foi identificado. O trecho Montante identificou mesmo padrão para chuva atual, o que também sugere ser uma condição característica do sistema. Tal acúmulo é favorecido pelas condições de menor energia propiciadas pelo reservatório.

Na Região 2C, os resultados de Mn oscilaram bastante conforme os *Boxplots*, com certo aumento das concentrações ao longo do tempo. A mediana identificada foi de 655 mg/kg na chuva 2019 e, apesar de maiores que da região 2B, não mostraram diferença significativa. Na chuva 2020/2021, o aumento das vazões nos rios e tributários da bacia do rio Paraopeba, somado às contribuições das chuvas de 2019/2020, resultaram na concentração de sedimentos e metais e, por consequência, na elevação das concentrações medianas para 1.273 mg/kg. Essas concentrações reduziram pontualmente na chuva 2021/2022 (621 mg/kg), com novo aumento dos valores na chuva 2022/2023 (1.651 mg/kg), na mesma ordem de grandeza do período de chuva anterior. Essa região recebe contribuições difusas advindas de tributários, além do próprio arraste de partículas por escoamento superficial e, também, de lixiviação de sedimentos e solos desnudos da localidade.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Mn. A chuva 2022/2023 apresentou valores ligeiramente menores, porém a maioria das regiões mostrou distribuição próxima entre os *Boxplots* dos dois períodos. As regiões Ferro-Carvão, 1B, 2A e 2B mostraram distribuição de dados bastante similar. Enquanto as regiões Montante e 1A, mostraram distribuição próxima para os dois períodos, com valores medianos e P75 maiores para a chuva 2021/2022. A região 2C mostrou comportamento mais destoante, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 11.4.2.1-2 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

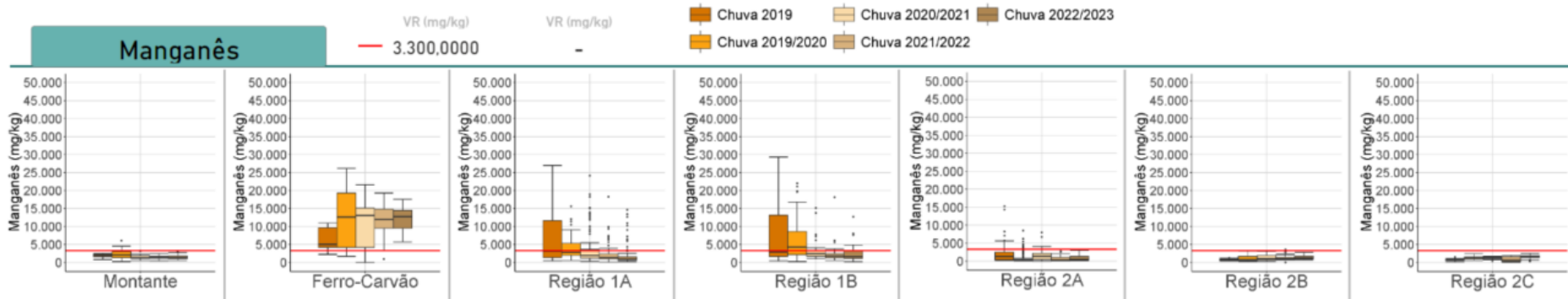


Gráfico 11.4.2.1-3 Variação do Manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

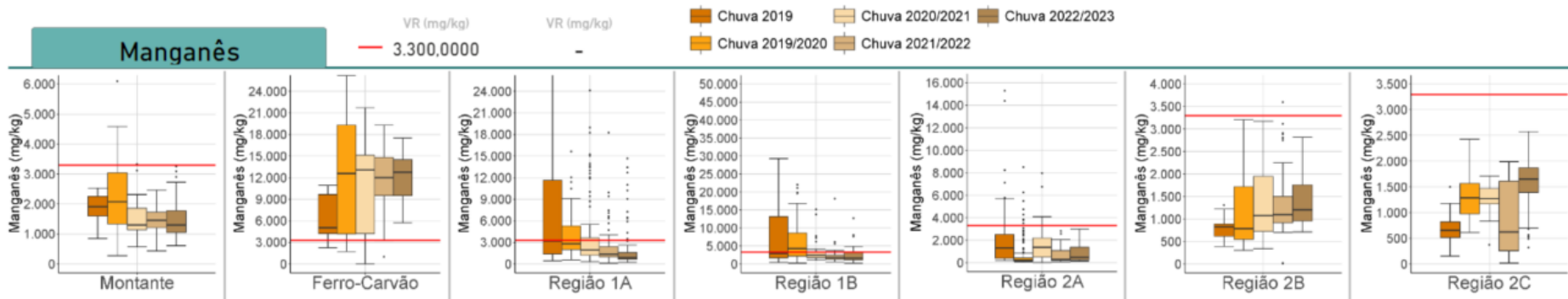


Tabela 11.4.2.1-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Manganês.

	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 11.4.2.1-2 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	<	<	<	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	<	<	>	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	<	<	<	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	<	~	<	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	<	<	~	>	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	<	<	<	>	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	~	<	<	>	>	~
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	<	~	~	>	>
Ch. 19/20 X Ch. 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 chuva encontra-se no **Gráfico 11.4.2.1-4** e **Gráfico 11.4.2.1-5** (*Boxplots*) e **Tabela 11.4.2.1-3** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.1-4** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.1-4** mostra a evolução do Ferro ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. O **Gráfico 11.4.2.1-5** mostra a evolução do Ferro ao longo dos períodos de chuva em escala variável.

Na Região Montante, os *Boxplots* mostraram redução das concentrações ao longo dos períodos de chuva, com medianas de 107.000 mg/kg em 2019; 82.400 mg/kg em 2019/2020; 46.156 mg/kg em 2020/2021, 60.710 mg/kg em 2021/2022 e 56.737 mg/kg em 2022/2023. Dessa forma, nas chuvas 2021/2022 e 2022/2023, apesar das concentrações medianas terem sido levemente maiores, os *Boxplots* indicaram manutenção das concentrações desde 2020/2021, sugerindo cenário mais natural da bacia, ou seja, sem a condição premente do rompimento da barragem B1 e, possivelmente, com influência das precipitações (2019/2020 e 2021/2022), que promoveram o aporte, transporte e deposição de materiais, além de favorecer a ocorrência de erosões marginais e escoamentos superficiais.

Na Região do Ferro-Carvão, os *Boxplots* oscilaram ao longo dos períodos sazonais de chuva, com aumento das concentrações até chuva 2020/2021, seguido de redução até o período atual. As medianas e máximas foram maiores que na Região Montante e o comportamento foi de aumento das medianas entre os períodos de chuva 2019 (151.480 mg/kg), 2019/2020 (249.000 mg/kg) e 2020/2021 (264.026 mg/kg). Já nos dois últimos períodos de chuva (2021/2022 e 2022/2023), verificou-se concentrações menores (197.434 mg/kg em 2021/2022 e 191.644 mg/kg em 2022/2023) do que nos períodos pretéritos (2019, 2019/2020 e 2021/2022), sugerindo influência do barramento Estaca-Prancha com influência das precipitações (2019/2020 e 2020/2021) e uma maior contribuição do rejeito, principalmente com Fe, para o trecho. Em 2022/2023, a estação de chuva apresentou padrão e concentrações similares ao período de chuva anterior (2021/2022), com leve redução dos valores medianos, como apresentado no *Boxplot*. No entanto, no teste de comparação temporal, não foram observadas diferenças significativas entre os períodos de chuva 2022/2023 e 2021/2022.

Na Região 1A, os *Boxplots* mostraram redução dos valores ao longo do tempo. Foram constatadas concentrações medianas de Ferro maiores durante a chuva 2019 (76.960 mg/kg), quando comparada ao restante das outras chuvas: 2019/2020 (121.734 mg/kg), 2020/2021 (66.783 mg/kg), 2021/2022 (94.508 mg/kg) e 2022/2023 (63.818 mg/kg). Dessa forma, no atual período de chuva as concentrações apresentaram diminuição gradativa em relação aos primeiros períodos analisados, com manutenção desde a chuva 2020/2021. As chuvas contínuas de 2021/2022 e 2022/2023, que teriam potencial de aumentar as concentrações e variabilidade dos dados, com escoamento superficial, ressuspensão de sedimentos na calha do rio e/ou aporte de materiais para esta região, não pareceu alterar influenciar significativamente as concentrações em relação ao período anterior nos sedimentos.

Na Região 1B, os *Boxplots* mostram de maneira geral oscilações de concentrações, com aumento até a chuva 2019/2020, seguido de redução até o período atual. Na chuva 2019, a concentração mediana foi de 98.680 mg/kg, com aumento na chuva 2019/2020 para 167.000 mg/kg, relacionado a pontos com acúmulo de sedimentos fino em trechos sinuosos e/ou com barreiras. Nesse sentido, a influência das chuvas de 2019/2020 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. Nas chuvas seguintes, as concentrações medianas diminuíram, com 137.500 mg/kg em 2020/2021, 73.088 mg/kg em 2021/2022 e 75.375 mg/kg em 2022/2023, relacionado principalmente a maior deposição de sedimentos naturais nos trechos, diminuição das erosões marginais e de canal e de mobilização de sedimentos (e rejeitos) de trechos a montante, provavelmente relacionados à diminuição nas precipitações em 2020/2021. Entre 2021/2022, um novo ciclo de chuvas intensas se instalou e resultou promovendo uma nova dinâmica de transporte e sedimentação para o sistema, justificando as oscilações nos valores de Fe dos períodos mais recentes. Em termos temporais, as concentrações tenderam a queda significativa como se observou na **Tabela 11.4.2.1-4**.

Na Região 2A, as concentrações oscilaram ao longo dos períodos de chuva com *Boxplots* exibindo redução. A concentração mediana de Ferro na chuva 2019 foi equivalente a 73.550 mg/kg, reduziu para 6.350 mg/kg na chuva 2019/2020, seguido de incremento na chuva 2020/2021 (45.705 mg/kg) e nova redução em 2021/2022 (9.863 mg/kg). Na atual chuva (2022/2023), a mediana da região mostrou leve aumento (22.570 mg/kg). Avaliando-se a tendência das concentrações percebeu-se que espacial e temporalmente elas diminuíram significativamente com manutenção nos dois períodos mais recentes. 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. Além disso, esta região está em ambiente lótico, que não é propício a deposição de sedimentos, o que pode estar associado as concentrações menores observadas.

A Região 2B está localizada próxima ao reservatório de Retiro Baixo, em ambiente lântico que propicia a deposição dos sedimentos transportados pela vazão do rio, uma vez que nestes ambientes a energia é reduzida e a vazão é muito baixa. Fruto deste comportamento, os *Boxplots* apresentaram valores próximos, com manutenção geral das concentrações ao longo do tempo. As medianas do Ferro na Região 2B (entre 55.000 e 70.000 mg/kg) são maiores que na Região 2A (entre 6.000 e 75.000 mg/kg), que está em ambiente lótico (**Gráfico 11.4.2.1-4** e **Gráfico 11.4.2.1-5** e **Tabela 11.4.2.1-3**). De modo geral, os diferentes períodos de chuva mostraram medianas similares com leve oscilação ao longo do tempo: 69.450 mg/kg (2019), 64.196 mg/kg (2019/2020), 56.304 mg/kg (2020/2021), 64.544 mg/kg (2021/2022) e 63.610 mg/kg (2022/2023). Somente a chuva 2020/2021 mostrou redução significativo em relação aos outros períodos (**Tabela 11.4.2.1-4**), período relacionado ao de menores precipitações.

A Região 2C, mais distante da área do rompimento, de modo similar a região 2B, mostrou manutenção das concentrações ao longo do tempo conforme indicado pelos *Boxplots* (**Gráfico 11.4.2.1-4** e **Gráfico 11.4.2.1-5**). As medianas apresentaram valores de 38.700 mg/kg em

2019, 39.544 mg/kg em 2019/2020, 34.068 mg/kg em 2020/2021, 31.573 mg/kg em 2021/2022 e 50.799 mg/kg em 2022/2023. A tendência de elevação de concentrações de Ferro nesta região se confirma estatisticamente apenas para a chuva 2022/2023 em relação aos anos anteriores, relacionado a influência das últimas chuvas (2021/2022 e 2022/2023) e contribuições locais (**Tabela 11.4.2.1-4**).

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, aumento dos valores de Fe. A chuva 2021/2022 apresentou valores de mediana menores para todas as regiões, apesar mostrar muitas vezes manutenção dos valores segundo a distribuição dos *Boxplots*, principalmente para as regiões Ferro-Carvão, 1A, 2A, 2B e 2C. A oscilação dos teores pode estar relacionada aos efeitos das precipitações com aumento do aporte e transporte de materiais, com acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como os reservatórios de UTE Igarapé e UHE Retiro Baixo. Enquanto na região 2B e 2C, ao contexto do reservatório de UHE Retiro Baixo e de contribuições locais.

	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)	CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3	Folha 240 / 373
	CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3	

Gráfico 11.4.2.1-4 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

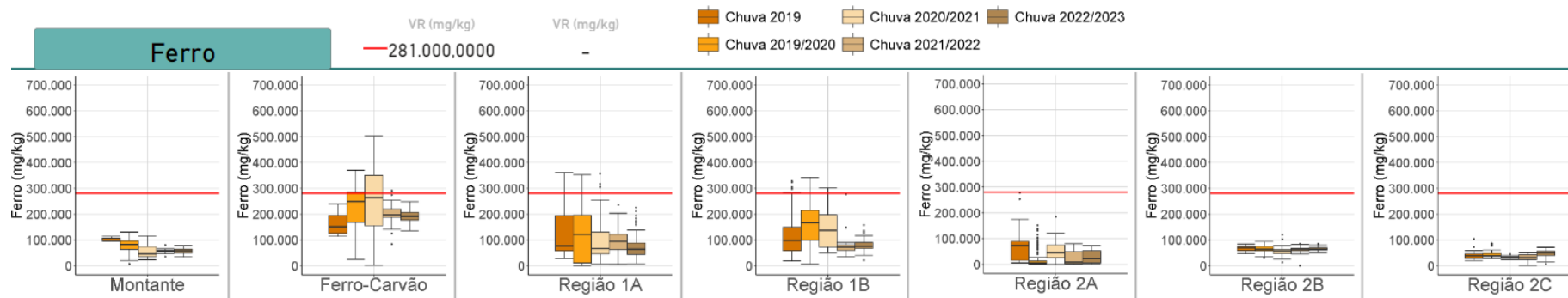


Gráfico 11.4.2.1-5 Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

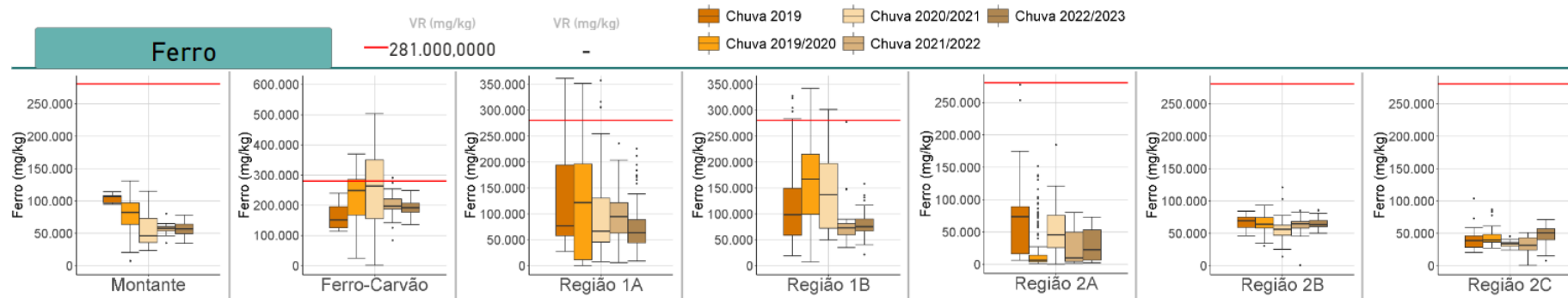


Tabela 11.4.2.1-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Ferro.

	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 11.4.2.1-4 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	<	~	~	<	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	<	<	<	<	>	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	~	<	<	<	<	~	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	<	<	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	<	~	<	~	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	<	~	~	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	~	~	>	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	<	<	>	<	<	~
Ch. 19/20 X Ch. 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)

▪ **Alumínio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Alumínio nos períodos de chuva encontram-se no **Gráfico 11.4.2.1-6** e **Gráfico 11.4.2.1-7** (*Boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.1-5** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.1-6** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.1-6** mostra a evolução do Alumínio ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. O **Gráfico 11.4.2.1-7** apresenta evolução do Alumínio ao longo dos períodos de chuva, 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 de maneira geral manutenção das concentrações nos *Boxplots*, com redução na chuva 2019/2020, onde permaneceu até o período atual com valores próximos, sem diferenças significativas. Nesse sentido, a maior mediana observada foi na chuva 2019 (45.500 mg/kg) seguida de redução em 2019/2020 (20.900 mg/kg) e com valores próximos até o período atual. A chuva 2020/2021 apresentou 13.572 mg/kg, a chuva 2021/2022 com 17.851 mg/kg e 17.808 mg/kg para a chuva 2022/2023. O Alumínio, nesta região, pode estar relacionado aos granitoides e gnaisses do Complexo Bonfim.

A Região do Ferro-Carvão foi a única em que se observou significativa elevação das medianas dos períodos de chuva observados, como disposto no **Gráfico 11.4.2.1-6** e **Gráfico 11.4.2.1-7**. A chuva 2019 apresentou mediana de 6.982 mg/kg; na chuva 2019/2020 a mediana foi de 13.484 mg/kg; na chuva 2020/2021 a mediana foi de 22.272 mg/kg; na chuva 2021/2022 a mediana foi de 22.625 mg/kg; e na chuva 2022/2023 a mediana foi de 22.483 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*. Além disso, a influência de chuvas, como as de 2019/2020 e 2021/2022 e 2022/2023, podem ter repercutido com maior aporte de material.

Na Região 1A, as concentrações medianas de Al durante os períodos de chuva quando comparadas foram menores (faixa de 6.000 mg/kg a 12.000 mg/kg) que as concentrações medianas identificadas na Região Montante (que variaram de 13.000 a 46.000 mg/kg) e Ferro-Carvão (que variaram de 6.000 a 23.000 mg/kg). A mediana da chuva 2019 na Região 1A foi de 11.137 mg/kg, com redução na chuva 2019/2020 (7.765 mg/kg) e em 2020/2021 (7.084 mg/kg) relacionadas as precipitações e dinâmica sedimentar, com mudança no comportamento da distribuição das concentrações de Alumínio. As chuvas 2021/2022 (7.703 mg/kg) e 2022/2023 (6.487 mg/kg) apresentaram manutenção dos valores. Tal variação pode ser

decorrente da oscilação entre deposição e acúmulo de sedimentos finos em alguns pontos e, a influência dos períodos chuvosos. A deposição de sedimentos com assinatura de rejeito e misturado a sedimentos com assinatura natural (vide item 14), poderia justificar a diminuição das concentrações ao longo do tempo. De todo modo a análise inferencial mostrou que as concentrações na região 1A reduziram significativamente somente em relação a 2019, como pode-se observar na **Tabela 11.4.2.1-6**.

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. 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, inclusive, de variações na morfodinâmica do rio que promovem mudanças nas deposições e conseqüente variações nos resultados. Na avaliação temporal dos ciclos de chuva percebeu-se manutenção das concentrações. A chuva 2019/2020 (mediana 16.400 mg/kg) mostrou valores significativamente menores que em 2019 (mediana 19.302 mg/kg). Foi sucedido por um período com aumento significativo em 2020/2021 (mediana 20.987 mg/kg), seguido de uma nova redução em 2021/2022 (mediana 17.843 mg/kg) e manutenção em 2022/2023 (mediana 17.495 mg/kg).

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, foram menores que a maioria das regiões a montante. A mediana do Alumínio para os diferentes períodos de chuva foi de 28.800 mg/kg (2019), 1.030 mg/kg (2019/2020), 13.648 mg/kg (2020/2021), 2.471 mg/kg (2021/2022) e 5.636 mg/kg (2022/2023). Na análise inferencial temporal (**Tabela 11.4.2.1-6**), o que se observou foram, na maioria das vezes, reduções significativas graduais entre os períodos sazonais, com exceção da chuva 2020/2021 que mostrou aumento em comparação com a chuva 2019/2020, além das chuvas de 2021/2022 e 2022/2023, em comparação com as chuvas de 2019/2020.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, constatou-se oscilação entre os *Boxplots*, com redução até 2019/2020 com manutenção até 2022/2023. As medianas reduziram durante os períodos sazonais até 2020/2021, de 83.150 mg/kg (2019), 45.600 mg/kg (2019/2020) para 29.049 mg/kg (2020/2021). Em seguida, elevaram de 42.692 mg/kg (2021/2022) até 49.322 mg/kg (2022/2023). O comportamento do Alumínio nesta região é semelhante a observada na região Montante e 1B. As medianas da Região 2B são as maiores de todo o rio Paraopeba, ou seja, são significativamente maiores que as das demais regiões. Nesse sentido, os teores de Al podem estar associados ao transporte e deposições de materiais ricos em alumínio podem ter sido provenientes de contribuições da lixiviação de litotipos contendo Al e provenientes de rochas do Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte e de lixiviação de minerais ou disponibilização de argilominerais provenientes de rochas do Grupo Bambuí, além de contribuições locais da bacia e da influência das precipitações.

Na Região 2C, os *Boxplots* oscilaram ao longo do tempo, com reduções significativas graduais da chuva 2019 até a chuva 2021/2022, seguida de elevação significativa no período atual (2022/2023) (**Gráfico 11.4.2.1-6** e **Gráfico 11.4.2.1-7**). Assim, as chuvas mostraram medianas em 2019 de 33.000 mg/kg, em 2019/2020 de 22.048 mg/kg, em 2020/2021 de 12.844 mg/kg, em 2021/2022 de 10.184 mg/kg e em 2022/2023 de 22.873 mg/kg. Na análise inferencial de 2022/2023, percebeu-se que espacialmente houve variações em relação as concentrações de áreas a montante, tendo a região 2C valores significativamente superiores às regiões entre 1A e 2A, sem diferenças entre as regiões Montante, Ferro Carvão e 1B.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, *Boxplots* com oscilação dos valores de Al. As regiões Montante, 1B e 2B mostraram aumento das concentrações medianas e P75 na chuva 2022/2023. Enquanto as demais regiões (Ferro-Carvão, 2A e 2C) mostraram manutenção dos valores, com distribuição similar entre os *Boxplots* dos dois períodos. A região 1A foi a única que mostrou redução das medianas, apesar de apresentar *Boxplots* com distribuição próxima. A manutenção dos teores nessas regiões pode estar relacionada a baixa ocorrência natural de Al nestes trechos e ao acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como o reservatórios Estaca-Prancha. Já a região 2C, da mesma forma que para o Fe e Mn, mostrou comportamento mais destoante, com valores mais baixos na chuva 2021/2022 que no período atual, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 11.4.2.1-6 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

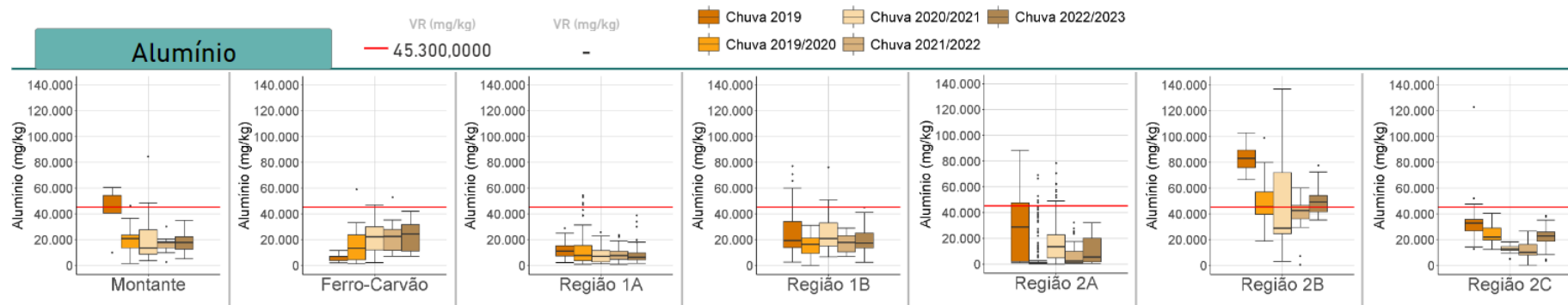


Gráfico 11.4.2.1-7 Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

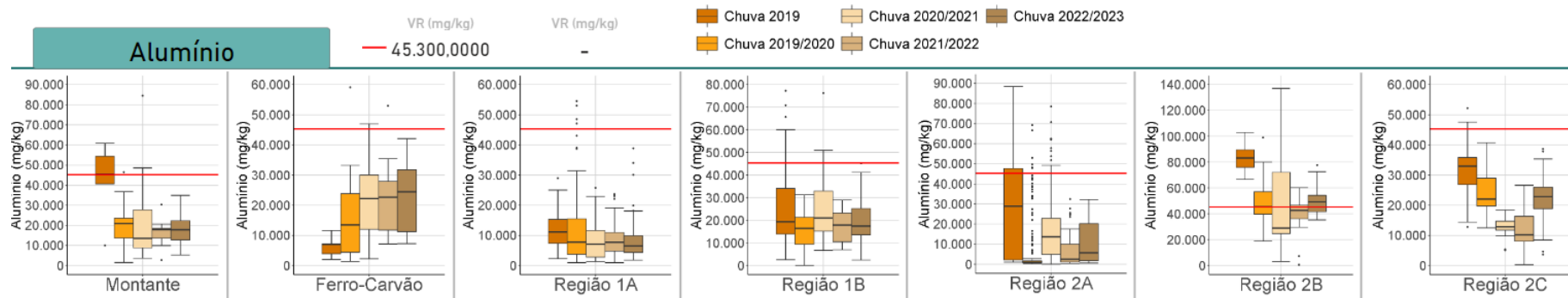


Tabela 11.4.2.1-5 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Alumínio.

	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 11.4.2.1-6 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	>	~	~	~	>	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	<	~	<	<	<
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	<	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	>	~	~	~	>	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	<	~	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	>	~	<	>	>	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	<	~	<	<	<
Ch. 19/20 X Ch. 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)

11.4.2.2. Elementos traço

▪ Chumbo

A distribuição estatística espacial e temporal do Chumbo nos períodos de chuva encontram-se no **Gráfico 11.4.2.2-1** e **Gráfico 11.4.2.2-2** (*Boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.2-2** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-2** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.2-1** mostra a evolução do Chumbo ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*. E o **Gráfico 11.4.2.2-2** apresenta a evolução do Chumbo ao longo dos períodos de chuva, com escala variável.

A Região Montante, quando comparada com as demais, observa-se que Chumbo apresentou oscilação nas concentrações, ainda abaixo dos valores orientadores, com aumento até a chuva 2019/2020, seguido de redução com manutenção até chuva 2022/2023. As medianas mostraram elevação entre a chuva/2019 (ca. 17,0 mg/kg) e a chuva 2019/2020 (ca. 19,2 mg/kg), com redução na chuva 2020/2021 (ca. 14,4 mg/kg), e manutenção na chuva 2021/2022 (ca. 14,3 mg/kg) e na chuva 2022/2023 (ca. 14,1 mg/kg). O Chumbo apresentou baixa variabilidade nesta porção da bacia do rio Paraopeba.

Na Região Ferro-Carvão, tem-se propensão a elevação das medianas ao longo dos períodos de chuva comparados. Esse comportamento reflete em um número maior de concentrações (P75) acima do VOR nível 1 nas chuvas de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. As chuvas de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 mostraram aumento significativo em relação a 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 chuvas foram de 16 mg/kg (2019), 31,8 mg/kg (2019/2020), 33,5 mg/kg (2020/2021), 27,8 mg/kg (2021/2022) e 34,5 mg/kg (2022/2023).

Na Região 1A, observou-se diminuição significativa das concentrações medianas de Chumbo ao longo dos períodos de chuva, com maior redução a partir de 2019/2020. A chuva 2019 mostrou valores superiores, de 14,5 mg/kg, seguido de aumento nas concentrações em 2019/2020 (65,9 mg/kg), e redução nos períodos de 2020/2021 (13,6 mg/kg), 2021/2022 (10,0 mg/kg) e 2022/2023 (8,7 mg/kg). Na **Tabela 11.4.2.2-2** observa-se que houve, na maior parte dos períodos avaliados, diferenças significativamente inferiores, sendo que, somente a chuva 2019/2020 mostrou diferenças significativamente superiores em relação a chuva de 2019. Apesar da constatação de Chumbo no rejeito da barragem B1, as concentrações medianas nas chuvas foram inferiores as concentrações detectadas no rejeito original (até 50 mg/kg; Geoviron, 2019), além de qualitativamente inferiores as maiores concentrações reportadas nos mapas da CPRM (2018; 32,8 mg/kg) e Arcadis (2020a). O termo qualitativo foi utilizado em razão que os procedimentos de coleta e análise dos sedimentos da CPRM (2018) são distintos do aplicado ao projeto. Desta forma, a comparação não é direta, mas qualitativa ou usada como referência de resultados anteriores a 2019, como já apresentado nas sessões técnicas do Meio Físico desde 2019.

Na Região 1B, as variações das concentrações apresentaram redução significativa das medianas desde 2019/2020, com manutenção dos valores nos períodos iniciais: 24,1 mg/kg em 2019; 23,7 mg/kg em 2019/2020; 20,9 mg/kg em 2020/2021; 17,4 mg/kg em 2021/2022; e 15,8 mg/kg em 2022/2023. Na análise inferencial percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de Chumbo foram um pouco maiores que nas regiões Montante e 1A, indicando acúmulo de chumbo nesta localidade, mais próximo dos locais de acúmulo de finos como no PT-14. As maiores concentrações medianas ocorreram na chuva 2019, provavelmente por conta das contribuições naturais da bacia, mas também relacionado a presença do rejeito das barragens. Nos demais períodos percebeu-se redução ao longo dos períodos sazonais e maior equilíbrio da deposição dessa substância na localidade, sem observação de deslocamento de massa em suspensão ou arraste contendo Chumbo, corroborando com o comportamento do P75, nas chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, que ficou abaixo do VOR nível 1 nos referidos períodos. No último período verificou-se um aumento dos valores relacionado principalmente as precipitações de acordo com a **Tabela 11.4.2.2-2** observa-se que, a Região 1B apresentou, durante os períodos monitorados, diferenças significativamente inferiores entre os períodos, e, em alguns casos, não mostrou diferenças significativas.

A Região 2A mostrou, na análise inferencial espacial, concentrações menores que a região Ferro-Carvão. A temporal mostrou que houve variação das medianas ao longo do monitoramento: com redução das medianas das chuvas em 2019/2020 e 2021/2022, com valores mais elevados em 2019, 2020/2021 e 2022/2023. Os *Boxplots* mostram redução gradativa entre as chuvas, tendo em 2019 medianas de 24,1 mg/kg; em 2019/2020 de 23,7 mg/kg; em 2020/2021 de 20,1 mg/kg; em 2021/2022 de 17,4 mg/kg, e em 2022/2023 de 15,8 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-1** e **Gráfico 11.4.2.2-2**). 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 conteúdos de Chumbo, 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. Avaliando a **Tabela 11.4.2.2-2** verifica-se que, para a maioria dos períodos analisados, a Região 2A mostrou diferenças significativamente inferiores, sendo que, somente na comparação entre as chuvas de 2022/2023 e 2019/2020 e entre as chuvas de 2020/2021 e 2019/2020 houve diferenças significativamente superiores.

Na Região 2B, as concentrações entre os períodos chuvosos apresentaram similaridade nos valores de medianas: com 27,35 mg/kg em 2019; 32,60 mg/kg em 2019/2020, 26,60 mg/kg em 2020/2021, 29,90 mg/kg em 2021/2022 e 29,25 mg/kg em 2022/2023. A análise estatística espacial mostrou que a região 2B apresenta valores significativamente superiores às demais

regiões. Enquanto a temporal mostra que na chuva 2022/2023, a concentração de chumbo foi significativamente superior que a observada na chuva 2021/2022 e na chuva 2020/2021 (**Tabela 11.4.2.2-2**). 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 ressuspender sedimentos.

Na Região 2C, nos últimos três períodos chuvosos percebe-se pequena variabilidade dos resultados, com registros abaixo do VOR nível 1. De forma que as concentrações medianas de chumbo são inferiores às do reservatório da UHE Retiro Baixo, sugerindo contribuição local proveniente de escoamento superficial de materiais das áreas desnudas. A análise estatística espacial mostrou que a região 2C apresenta valores significativamente superior à região 1A e 2A, inferiores a região 2B e não há diferença significativa com as demais regiões. Enquanto a temporal destaca que na chuva 2022/2023, a concentração de chumbo foi significativamente maior que a observada na chuva 2021/2022 e na chuva 2020/2021 (**Tabela 11.4.2.2-2**).

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, oscilação dos valores de Pb. As regiões 1A e 2C mostraram redução das concentrações medianas e P75 na chuva 2022-2023. Enquanto a Ferro-Carvão e região 2A apresentou aumento das medianas e P75, a região 1B indicou pequeno aumento da mediana e redução da P75, e a região 2B indicou o contrário, com pequena redução da mediana e aumento da P75.

Gráfico 11.4.2.2-1 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

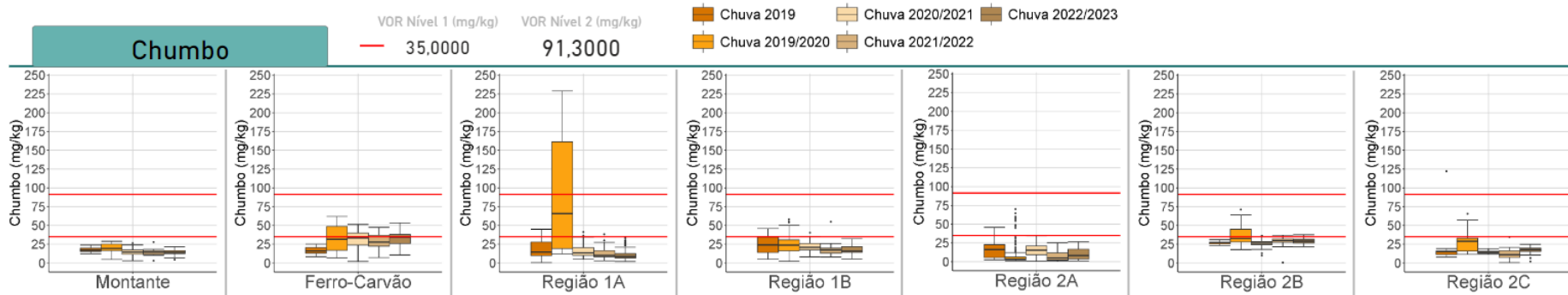


Gráfico 11.4.2.2-2 Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

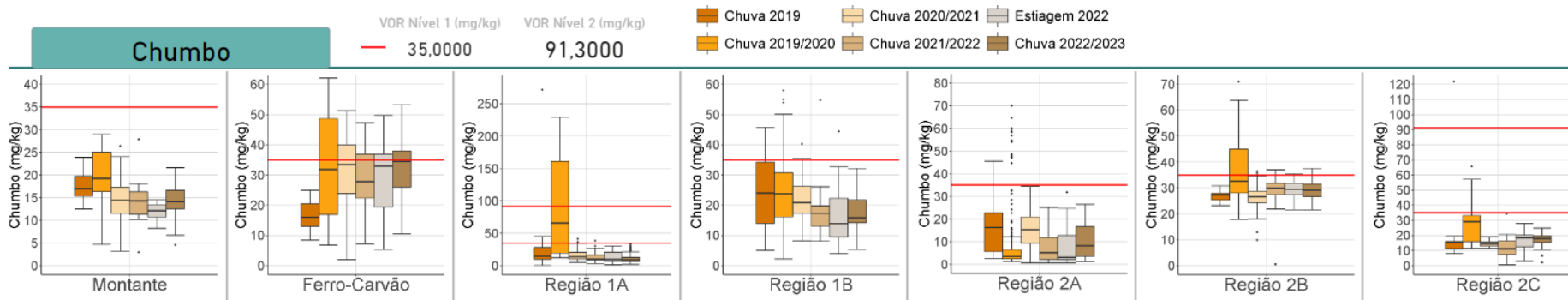


Tabela 11.4.2.2-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Chumbo.

	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 11.4.2.2-2 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	<	<	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	<	<	<	>	<	<
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	<	<	<	~	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	<	<	<	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	<	<	<	~	<	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	<	<	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	~	>	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	~	~	~	~	~
Ch. 19/20 X Ch. 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 chuva encontra-se no **Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4** (*Boxplots*) e **Tabela 11.4.2.2-3** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.2-4** (estatística sazonal temporal).

Do ponto de vista temporal, a região Montante mostrou reduções significativas no decorrer dos períodos de chuva em relação ao ciclo de 2019, que apresentou os maiores registros para a referida região (**Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4**). As concentrações do Cobre são relativamente baixas na Região Montante e pode ser decorrente de sua associação com granitoides que são comuns nesta região e de contribuições alóctones, possivelmente provenientes de lixiviação de rochas metavulcânicas associadas aos Grupos Nova Lima presentes na porção sudeste da bacia do rio Paraopeba e de erosões marginais ou até mesmo de exploração de areia que ocorre no leito do rio. Ademais, em relação ao uso e ocupação do solo, não se observou, do ponto de vista regional, áreas de exploração ou uso de Cobre, as concentrações de Cobre observadas nesta região apresentam concentrações e comportamento semelhante ao observado na Região 2C, que também é uma região que não foi afetada pelo rejeito.

Na região do Ferro-Carvão, observou-se pelo *Boxplot* incremento das concentrações ao longo dos períodos chuvosos de 2019 a 2021/2023, com moderado decréscimo no ciclo mais recente (2022/2023) (**Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4**), sendo esses teores, os maiores em comparação com todas as demais regiões. As concentrações medianas apresentaram comportamento similar, com elevação significativa dos valores nos quatro primeiros períodos chuvosos (2019 a 2021/2022) e posterior decréscimo na chuva 2022/2023. Ressalta-se que as medianas de concentração que na chuva/2019 foram de 39 mg/kg, na chuva 2019/2020 foram de 77,1 mg/kg, na chuva 2020/2021 de 101,95 mg/kg, na chuva 2021/2022 de 111,0 mg/kg e na chuva 2022/2023 de 98,5 mg/kg. Apesar destas concentrações estarem em desacordo com a Resolução CONAMA 454/12, por ser uma área de intervenções de obras essas concentrações elevadas são esperadas haja vista o revolvimento contínuo dos sedimentos na localidade. De acordo com a **Tabela 11.4.2.2-4** observa-se que na maior parte dos períodos analisados, não houve diferenças significativas, no entanto, as chuvas 2022/2023, 2021/2022 e 2020/2021 apresentaram diferenças significativamente superiores em relação as chuvas de 2019.

Na Região 1A, os *Boxplots* mostraram diminuição das concentrações de Cobre ao longo do tempo, levando em consideração os períodos de chuva (**Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4**). A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostra que o ciclo chuvoso de 2019 apresentou concentrações significativamente superior em relação a todas as chuvas posteriores. Ainda, a chuva/2019 apresentou a maior mediana de concentração (30 mg/kg), e os ciclos chuvosos posteriores apresentaram redução contínua no comportamento das medianas, com as respectivas concentrações de 21,25 mg/kg, 13,80 mg/kg, 15,70 mg/kg e 11,10 mg/kg para as chuvas de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. 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 das barragens e que os sedimentos ali depositados têm característica química de rejeitos, a ocorrência do Cobre pode estar relacionada com acúmulo de sedimentos contendo rejeito. 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. Os resultados dos últimos ciclos têm mostrado que, para a maioria dos pontos amostrados, houve uma tendência de redução significativa das concentrações.

Na Região 1B, o *Boxplot* mostrou uma diminuição das concentrações ao longo do tempo (**Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4**), com as concentrações medianas mais altas que nas regiões Montante e 1A. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou, na maior parte do tempo, diferenças significativamente inferiores, com exceção de 2022/2023 em relação a 2021/2022 e 2020/2021 e 2021/2022 em relação a 2020/2021, os quais mostraram manutenção das concentrações. Enquanto a análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou diferenças significativas superiores em relação a região Montante e 1A. 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. Na análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**), somente o período de chuva de 2020/2021 apresentou diferenças significativas superiores em relação a 2019/2020, o restante dos períodos mostrou diferenças inferiores, ou manutenção. As medianas registradas na região 2A foram: 42,75 mg/kg na chuva 2019; 5 mg/kg na chuva 2019/2020; 19,40 mg/kg na chuva 2020/2021; 4,76 mg/kg na chuva 2021/2022; e 8,28 mg/kg na chuva 2022/2023. Apesar da chuva/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).

Na Região 2B, região do reservatório da UHE Retiro Baixo, o comportamento do Cobre é de redução entre as chuvas. Assim na chuva/2019 a mediana foi de 58,25 mg/kg, na chuva 2019/2020 de 39,80 mg/kg, na chuva 2020/2021 de 31,40 mg/kg, na chuva 2021/2022 de 42,30 mg/kg, e na chuva 2022/2023 de 43,15 mg/kg. De acordo com a comparação temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) a região 2B mostra diferenças significativas superiores em 2022/2023 em relação a 2020/2021 e 2019/2020, e em 2021/2022 em relação a 2020/2021. A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**), mostrou que houve diferenças significativas superiores na Região 2B em relação a Montante, 1A e 2A. Por outro lado, mostrou inferioridade em relação a Região Ferro-Carvão e manutenção em relação a 1B.

Na Região 2C, o *Boxplot* mostrou oscilação das medianas semelhantes entre si, exceto para 2019, onde a mediana se mostrou elevada, acima do VOR 1 (**Gráfico 11.4.2.2-3** e **Gráfico 11.4.2.2-4**). De modo geral, nota-se redução das concentrações ao longo dos anos, com aumento somente no período atual (2022/2023). A análise estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-4**) mostrou diferenças significativas superiores em 2022/2023 em relação a 2021/2022, 2020/2021 e 2019/2020, os demais períodos mostraram diferenças inferiores ou manutenção. A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-3**) mostrou diferenças significativas superiores somente em relação a região 2A, em relação as demais regiões mostrou inferioridade ou manutenção. Na chuva/2019 a mediana foi de 41,50 mg/kg, na chuva 2019/2020 de 16,70 mg/kg, na chuva 2020/2021 de 13,65 mg/kg, na chuva 2021/2022 de 13,70 mg/kg, e na chuva 2022/2023 de 24,80 mg/kg. De modo geral, as concentrações neste trecho estariam relacionadas as condições locais, como desmatamentos, solos expostos que promovem a erosão dos solos e aporte ao canal fluvial.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, manutenção das medianas dos valores de Cu. As regiões Ferro-Carvão, 1B, 2B e 2C mostraram concentrações semelhantes de P75 na comparação entre esses dois períodos, já as regiões Montante, 1A e 2A mostraram maiores oscilações, ainda assim, os valores foram relativamente próximos. A manutenção dos teores nessas regiões pode estar relacionada ao acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como os reservatórios UTE Igarapé e UHE Retiro Baixo.

Gráfico 11.4.2.2-3 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

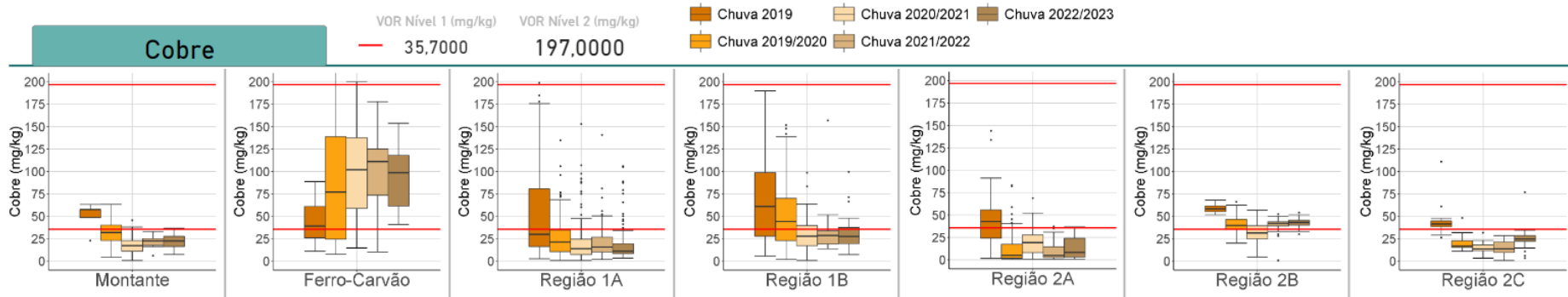


Gráfico 11.4.2.2-4 Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

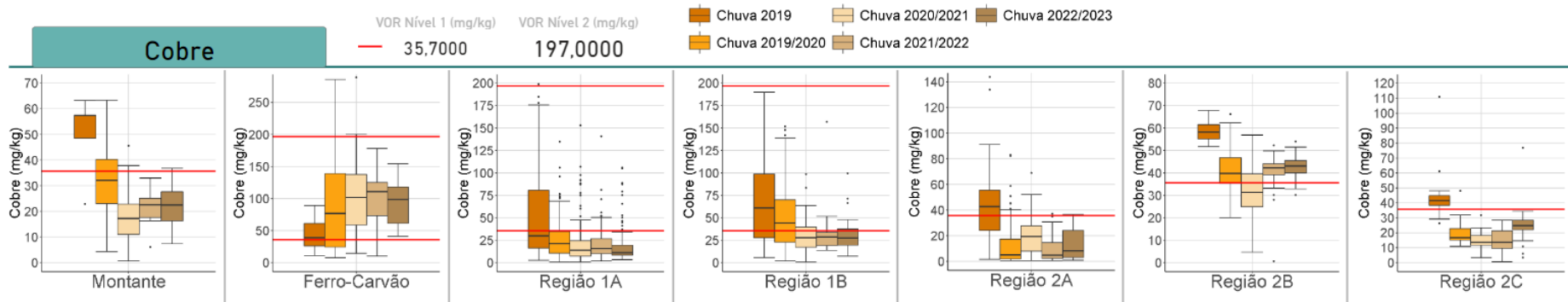


Tabela 11.4.2.2-3 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cobre.

	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 11.4.2.2-4 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	<	<	<	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	<	<	<	<	<	<
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	~	<	~	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	<	<	<	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	<	>	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	<	<	<	<	<	<
Ch. 19/20 X Ch. 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 nos **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).

Na Região Montante, o Níquel teve uma variação baixa para todos os períodos sazonais, estando com as concentrações medianas com valor de 30,9 mg/kg na chuva/2019, 23 mg/kg na chuva 2019/2020, 16,3 mg/kg na chuva 2020/2021, 17,7 mg/kg na chuva 2021/2022 e 20,05 mg/kg na chuva 2022/2023 (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**). Os resultados do último período de chuva completo não apresentaram diferença significativa em relação aos demais períodos de chuva pretéritos, sugerindo tendência de estabilidade das concentrações (**Tabela 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). À semelhança do apresentado para o Chumbo, o termo qualitativo foi empregado para referenciar outras coletas prévias a 2019 e em sedimentos e os valores de comparação são de ordem qualitativa haja vista que os procedimentos aplicados pela CPRM para avaliação de sedimentos são distintos dos aplicados para avaliação ambiental deste projeto, cujo procedimento de coleta seguiram as orientações do Guia ANA/CETESB (2011) e a análise seguiu método 3050B da USEPA.

Na Região Ferro-Carvão, o comportamento do Níquel é, em geral, de elevação das concentrações medianas a cada período de chuva. Especificamente no período sazonal de chuva 2021/2022 houve uma redução dessa métrica, todavia, no período sequente, já notou-se variações positivas na mediana. Neste trecho é importante considerar que o aumento deste analito pode ocorrer devido a alteração do ambiente em decorrência das obras de engenharia na região. Assim, na chuva 2019 a mediana foi de 15,5 mg/kg, na chuva 2019/2020 a mediana foi de 33,80 mg/kg, na chuva 2020/2021 a mediana foi de 41,00 mg/kg, na chuva 2021/2022 a mediana foi de 35,90 mg/kg e na chuva 2022/2023 a mediana foi de 36,00 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**). Temporalmente, quando comparado o último período de chuva (2022/2023) com os demais, nota-se apenas na chuva 2019, diferença significativa superior (**Tabela 11.4.2.2-6**). Nos rejeitos originais avaliados pela Geoenvion (2019), as concentrações medianas de Níquel chegaram a 50 mg/kg, ou seja, os valores nos sedimentos detectados no ribeirão Ferro-Carvão foram qualitativamente menores em relação ao rejeito e mais elevados quando comparados qualitativamente com os dados da CPRM 2008 a 2009 (CPRM, 2018).

Na Região 1A, observa-se o comportamento predominante de redução das medianas nos períodos de chuva comparados. Na chuva de 2019 a mediana foi de 16,5 mg/kg, abaixo do VOR nível 1 da legislação. Na chuva 2019/2020 a mediana foi de 20,8 mg/kg, acima do VOR nível 1, porém, abaixo do VOR nível 2 da legislação. Nos períodos seguintes, o valor mediano ficou abaixo do VOR 1, à saber; 15,95 mg/kg (2020/2021), 11 mg/kg (2021/2022) e 10,8 mg/kg (2022/2023). A análise espacial mostrou que a região 1A teve redução significativa nas concentrações ao se comparar com região Ferro-Carvão (**Tabela 11.4.2.2-5**).

Na Região 1B, a ocorrência do Níquel pode estar associada com a lixiviação de rejeitos nos primeiros períodos sazonais, porém do ponto de vista estratigráfico, 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, e corroboram com as medianas observadas, na chuva 2019 (28,95 mg/kg), chuva 2019/2020 (25,7 mg/kg), chuva 2020/2021 (18,85 mg/kg), chuva 2021/2022 (16,6 mg/kg) e chuva 2022/2023 (18,20 mg/kg), observadas no *Boxplot* do **Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**. A análise espacial mostrou que a região 1B teve valores significativamente maiores de Ni que as regiões Montante e 1A (**Tabela 11.4.2.2-5**). A **Tabela 11.4.2.2-6** evidencia diferenças significativas inferiores quando comparado o período de chuva 2022/2023 com os dois primeiros, 2019 e 2019/2020, entretanto, com tendência ao cenário de ausência de diferenças significativas nos períodos de chuva 2020/2021 e 2021/2022, sustentando a ideia de redução gradual das concentrações de Níquel entre os períodos chuvosos comparados.

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 uma maior quantidade de sedimentos finos, e que também mostraram redução significativas e graduais ao longo dos períodos sazonais. Na chuva 2019 a mediana do Níquel foi de 24,7 mg/kg, na chuva 2019/2020 a mediana foi de 9,3 mg/kg, na chuva 2020/2021 a mediana foi de 15,7 mg/kg, na chuva 2021/2022 a mediana foi de 0,5 mg/kg e na chuva 2022/2023 a mediana foi de 0,5 mg/kg (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**). Foram observadas diferenças significativamente superiores somente na comparação entre a chuva 2020/2021 e 2019/2020 (**Tabela 11.4.2.2-6**).

A Região 2B apresenta comportamento das medianas de Níquel diferente das demais regiões, com concentrações significativamente maiores. O *Boxplot* mostrou que a chuva 2019 apresenta a maior mediana (35,35 mg/kg), chuva de 2019/2020 (23,8 mg/kg), chuva 2020/2021 (20 mg/kg), chuva 2021/2022 (23,6 mg/mg) e chuva 2022/2023 (27,5 mg/kg). 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 que no ano de 2020 ocorreram chuvas de volumes históricos, é possível sugerir uma maior influência, com aumento no transporte de sedimentos e o conseqüente aumento da deposição. Através do teste de comparação espacial (**Tabela 11.4.2.2-5**) é possível observar que a região 2B apresenta valores significativamente inferiores apenas em relação ao Ferro-Carvão e que, temporalmente (**Tabela 11.4.2.2-6**), quando comparado o período de chuva 2022/2023 com os demais, apenas em relação a chuva 2019 que a diferença das concentrações foi significativamente inferior.

Para a Região 2C, as variações nas concentrações foram baixas até a chuva 2021/2022 e apresentou aumento no valor mediano no período de chuva mais recente (**Gráfico 11.4.2.2-5** e **Gráfico 11.4.2.2-6**). A análise espacial mostrou que a região 2C apresenta valores significativamente inferiores em relação a todas as demais (**Tabela 11.4.2.2-5**). A análise temporal mostrou que os resultados da chuva 2022/2023 são significativamente superiores em

relação ao período de chuva de 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (**Tabela 11.4.2.2-6**). As chuvas apresentaram medianas em 2019 de 16,4 mg/kg; em 2019/2020 de 11,8 mg/kg; em 2020/2021 de 0,5 mg/kg; 2021/2022 de 0,5 mg/kg; e 2022/2023 de 18,5 mg/kg.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores medianos de Ni. Todas as regiões, com exceção da Montante, 2B e 2C, mostraram distribuição próxima entre os *Boxplots* dos dois períodos, relacionada principalmente a ocorrência de rochas máficas e ultramáficas do grupo Nova Lima. A região Montante mostrou ligeira diminuição dos valores medianos, com menor distribuição do *Boxplot* na estiagem/2022, possivelmente relacionado a baixa ocorrência deste analito nesta região. Já as regiões 2B e 2C, exibiram teores mais elevados de Ni no período 2022/2023 do que a estiagem/2022.

Gráfico 11.4.2.2-5 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

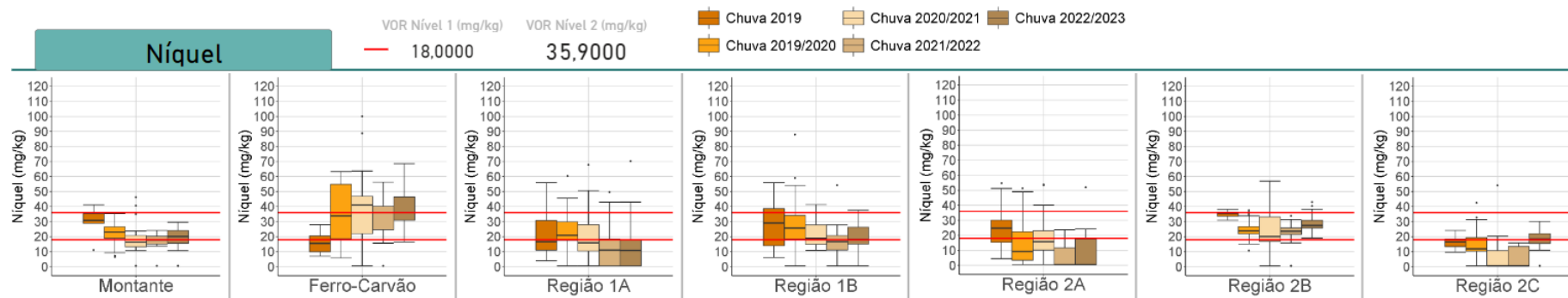


Gráfico 11.4.2.2-6 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

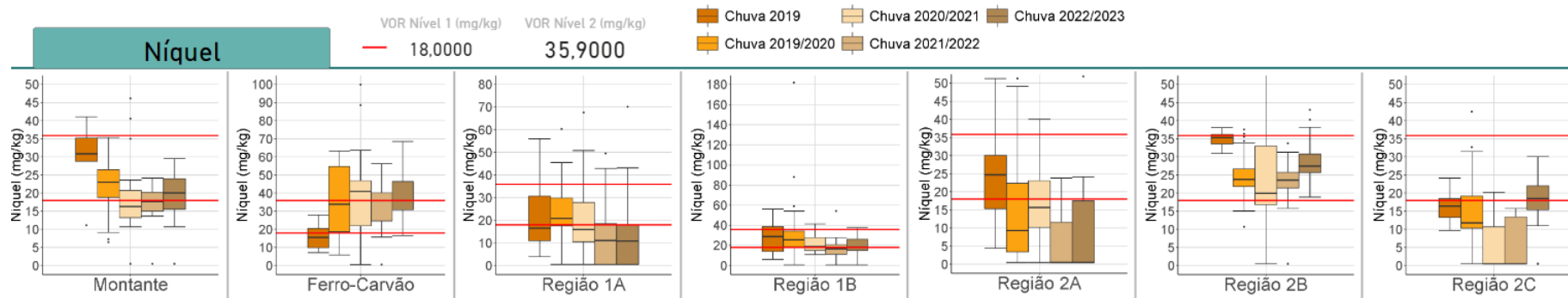


Tabela 11.4.2.2-5 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Níquel.

	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 11.4.2.2-6 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	~	~	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	<	~	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	<	<	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	<	<	<	<	~
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	<	<	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	<	<	<	<	~	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	<	<	<	<	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	<	>	~	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	~	~	<	<	<
Ch. 19/20 X Ch. 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 chuva 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 chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Ao se avaliar o gráfico *Boxplot* do Cádmio tem-se que praticamente 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, concentram pouca ocorrência de Cádmio no rio Paraopeba, predominando com concentração de 0,1 mg/kg, é de se esperar a baixa ocorrência deste elemento nos sedimentos analisados.

No atual período de chuva (2022/2023), o Cd teve resultados acima do LQ, ou seja, detectáveis, em todas as regiões monitoradas. Foram verificadas concentrações menores que os períodos de chuva anteriores, principalmente a chuva 2021/2022, com valores de mediana abaixo do VOR (0,06 mg/kg), onde somente o P75 atingiu o limite (0,61 mg/kg). Somente os períodos chuva 2019/2020 e chuva 2021/2022 mostraram concentrações quantificáveis de Cd nas regiões monitoradas. A chuva 2019/2022 mostrou valores acima do LQ somente nas regiões Ferro-Carvão e 2C. Enquanto a chuva 2021/2022 apresentou teores detectáveis em todas as regiões.

A região Montante exibiu valores quantificáveis só em 2021/2022 e em 2022/2023, com redução do P75 em 0,18 e 0,12 mg/kg, respectivamente. As medianas também diminuíram de 0,14 mg/kg para 0,1 mg/kg (LQ). Isso sugere ocorrências de Cd na bacia, principalmente nos dois últimos períodos sazonais, influenciando nas concentrações de demais trechos a jusante.

A região do Ferro-Carvão apresentou os maiores valores significativos de Cádmio, com tendência de redução em 2022/2023 em comparação com 2021/2022 (**Gráfico 11.4.2.2-7** e **Gráfico 11.4.2.2-8**), com medianas de 0,69 mg/kg e 0,46 mg/kg, respectivamente. Como a região é represada, os sedimentos finos tendem a se dissipar e se acumularem na lagoa de decantação, somado a influência das precipitações, que favorecem a oscilação das concentrações associadas a estes finos.

Já a Região 1A mostrou manutenção das concentrações ao longo do tempo, com medianas baixas e iguais ao LQ (LQ<0,1 mg/kg). Ressalta-se que apesar disso, na chuva 2019/2020 foram detectáveis P75 de 0,36 mg/kg e mediana de 0,17 mg/kg. Valores similares também ocorreram na chuva 2021/2022, com P75 em 0,81 mg/kg e mediana de 0,17 mg/kg. Com redução em 2022/2023, mostrando P75 de 0,14 mg/kg e 0,10 mg/kg (2021 e 2022).

Na Região 1B, apesar das medianas na chuva 2021/2022 e 2022/2023 serem próximas, as chuvas mostraram valores P75 de 0,23 mg/kg e 0,21 mg/kg, respectivamente. Tais resultados indicam a baixa ocorrência do Cádmiio, como já citado, uma vez que além dos poucos resultados detectados, as concentrações observadas estão abaixo do nível 1 da Resolução CONAMA 454, que é de 0,6 mg/kg.

Nas regiões 2B e 2C, as concentrações medianas oscilaram com o tempo e conforme a região, com prevalência medianas igual ao LQ, valores abaixo do nível 1 da Resolução CONAMA 454 (**Gráfico 11.4.2.2-7** e **Gráfico 11.4.2.2-8**). A região 2B mostrou medianas até a chuva 2020/2021 iguais ao LQ, contudo, na chuva 2021/2022, mostrou valores P75 (0,23 mg/kg) e medianas (0,19 mg/kg) maiores. Que no ciclo 2022/2023, mantiveram o P75 (0,23 mg/kg) mas reduziram a mediana (0,16 mg/kg). Já a região 2C redução dos valores desde 2019/2020 (P75 0,32 mg/kg e mediana 0,2 mg/kg), com redução para os períodos de 2021/2022 (P75 0,16 mg/kg e mediana 0,1 mg/kg) e 2022/2023 (P75 0,19 mg/kg e mediana 0,1 mg/kg). Os valores relacionam-se principalmente a contribuições locais.

A avaliação estatística espacial mostrou que na chuva 2022/2023, as concentrações de Cd foram significativamente maiores na região Ferro-Carvão em relação às demais, seguido pela região 1A e 1B. As regiões 2B e 2C apresentaram aumento em relação às regiões a montante (**Tabela 11.4.2.2-7**). Em relação a estatística temporal (**Tabela 11.4.2.2-8**), apesar dos resultados mostrarem aumentos significativos ao longo dos últimos ciclos de chuva, eles são menores que o valor de referência da Resolução CONAMA 454/12 (exceto para valores P75 na Ferro-Carvão) e pouco acima do limite de quantificação, o que corrobora com a literatura. Neste sentido, as variações do Cd devem-se possivelmente a contribuições locais e difusas da bacia, indicado pela presença de valores na região Montante, e até mesmo pelo acúmulo de materiais finos no ribeirão Ferro-Carvão.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, oscilação entre diminuição e manutenção dos valores de Cd para maioria das regiões. As regiões Montante e 2A mostraram aumento dos valores, que antes não foram quantificáveis (abaixo do LQ). Já as regiões Ferro-Carvão, 1A e 2B mostraram manutenção dos valores, com distribuição próxima entre os *Boxplots* dos dois períodos, porém com redução dos valores medianos e P75. Enquanto as regiões 1B e 2C exibiram redução mais evidente, principalmente das medianas. A oscilação dos teores nas regiões Ferro-Carvão e 1B pode estar relacionada aos efeitos das precipitações, com transporte maior de areia ou mistura de materiais de composição diferentes, acumulados em trechos sinuosos e de reservatório. Já as regiões 2B e 2C, da mesma forma que para os outros metais, relacionou-se possivelmente por condições de reservatório (2B) e por processos locais, sob influência das precipitações.

Gráfico 11.4.2.2-7 Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

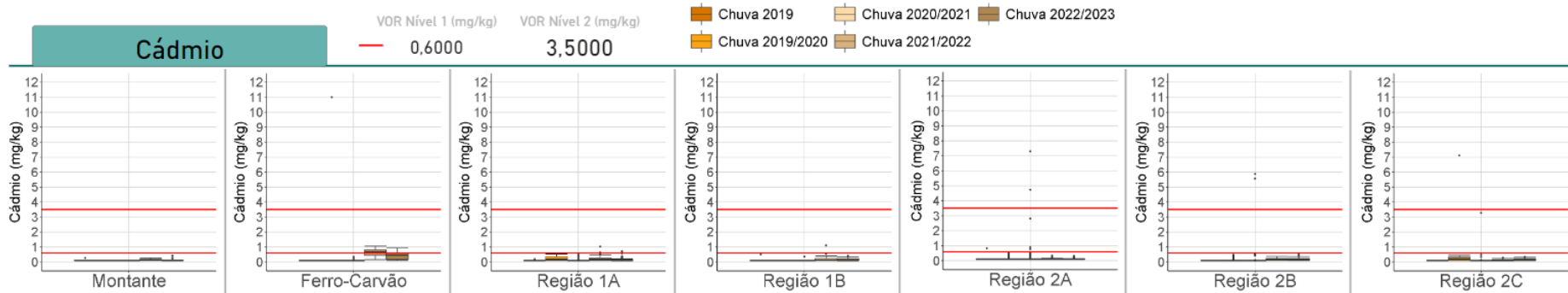


Gráfico 11.4.2.2-8 Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

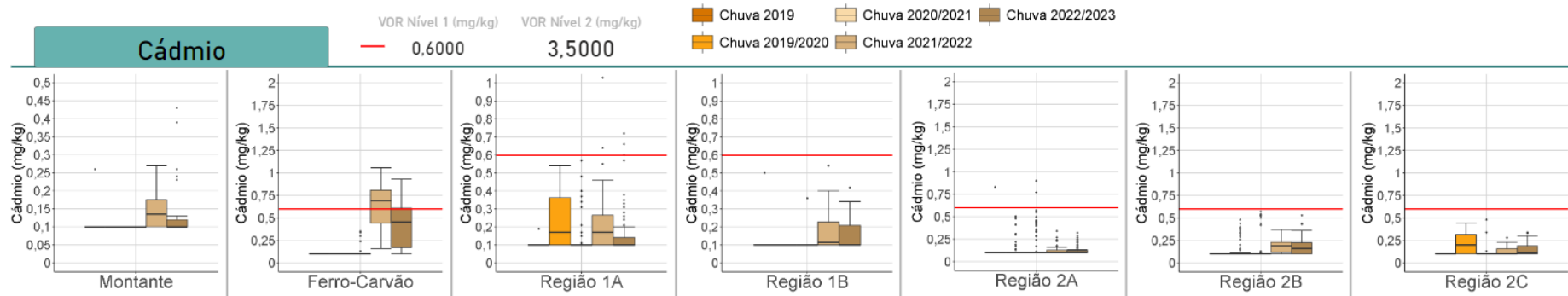


Tabela 11.4.2.2-7 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cádmiu.

	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 11.4.2.2-8 - Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cádmiu em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	<	~	<	~	~	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	>	>	>	>	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	>	>	<	>	>	>	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	>	>	>	>	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	>	>	>	>	~	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	>	>	~	>	>	>	<
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	>	>	>	>	>
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	~	<	~	>	~	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	~	~	>	~	>	~	~
Ch. 19/20 X Ch. 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 chuva encontram-se nos **Gráfico** 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** mostra a evolução do Arsênio ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*, enquanto o **Gráfico 11.4.2.2-10** apresenta todos os resultados analíticos em escala variável.

A bacia do rio Paraopeba mostra ocorrência de Arsênio em toda a extensão. Na Região Montante, observando os *Boxplots*, 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 (Arcadis, 2020b).

O Arsênio é identificado desde a cabeceira do rio Paraopeba, sendo sua presença associada a deposição de materiais provenientes do solo/intemperismo de rochas, bem como de atividades de uso do solo (mineração, exploração de areia na calha do Paraopeba, agropecuária e outras contribuições difusas), visto que este elemento em sedimentos sob condição de aeração tende a se oxidar e precipitar e tal condição tem sido observada desde antes do rompimento da barragem B1. Em 2019 constatou-se que amostras de sedimentos coletadas no PT-01 (Região 1A) tiveram concentrações maiores que no Fe-Carvão. Em 2020 as medianas foram próximas entre Fe-Carvão e 1A, entretanto, em Fe-Carvão, desde set/2019 com o fechamento da estaca prancha e escavação de uma lagoa de contenção para bombeamento da água para tratamento na ETA, os sedimentos se dissiparam na lagoa, incluindo os finos, e isso proporcionou aumento nas concentrações de As e demais metais nesta lagoa. Nas demais regiões, as concentrações medianas foram relativamente próximas ao longo dos tempos chuvosos ou, em alguns casos, como na 2B, demonstrou redução. Portanto, o refluxo dos sedimentos até o PT-01 não alterou a qualidade do sedimento no rio Paraopeba para a ocorrência do As, que aliás, desde a região montante apresentou concentrações acima do VOR 1, estabelecidos na Resolução CONAMA 454/12.

Na chuva/2019 a mediana de Arsênio foi de 14,7 mg/kg, na Região Montante, seguido de redução na chuva 2019/2020, que teve mediana de 12,6 mg/kg, com nova redução na chuva 2020/2021, em que a mediana foi de 10,10 mg/kg, seguido de elevação em 2021/2022 com 12,2 mg/kg, e posterior redução em 2022/2023 com 11,15 mg/kg. As oscilações de concentrações observadas não apresentaram diferenças significativas entre as chuvas analisadas (**Tabela 11.4.2.2-9**).

Na região Ferro-Carvão, as concentrações de Arsênio apresentaram o mesmo comportamento observado nos demais metais analisados, em que há elevação das concentrações ao longo das chuvas avaliadas. Nas chuvas de 2019, a mediana foi de 2,95 mg/kg; em 2019/2020, de 8,70 mg/kg; em 2020/2021, de 13,45 mg/kg; em 2021/2022, de 13,30 mg/kg, e em 2022/2023 de 15,45 mg/kg. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) mostrou, da mesma forma que para alguns outros parâmetros, aumento significativo entre os períodos de chuva de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 em relação a 2019. 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.

Na Região 1A, os *Boxplots* exibiram concentrações medianas similares ao longo do período (**Gráfico 11.4.2.2-9** e **Gráfico 11.4.2.2-10**) e similares com os valores da região 1B. As concentrações medianas foram, em 2019 (5,95 mg/kg), em 2019/2020 (8,13 mg/kg), em 2020/2021 (7,77 mg/kg), em 2021/2022 (9,44 mg/kg), em por fim, em 2022/2023 (7,46 mg/kg). Na região 1A, a **Tabela 11.4.2.2-10** mostra diferenças significativas superiores nos períodos 2022/2023 em relação a 2019, 2021/2022 em relação a 2020/2021, 2021/2022 em relação a 2019, 2020/2021 e 2019/2020 em relação a 2019.

Na Região 1B, as concentrações medianas se mantiveram relativamente próximas ao longo dos períodos sazonais, e apresentaram incremento nas chuvas de 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, em comparação a 2019. As concentrações medianas para os diferentes períodos de chuva foram de 7,7 mg/kg (2019), 9,3 mg/kg (2019/2020), 10,55 mg/kg (2020/2021), 9,88 mg/kg (2021/2022) e 11,0 mg/kg (2022/2023). Na avaliação estatística espacial (**Tabela 11.4.2.2-9**) observa-se que a região 1B mostrou diferença significativa superior a região 1A. 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 As, quando presente nesta matriz.

As medianas de Arsênio da Região 2A nos períodos de chuva analisados, tiveram oscilações entre si. As medianas, para os diferentes períodos de chuva, foram de 7,85 mg/kg (2019), de 2,40 mg/kg (2019/2020), de 9,13 mg/kg (2020/2021), 4,34 mg/kg (2021/2022), e 5,33 mg/kg (2022/2023). A análise espacial (**Tabela 11.4.2.2-9**) mostrou diferenças significativas inferiores em relação as regiões Ferro-Carvão, Montante, 1A e 2B, enquanto a análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) apresenta diferenças significativas superiores em 2022/2023, 2021/2022 e 2020/2021, todos em relação a 2019/2020). 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 que as medianas variaram pouco, com aumento na chuva de 2019 e diminuição em 2021/2022. 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), mostrando ser a região que apresenta as maiores diferenças significativas superiores em relação a todas as regiões, exceto Ferro-Carvão. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) mostrou apenas manutenção entres os períodos de chuva analisados. As medianas, para os diferentes períodos de chuva, foram de 14,85 mg/kg (2019), de 13,7 mg/kg (2019/2020), de 13,65 mg/kg (2020/2021), 13,7 mg/kg (2021/2022) e

(2022/2023). Ou seja, o aporte de Arsênio no reservatório se manteve muito semelhante em todos os períodos sazonais, desde o rompimento das barragens, o que sugere que as condições de reservatório/ambiente 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* mostraram oscilação nas concentrações de As, com elevação das medianas ao longo das chuvas avaliadas. A análise temporal (**Tabela 11.4.2.2-10**) mostrou elevação significativa das concentrações medianas entre as chuvas de 2022/2023 em relação a 2021/2022 e a 2019/2020. Além de 2023/2023, 2020/2021 e 2019/2020, todos em relação a 2019, para o restante dos períodos houve manutenção do comportamento. Avaliando-se espacialmente (**Tabela 11.4.2.2-9**), as concentrações da região 2C, nota-se que tal região mostrou diferenças significativas inferiores a todas as demais regiões, exceto em relação a 2A, que não apresentou diferenças de valores, o que também sugere uma maior influência de contribuições locais e difusas nas concentrações deste analito.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores medianos de Arsênio nas regiões Montante, 1A e 2B. As regiões Ferro-Carvão, 1B e 2A mostraram distribuição próxima entre os *Boxplots* dos dois períodos, relacionada principalmente a ocorrência comum deste analito na bacia do rio Paraopeba. A região 2C, da mesma forma que para os outros metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a chuva 2021/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 11.4.2.2-9 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

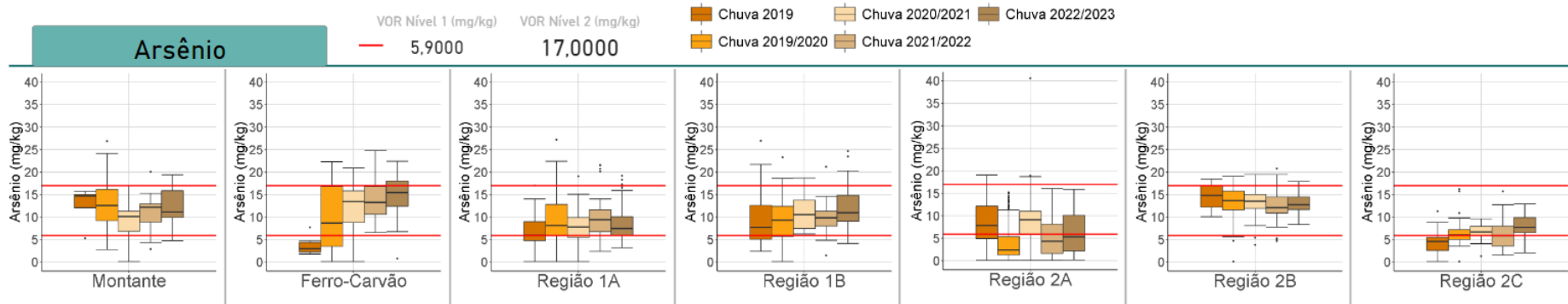


Gráfico 11.4.2.2-10 Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

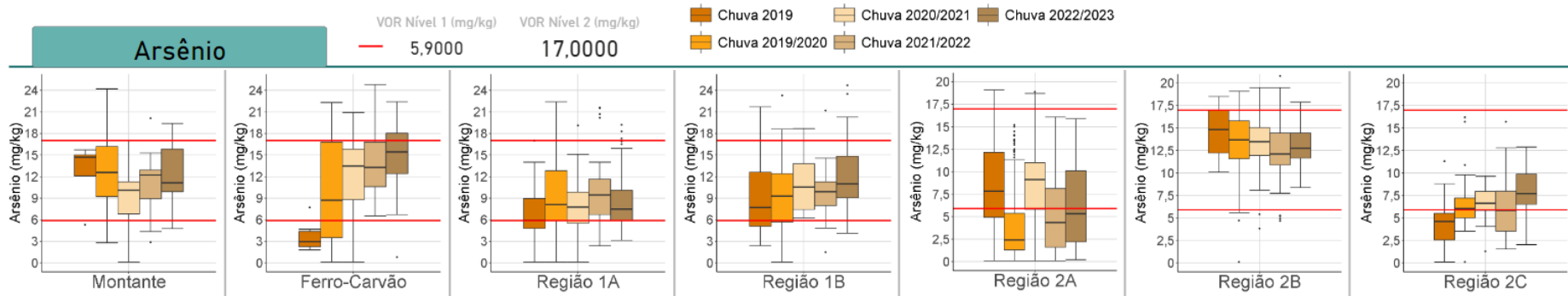


Tabela 11.4.2.2-9 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Arsênio.

	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 11.4.2.2-10 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	>	~	~	~	<	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	>	~	~	>	>	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	>	>	<	~	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	>	~	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	>	~	~	~	>	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	>	~	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	~	~	~	>	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	>	>	~	~	>
Ch. 19/20 X Ch. 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 chuva 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 chuva, 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 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 da variação das concentrações de cromo.

Na **Tabela 11.4.2.2-11** é possível identificar que a Região 2B apresenta teores significativamente maiores que qualquer outra região, enquanto a região do Ferro Carvão é a região com teores mais baixos, com diferenças significativas inferiores em relação as demais regiões. Além disso, excluindo-se a Região 2B, todas as demais apresentam teores significativamente inferiores em relação a região de Montante.

Na Região Montante, tem-se que a chuva/2019 apresentou as maiores concentrações medianas, 80,6 mg/kg, ocorrendo redução para 66,1 mg/kg em 2019/2020. Em 2020/2021 ocorre nova redução, para 52,5 mg/kg, porém em 2021/2022 há um aumento para 58,45 mg/kg, com manutenção da mediana em 2022/2023 (58,3 mg/kg). Tais valores medianos aproximam-se com os observados pelo mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020b) que indica nessa região variações entre 43 mg/kg e 86 mg/kg.

A Região Ferro-Carvão, apresenta na chuva/2019 os menores valores medianos históricos (13,5 mg/kg). Para chuva/2019-2020, observa-se o maior valor mediano histórico (26,40 mg/kg). Em 2020/2021 houve manutenção do valor de mediana (26,1 mg/kg), enquanto em 2021/2022, observa-se um aumento para 29,4 mg/kg. Para chuva 2022/2023 a mediana apresentou redução para 23,05 mg/kg. Tais valores também corroboram com os encontrados no mapa geoquímico (Arcadis, 2020b).

Na Região 1A, as concentrações medianas entre os períodos de chuva variaram entre 24,15 mg/kg e 31 mg/kg, com poucas oscilações entre os anos, porém com maior valor observado na chuva 2019 (31 mg/kg). Já na Região 1B, a faixa de variação das concentrações medianas foi de 44 a 50,9 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).

Na Região 2A, percebe-se expressiva redução das medianas com o passar dos períodos de chuva. Em 2019 a concentração mediana era de 61,50 mg/kg e o resultado de chuva 2022/2023 foi de 29,7 mg/kg. Na Região 2B é observado padrão de estabilidade nos dois primeiros

períodos sazonais de chuva monitorados, seguindo de uma redução significativa dos valores em chuva 2020/2021 e aumento significativo em chuva 2021/2022. Em chuva 2022/2023 é observado caráter de aumento, com aumento significativo entre os períodos. Os valores variam de 60 a 85 mg/kg, com a maior mediana ocorrendo na chuva/2019 (83,4 mg/kg) e a menor ocorrendo em 2020/2021 (63 mg/kg). Em ambas as regiões as concentrações observadas são próximas às observadas no mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020b).

Na Região 2C, observa-se concentrações medianas muito próximas ao VOR nível 1 da legislação (37,3 mg/kg), com redução de 2019 a 2020/2021 e aumento progressivo em 2021/2022 e 2022/2023: 41,4 mg/kg (2019); 36 mg/kg (2019/2020); 31,6 mg/kg (2020/2021); 34,8 mg/kg (2021/2022) e 53,3 mg/kg (2022/2023) (**Gráfico 11.4.2.2-11** e **Gráfico 11.4.2.2-12**). O comportamento da mediana em desacordo com o 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.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 apresentou, de modo geral, oscilação dos valores de Cromo. A região Montante apresentou aumento, enquanto no trecho da Região 1A a Região 1B apresentaram manutenção das concentrações na chuva 2022/2023, relacionada a uma estabilização na disponibilidade e aporte de Cr nestes trechos. Na Região 2A houve comportamento de aumento da mediana de chuva 2022/2023 em comparação a estiagem/2022, enquanto na 2B e 2C houve manutenção dos valores, comportamento relacionado a principalmente a ocorrência de rochas máficas e ultramáficas do grupo Nova Lima na região, além do acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como os reservatórios de UTE Igarapé e UHE Retiro Baixo.

Gráfico 11.4.2.2-11 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

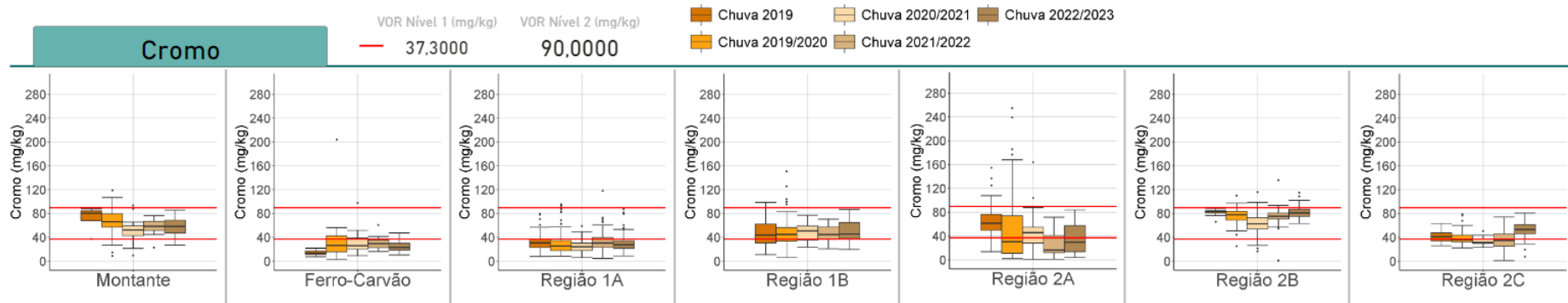


Gráfico 11.4.2.2-12 Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

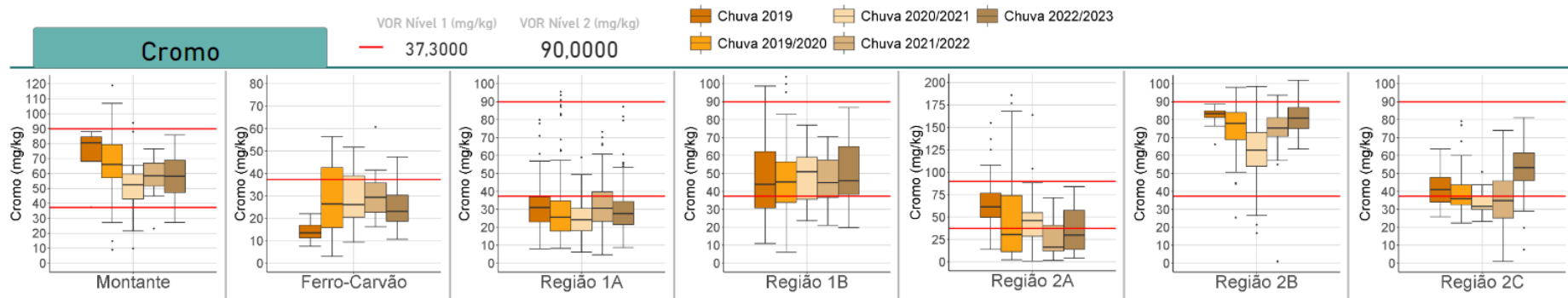


Tabela 11.4.2.2-11 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Cromo

	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 11.4.2.2-12 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	<	~	~	~	~	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	<	~	>	~	<	>	>
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	~	~	~	~	~	>
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	~	~	~	<	~	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	>	~	<	>	~
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	~	~	<	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	~	~	~	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	~	~	~	<	<
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	~	<	~	<	<	<
Ch. 19/20 X Ch. 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)

11.4.2.3. Outros

▪ Fósforo

A distribuição estatística espacial e temporal do Fósforo nos períodos de chuva encontram-se no **Gráfico 11.4.2.3-1** e **Gráfico 11.4.2.3-2** (*Boxplots*) e na **Tabela 11.4.2.3-1** (estatística sazonal espacial) e **Tabela 11.4.2.3-2** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 11.4.2.3-1** mostra a evolução do Fósforo ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*, já o **Gráfico 11.4.2.3-2** mostra evolução do Fósforo ao longo dos períodos de chuva, em escala variável.

De modo geral, percebeu-se que espacialmente, as concentrações de Fósforo têm maior concentração no trecho Ferro-Carvão até 2B. A concentração deste parâmetro nestas regiões pode estar associada a características naturais provenientes da bacia com possíveis contribuições dos rejeitos das barragens B1, B4 e B4A. 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 ao uso de fertilizantes em áreas agrícolas. Além de contribuições locais e difusas, que resultam em variações nas concentrações nesta região.

Na Região Montante, o Fósforo apresentou valores significativamente menores que as regiões Ferro-Carvão e 1B. Além disso, o P mostrou oscilação entre os períodos de chuva, com redução significativa dos valores em 2020/2021 (290 mg/kg), em relação a 2019/2020 (461 mg/kg), seguido por aumento significativo em 2021 (320,5 mg/kg) e manutenção em 2022/2023 (276,5 mg/kg). O P, nesta região, pode estar relacionado a intemperismos de rochas da região, erosões marginais de solo e contribuições locais.

A Região Ferro-Carvão as maiores medianas em relação ao restante das regiões. Além disso, observou-se significativa elevação da mediana das chuvas de 2019/2020 (1.020 mg/kg) em relação a 2019 (440 mg/kg), com manutenção a partir de 2020/2021 (973 mg/kg), 2021/2022 (1.003 mg/kg) e 2022/2023 (1.005,5 mg/kg) (**Gráfico 11.4.2.3-1** e **Gráfico 11.4.2.3-2**). 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, B4 e B4A. Além disso, rochas paraderivadas, como do Grupo Nova Lima, que podem conter minerais que possuem P em sua composição (*i.e.* apatita), podem contribuir com P para o sistema.

Na Região 1A, as concentrações medianas de P nas cinco chuvas comparadas foram significativamente menores (faixa de 165,5 mg/kg a 423,5 mg/kg) que as concentrações medianas identificadas na Ferro-Carvão (que variaram de 422 a 1.020 mg/kg). Com a região Montante (que variaram de 267,5 a 560 mg/kg), a região 1A mostrou valores similares, sem diferenças significativas. O *Boxplot* (**Gráfico 11.4.2.3-1** e **Gráfico 11.4.2.3-2**) mostrou diminuição gradativa das medianas ao longo do tempo na região 1A, com as chuvas de 2022/2023 (165,5 mg/kg), mostrando diminuição significativa em relação aos períodos anteriores 2019 (344,5 mg/kg), 2019/2020 (423,5 mg/kg), 2020/2021 (269 mg/kg), e 2021/2022 (299 mg/kg). Neste sentido, as variações de P entre as diferente estiagens e regiões pode estar relacionada à oscilação entre deposição e acúmulo de sedimentos finos em alguns pontos (principalmente de retenção hidráulica) e, a influência dos períodos chuvosos. 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.

Na Região 1B as concentrações medianas foram significativamente maiores que as observadas na Região 1A e Montante e menores que a da região Ferro-Carvão. O *Boxplot* (**Gráfico 11.4.2.3-1** e **Gráfico 11.4.2.3-2**) mostrou redução gradativa das medianas ao longo do tempo, com as chuvas de 2020/2021 (545 mg/kg), 2021/2022 (463,5 mg/kg) e 2022/2023 (373 mg/kg) mostrando diminuição das medianas, principalmente em relação a chuva de 2019 (696,5 mg/kg). 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 chuvas, estão possivelmente relacionadas à granulometria e intemperismo de solos e rochas da região e a potencial contribuição do rejeito que alcançou a região 1B.

A Região 2A registrou, significativamente, as menores concentrações medianas dentre as regiões avaliadas, com tendência de redução, entre 2020/2020 e 2021/2022. A mediana do Fósforo para os diferentes períodos de chuva foi de 487,5 mg/kg (2019), 49,6 mg/kg (2019/2020), 386 mg/kg (2020/2021), 138,5 mg/kg (2021/2022), e 153,5 mg/kg (2022/2023). Na análise inferencial temporal (**Tabela 11.4.2.3-2**), o que se observou foi que os aumentos nas concentrações foram significativos nas chuvas de 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 em relação a 2019/2020. O restante dos períodos mostrou diferenças significativas inferiores ou manutenção. Esta região representa um trecho lótico do rio, onde há poucos locais com acúmulo de sedimentos, além de estar situada sob rochas graníticas e gnáissicas do Complexo Belo Horizonte, que não apresentam tanta contribuição de P para os sedimentos do rio.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, observa-se diminuição das medianas ao longo do tempo, entre 2019 e 2020/2021. As medianas da Região 2B são significativamente maiores que as das demais regiões (**Tabela 11.4.2.3-1**), exceto da região Ferro-Carvão. O comportamento do P nesta região mostrou ligeiro aumento dos valores em 2021/2022 (787 mg/kg), em relação ao período anterior 2020/2021 (712 mg/kg). O ano de 2019 mostrou as maiores medianas (933 mg/kg). 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.

A Região 2C apresentou na análise espacial, concentrações significativamente inferiores em relação a região Ferro-Carvão, 1B e 2B, em relação as demais regiões, mostrou manutenção. O *Boxplot* mostrou que as medianas de Fósforo apresentaram incremento ao longo das chuvas monitoradas entre 2019 a 2020/2021 e posteriormente em 2022/2023. Assim, na chuva de 2022/2023 (310 mg/kg), as concentrações foram significativamente maiores quando comparadas a chuva/2019 (275 mg/kg), e a chuva de 2021/2022 (261,5 mg/kg).

O incremento das concentrações 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 uso e ocupação do solo, desmatamentos, erosões marginais podem influenciar no aumento das concentrações de P no sedimento. Além

das características naturais da bacia, com maior acúmulo de sedimento finos em algumas porções, ainda mais considerando o contexto transição do trecho entre condições lânticas e o lóaticas, influência das precipitações, com transporte e remobilização de materiais, incluindo do reservatório a montante.

Em comparação com o período sazonal anterior (chuva 2021/2022), a chuva 2022/2023 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Fósforo para a maioria das regiões. O trecho entre as regiões Montante e 2B, com exceção da 1A, mostrou distribuição próxima entre os *Boxplots* dos dois períodos, com manutenção das concentrações de P relacionadas principalmente a fontes geogênicas e antropogênicas, além do acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como os reservatórios de Estaca-Prancha e UTE Igarapé. A região 1A mostrou diminuição dos teores na chuva 2022/2023, relacionado as precipitações e ao contexto do reservatório da UHE Retiro Baixo. Já a região 2C, da mesma forma que para os outros metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem 2021/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 11.4.2.3-1 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período

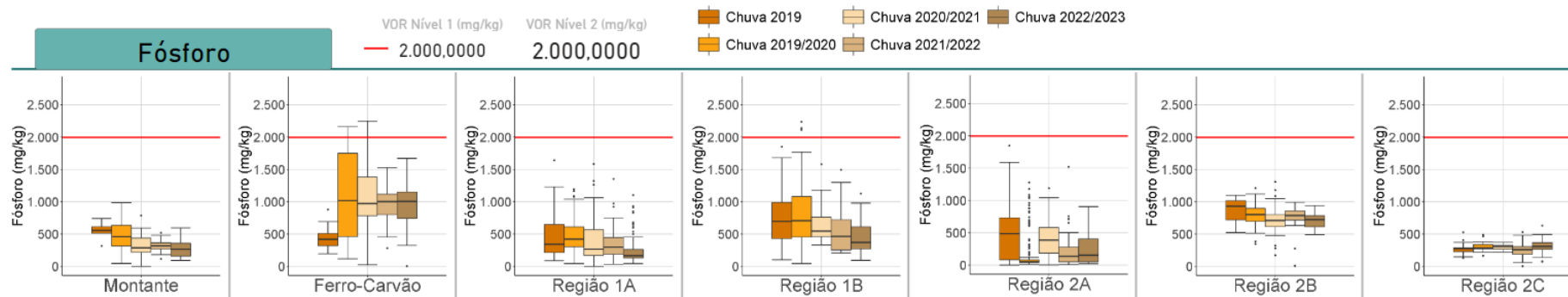


Gráfico 11.4.2.3-2 Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 até chuva 2022/2023 com escala variável

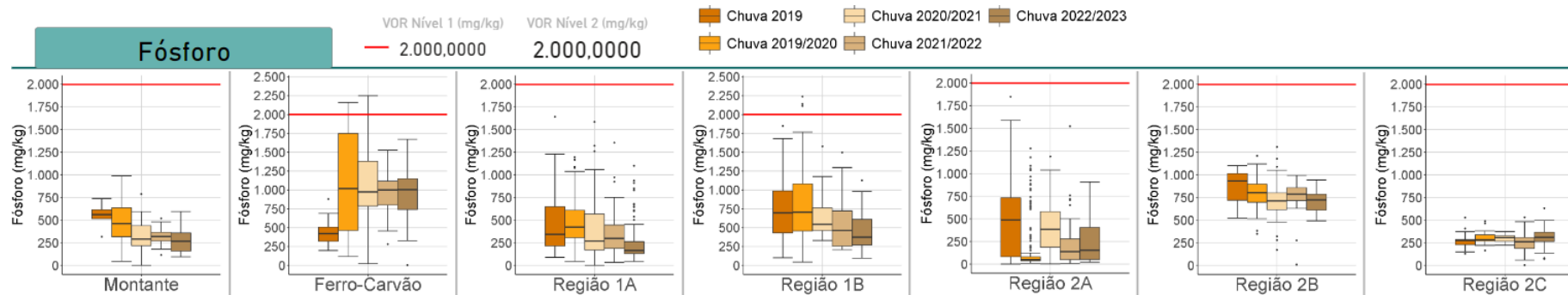


Tabela 11.4.2.3-1 - Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) para o parâmetro Fósforo.

	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 11.4.2.3-2 - 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
Ch. 22/23 X Ch. 21/22	~	~	<	~	~	<	>
Ch. 22/23 X Ch. 20/21	~	~	<	<	<	~	~
Ch. 22/23 X Ch. 19/20	~	<	<	<	>	<	~
Ch. 22/23 X Ch. 19	>	<	<	<	<	<	>
Ch. 21/22 X Ch. 20/21	~	~	~	~	<	>	<
Ch. 21/22 X Ch. 19/20	~	~	<	<	>	~	~
Ch. 21/22 X Ch. 19	>	<	~	<	<	~	~
Ch. 20/21 X Ch. 19/20	~	<	<	~	>	<	~
Ch. 20/21 X Ch. 19	>	<	~	~	~	~	~
Ch. 19/20 X Ch. 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)

11.4.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall

Para aplicação do teste de tendência temporal avaliou-se a frequência amostral dos dados. À semelhança da avaliação do ciclo de estiagem de 2022 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 o mesmo não foi considerado. A análise levou em conta a série cheia 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 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, 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 das barragens B1, B4, B4A, bem como alumínio, níquel, cobre, chumbo, mercúrio, zinco, arsênio e cromo. Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados nas **Tabelas 11.4.3-1** e **Tabela 11.4.3-2**, que consideram a avaliação da série completa, ou seja, todos os períodos sazonais entre 2019 e 2023 (incluindo março/2023) e somente os períodos de chuva, 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 31/03/2023)		CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3
		Folha 281 / 373

Tabela 11.4.3-1 - 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 31/03/2023) – 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	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	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 31/03/2023)		CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3
		Folha 282 / 373

Tabela 11.4.3-1 - Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da sedimentos para a série de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023) – 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	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	
Ferro	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
Alumínio	ST	T↑	T↑	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	
TRAÇOS																											
Arsênio	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	
Cádmio	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	
Chumbo	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
Cobre	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	
Cromo	ST	ST	ST	T↓	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
Níquel	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	
Zinco	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	
OUTROS																											
Fósforo	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST

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

▪ **Manganês**

A avaliação da tendência temporal ponto a ponto completa (todos os períodos sazonais) e dos períodos de chuva para o Manganês mostrou que tanto para a avaliação da série completa como para a limitada aos períodos de chuva, a tendência temporal foi muito parecida com a variação pontual localizada como se observa na comparação com as **Tabelas 11.4.3-1 e 11.4.3-2**.

Nas regiões Montante e 2A, além de praticamente todas as regiões 1B e 2B não se verificou tendência definida, indicando equilíbrio/estabilidade nas concentrações de Manganês. Nas regiões Ferro-Carvão e 2C já se observaram tendência de aumento pontual, enquanto na região 1A, a tendência foi prioritariamente de redução nas duas análises temporais.

Na região do ribeirão Ferro-Carvão tem havido uma sequência de obras de engenharia. Tais ações promovem alterações no transporte de sedimentos no ribeirão, o que pode alterar as condições de transporte e deposição na localidade, como observado no PT-11.

No PT-12 há uma área que serve de pulmão de armazenamento de água do ribeirão Ferro Carvão para a transferência da água superficial para a estação de tratamento ETAF. Nesta área também há uma cortina metálica que dificulta a migração das águas deste ribeirão para o rio Paraopeba. Em razão da alteração na condição do regime de fluxo do ribeirão e obras, os sedimentos transportados se acumulam e se decantam nesta bacia de contenção. O acúmulo de sedimentos finos (silte e argila) favoreceu o aumento do Manganês e demais metais presentes nessa fração, visto que as partículas finas possuem superfície específica maior e com isso tem maior capacidade de adsorverem os metais, incluindo o manganês.

Na região 1A houve coincidência entre os pontos que apresentaram tendência de redução nas concentrações de Manganês (PT-01, PT-13, PT-09, PT-05), tanto na análise da série completa, quanto exclusivo para os períodos de chuva, fato que corrobora com as análises do ciclo anterior, reforçando a tendência de redução da concentração do manganês. Tal condição pode ser indicada pela redução do aporte de materiais com característica química de rejeito provenientes do ribeirão Ferro-Carvão, bem como transporte de sedimentos naturais provenientes do escoamento superficial da bacia que apresentam menores concentrações de manganês. Na região 1B parte mostrou tendência de queda como no PT-03 e PT-48 e parte ficou sem tendência, ou seja, sem variação ao longo dos períodos sazonais.

Nas regiões 2A, com exceção do PT-19 que indicou tendência de redução no período completo e no de chuvas, nos demais locais não se observaram tendência, provavelmente pelo fato de não terem concentrações diferenciadas de Manganês quando comparadas com as regiões mais afetadas pelo rompimento da barragem.

Na região 2B, constatou-se a tendência de aumento das concentrações de Manganês, tiveram resultado de tendência inversos ao período anterior na série completa e na série de chuvas, sendo majoritariamente para a primeira situação e minoritária quanto para a série de chuvas. Avaliando-se a tendência da série completa tem-se que o acúmulo dos sedimentos se dá pela

remobilização, transporte, dissipação e deposição de partículas no leito do reservatório. Por outro lado, na série chuvas evidencia-se toda a fase de transporte por arraste e suspensão de partículas de diversos tamanhos e que podem ou não favorecer mais ou menos acúmulo de substâncias químicas, o que no caso desta etapa praticamente se percebeu tendência de aumento em dois pontos. De todo modo, como o Manganês é identificado tanto nas frações grossas quanto nas finas, o seu acúmulo acaba sendo evidenciado ao longo de todos os períodos sazonais.

Na região 2C, a tendência foi de aumento para a série completa e de chuvas no PT-22 somente, que corroborou com os ciclos de estiagem da avaliação anterior.

Ao se comparar os resultados do Teste Mann Kendal ponto a ponto com os Boxplots percebeu-se semelhança para identificação de aumentos nas concentrações na região do Ferro-Carvão e 2C, enquanto nas demais a tendência predominante foi de equilíbrio. Já teste estatístico inferencial temporal sazonal por região indicou que apesar das variações, o único local que teve variação significativa de aumento foi a região 2C e de redução na região 1A, corroborando com o teste de tendência.

- **Ferro**

A aplicação da análise temporal ponto a ponto completa Mann Kendall mostrou tendência de redução na região Montante (PT-52), regiões 1A, 1B e localmente, região 2A (PT-19), enquanto no Ferro-Carvão não houve tendência, 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 aplicar o teste ponto a ponto para avaliar os períodos sazonais de chuva não se percebeu tendência na maioria dos pontos, exceto por identificação pontual de tendência de queda nos PT-54 e PT-19 (região 2A) e PT-52 (região Montante). Tal resultado foi semelhante ao período sazonal anterior (chuvas 2021/22) e estiagem (2022) e sugeriu equilíbrio nas concentrações de Ferro neste período sazonal.

Ao se comparar os resultados dessa análise de tendência temporal sazonal com os Boxplots constatou-se que semelhanças nos resultados para as regiões Montante, 1A, 2A e 2B. Já as regiões de Fe-Carvão indicaram redução, enquanto 1B e 2C, indicaram aumento nas concentrações de Ferro. Apesar dessas variações, a análise inferencial de Kruskal Wallis constatou que tais variações não são estatisticamente significativas. Portanto, o teste de tendência sazonal de Mann Kendal corroborou com os demais testes estatísticos 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 $3,1 \text{ g/cm}^3$) - Arcadis (2020 B) 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.

- **Alumínio**

Em relação ao Alumínio, a estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann Kendall 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, PT-05) 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 (estiagem/2022) e chuvas (2021/2022), 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 chuvas divergiu somente da região 2B que indicou tendência de redução, enquanto nas demais regiões a tendência foi semelhante com a série completa. À semelhança do ciclo anterior de chuvas (2021/2022), o predomínio da tendência foi de situação de equilíbrio para a maioria dos pontos. As exceções foram na região montante e na 2C que apresentaram tendência de queda nas concentrações.

Ao se comparar os resultados com os Boxplots, as regiões Montante, 2A e 2C apresentaram diferenças para redução (Montante e 2A) ou aumento (2C), porém a avaliação de Kruskal Wallis indicou que tais variações não foram significativas e corroboraram com a avaliação da tendência sazonal. Ou seja, em geral, não indicaram tendência ou mantiveram condição de equilíbrio, exceto Ferro-Carvão que teve aumentos possivelmente por conta das obras de engenharia que estão em andamento que podem suspender/trazer materiais que estavam acomodados no leito ou margens deste ribeirão.

- **Arsênio**

A estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann Kendall para a série completa e para o período de chuvas foi semelhante em termos de tendência, visto que para as regiões Montante, 1A, 1B, 2A e 2B, não houve tendência na maioria dos pontos, com algumas exceções pontuais de variação na região 1A, na 1B (PT-15 e PT-03) e na 2A (PT-16, PT-17 e PT-19) que tiveram tendência de aumento ou queda conforme indicado na tabela de tendências. As regiões do Ferro-Carvão e 2C indicaram tendência sazonal e total de aumento das concentrações.

Ao se comparar as tendências sazonais de chuvas 2022/2023 com o ciclo anterior das chuvas de 2021/2022 constatou-se que foram semelhantes, com o predomínio de equilíbrio (sem tendência) para a maioria das regiões, exceto na Ferro-Carvão e 2C que apresentaram tendência de aumentos locais.

O arsênio está presente na bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4A e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 já nas regiões de Montante até 1A 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 a série temporal completa, assim como o período sazonal de chuvas. Com exceção da região do Ferro-Carvão e 2B que apresentou tendência de aumento, nas demais regiões corroborou-se um estado de sem tendência ou equilíbrio.

Nas 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 tendem a efetuarem trocas iônicas maiores e adsorvem mais substâncias como os metais. 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 do limite já indica alguma variação nos resultados. Entretanto, tais variações mostraram resultados significativamente mais baixos no Ferro-Carvão e nos demais locais não se observou qualquer variação significativa.

▪ **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 orientador da Resolução CONAMA nº 454/2012 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, pontualmente na região 2A (PT-49, PT-19), região 2B (PT-20). As regiões Ferro-Carvão, 2A (exceto os já citados) e 2C indicaram tendência de equilíbrio. Comparando-se esses resultados com o do ciclo de chuvas anterior, percebeu-se um maior número de pontos com tendência de queda nas concentrações de chumbo, principalmente nas regiões 1A (PT-01, PT-13, PT-09) e 1B (PT-14, PT-48, PT-03), manteve-se com queda no PT-19 na região 2A, enquanto na Montante, que se apresentava sem tendência no ciclo anterior, teve tendência de queda neste ciclo. Na região 2C, o PT-22 neste ciclo demonstrou-se sem tendência quando comparado a queda no ciclo anterior, indicando locais pontuais com contribuições e oscilações nas concentrações de chumbo.

Os resultados das avaliações dos Boxplot mostraram variação nas concentrações de chumbo nas regiões Montante e 1B (queda), Fe-Carvão e 2C (aumento) e equilíbrio nas concentrações para os demais locais. A estatística temporal inferencial indicou que apesar dessas variações, elas só foram significativas na região 2C (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). O teste Mann kendall de avaliação ponto a ponto de tendência sazonal no período de chuvas 2022/2023 mostrou predomínio de condições sem tendência sazonal na maior parte das regiões, corroborando com os testes, exceto nas regiões 1B que mostrou tendência de queda por ponto e a estatística inferencial por região atribuiu como não significativo.

- **Cobre**

O cobre foi encontrado nos sedimentos de corrente da bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4, B4A e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 na região 1B como se verificou com a análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020) com os dados de sedimentos de correntes 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 sob atividades constantes de obras, o que pode promover oscilações no transporte e deposição dos sedimentos. Nas demais regiões não houve indicação de tendência na maioria dos pontos, exceto em locais pontuais na região 1A, 1B e 2A que mostraram tendência de queda. Ao se comparar a série completa de 2021/2022 constatou-se diferença somente nas regiões 1B e 2A que indicavam tendência de queda para o ciclo completo passado e neste esteve predominantemente sem tendência.

Para a avaliação sazonal temporal de chuvas 2022/2023, as tendências foram semelhantes a série total. Quando comparados com o ciclo sazonal de 2021/2022, a diferença foi nas regiões montante e 2C não apresentaram tendência neste ciclo e no anterior também tiveram tendência de queda, indicando possibilidade de contribuições oscilantes e locais neste período. Ao se comparar os resultados de tendência com Kruskal Wallis, verificou-se que somente na região 2C este teste indicou aumento significativo de Cobre (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), enquanto nas demais, não se verificou variações nas concentrações.

- **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 454/2012 já 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) 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.

Na análise da série completa ponto a ponto, constatou-se tendência de queda para o PT-52 (região Montante); na Região 1A onde há atividades de remoção do rejeito na calha do rio Paraopeba, exceto PT-02; Região 1B (PT-03 e PT-14), na maior parte da Região 2A, enquanto nas demais regiões não se observaram tendências. Na comparação com o ciclo de chuvas anterior 2021/2022, somente as regiões 1B e 2C que se diferenciaram mostrando tendência de queda, enquanto em 2022/2023 não mostraram tendência para o Níquel.

Na análise da série temporal de chuvas e ponto a ponto perceberam-se maiores variações em relação a série completa. Nesta série temporal houve tendência de queda nas concentrações na região 1B, exceto PT-15 que não apresentou tendência e queda na região 1A nos PT-01 e PT-13. Nas demais regiões não se constataram variação sazonal temporal em 2022/2023. Ao se comparar com o ciclo de chuvas de 2021/2022, somente a região Montante que apresentou queda e a região 1B que teve locais com queda pontual, enquanto nos demais os resultados nos pontos corroboraram majoritariamente sem tendência de variações nas concentrações.

Ao se comparar os resultados de *Boxplot* houve aumentos nas regiões montante, Ferro-Carvão, 2B e 2C, porém com as análises aplicadas com o método de Krukall Wallis no período sazonal de chuvas percebeu-se que as variações significativas de aumento foram somente na região 2B e 2C. Estas foram as únicas regiões que diferiram da análise de tendência com Mann Kendall que indicou evolução sem tendência significativa nas concentrações dessas regiões. Tais diferenças nestes testes 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. Para as demais localidades, os testes corroboraram.

▪ 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 454/2012 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 das barragens B1, B4, 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 2B. Neste intervalo, alguns pontos indicaram tendência de queda como o PT-01 e PT-05 (região 1A), PT-03 e PT-14 (região 1B), PT-53, PT-19 e PT-55 (região 2A). A região 2C foi a única que apresentou tendência de aumento. Comparando-se com o ciclo passado, em que as regiões 1A, 1B e 2A vinham apresentando tendência de queda, neste ciclo completo os resultados nestas regiões foram sem tendência predominantemente. Também

houve diferença na região 2C que não havia apresentado tendência no ciclo passado e neste percebeu-se tendência de aumento no PT-22. Já para as regiões Montante e Ferro-Carvão, os resultados sem tendência corroboraram nas duas situações.

Na avaliação de tendência temporal total para os períodos de chuva, os resultados foram predominantemente sem tendência, exceto na região 2C que teve tendência de aumento. Estes resultados foram semelhantes ao ciclo sazonal de chuvas 2021/2022.

Ao se comparar a série com os testes estatísticos do tipo *Boxplot* e Kruskal Wallis, as semelhanças com os testes de tendência sazonal Mann Kendal foram associadas às regiões Montante, 1A, 1B, 2A, 2B como sem tendências ou variações significativas. Na região 2C o teste de Mann Kendall não mostrou tendência, mas o Kruskal Wallis indicou tendência significativa de aumento para a região 2C. Esta última região pode apresentar oscilações em relação a variações na dinâmica do rio, visto que o PT-22 está numa área de remanso, na entrada do reservatório da UHE Três Marias e esta característica hidráulica pode reter pontualmente algumas substâncias no sedimento. 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 e de chuvas, no PT-52 (região Montante) PT-01 e PT-05 (região 1A), PT-03 e PT-14 (região 1B); PT-19 e PT-55 (região 2A), enquanto nos demais pontos dessas regiões não se constataram tendência. Além disso, não se verificou tendência nem na região 2B ou 2C para ambas as avaliações. O único local que teve variação foi no Ferro-Carvão que na avaliação de tendência total apresentou aumento, enquanto na avaliação sazonal de chuvas não apresentou qualquer tendência. 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 chuvas de 2021/2022.

▪ 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 1A e 2B, e pontualmente no PT-03 e PT-14 (região 1B) e PT-19 (região 2A) e na região Montante. A tendência de aumento também foi pontual no PT-11 (região Ferro-Carvão) 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 chuvas 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 no PT-52

(Montante), PT-01 e PT-05 (Região 1A), PT-14 e PT-03 (Região 1B), PT-19 e PT-54 (região 2A) e na Região 2B.

Em termos de similaridade de resultados para as duas análises teve-se que a tendência de equilíbrio foi a que prevaleceu.

Ao se comparar os resultados do Teste Mann Kendall com a estatística inferencial temporal sazonal com o teste Krukal Wallis percebeu-se que nesta última as variações nas concentrações não apresentaram variabilidade significativa nas regiões Montante, Ferro-Carvão e 2A, corroborando com o teste Mann Kendall. Já nas regiões 1A e 2B, as variações foram de queda e na 2C foram de aumento. 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.

11.5. Considerações

O comportamento das concentrações dos metais nos sedimentos pode ser associado a quantidade de sedimento que é depositada no leito do rio, porém, há transporte e deslocamento de massa de um lugar para outro em função do aumento das vazões do rio. 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 galgamento das barragens B4 e B4A. Destaca-se que as maiores concentrações de Manganês, Ferro, Arsênio, Cobre e Níquel estão nas áreas citadas. Os elementos que apresentaram as maiores concentrações no rejeito foram Mn e Fe.

Assim como a posição de cada região ao longo do rio Paraopeba, as características do ambiente também interferem na quantidade de sedimento que se deposita no leito do rio e, conseqüentemente, interferem nas concentrações observada dos metais. Ambientes lóticos, típicos de rios, tendem a dificultar a deposição de sedimentos, ao passo que, ambientes lênticos/intermediários, típicos de reservatórios, tendem a propiciar condições melhores à deposição de sedimentos. Sendo assim, na Região do Ferro-Carvão e na Região 2B, que são áreas de ambiente mais lêntico, observa-se que há maior retenção de sedimentos e com isso, observou-se aumento de concentrações de metais nestas duas regiões nos períodos de chuva analisados.

Na Região 2B, no reservatório de Retiro Baixo, apesar do ambiente ser intermediário, as concentrações de Alumínio, Arsênio, Cromo, Chumbo, Cobre e Níquel, apresentaram maiores concentrações nesta região que nas demais. Na Região do 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 lêntico, acumulando materiais finos, os quais possuem maior superfície específica e permitem trocas catiônica e adsorção de

elementos, com conseqüente aumento nas concentrações observadas como de Manganês, Ferro, Cobre, Arsênio e o Níquel.

Observadas as concentrações dos metais ao longo das chuvas comparadas, tem-se que na região Ferro-Carvão, os parâmetros que apresentaram elevações sequenciais foram: o Manganês e Alumínio (incluindo valores acima de Vicq, 2015); Chumbo (incluindo teores acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 – VOR 1); e, Arsênio, Cobre e Níquel (incluindo teores acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 – VOR 2). Já a Região 1B, é a região que apresentou maior quantidade de metais com reduções sequenciais entre as cinco chuvas comparadas, sendo eles o Manganês, Ferro, Fósforo, Chumbo, Cobre e Níquel. Enquanto para a região 2B, os parâmetros que apresentaram diminuição sequenciais foram: Alumínio, Fósforo e Arsênio. Na generalidade, percebe-se que, as regiões têm mantido a tendência significativa geral de manutenção/equilíbrio das concentrações dos metais avaliados. Em alguns locais de retenção hidráulica como no Ferro-Carvão percebe-se uma tendência de aumentos para alguns elementos.

A chuva 2022/2023, período de intensas precipitações, mostrou aumento das vazões e níveis de água dos rios, com nova tendência de arraste, dissipação e deposição de materiais em suspensão ao longo da bacia. Além disso, o aumento das concentrações de metais em alguns trechos, teve a influência do aumento das vazões resultantes das precipitações do ciclo de chuva anterior (2021/2022), que favoreceu o aporte, transporte e acúmulo de sedimentos para a bacia. Nesse sentido, o aumento das vazões favoreceu o aporte e carreamento de sedimentos e metais para o canal fluvial por escoamento superficial, 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 água do ribeirão Ferro-Carvão pela cortina metálica instalada antes da confluência com o Rio Paraopeba. Da mesma forma, a região 2B, do reservatório de Retiro Baixo sugere transporte e dissipação de sedimentos em suspensão.

Na avaliação da estatística dos períodos de chuva no espaço e tempo 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 chuva 2021/2022 e 2022/2023. 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 chuvosos.

Para a região do 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 chuva), com elevação das concentrações relacionadas principalmente a aumento

de vazão, transporte de materiais e acúmulo de sedimentos com influência dos rejeitos. Somente o parâmetro Fósforo mostrou tendência de aumento ao considerar todos os períodos sazonais monitorados, o que também sugere influência das últimas precipitações nas concentrações destes elementos.

As substâncias que não tiveram variações significativas nas concentrações principalmente quando comparados os últimos períodos de chuva 2021/2022 e 2022/2023 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 chuva. 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; a 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 chuvas seja para o ciclo completo (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, tem indicado redução na concentração, bem como na característica química de rejeito nos trechos mais afetados para uma tendência de característica natural (pré-rompimento) nas concentrações. Nas regiões Montante, 2A (exceto por PT-19 e PT-54 que indicaram tendência de redução nas concentrações dos parâmetros avaliados), 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 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 chuvosos 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 galgamento das barragens B4 e B4A ao longo dos períodos chuvosos de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 em relação a Resolução CONAMA nº 454/2012 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 chuva de 2022/2023 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. A segunda abordagem envolveu todos os resultados analíticos obtidos nos períodos chuvosos, sendo: janeiro a março/2019, outubro/2019 a março/2020, outubro/2020 a março/2021, outubro/2021 a março/2022 e outubro/2022 a março/2023. Em todas as situações, a avaliação foi para verificar a evolução do percentual de ultrapassagem dos valores orientadores e evolução no tempo.

12.3. Resultados e discussão

Na **Tabela 12.3-1** e **Tabela 12.3-2** estão apresentados os percentis que ultrapassaram os valores orientadores por ponto no período chuvoso de 2022/2023, enquanto na **Tabela 12.3-3** e **Tabela 12.3-4**, encontram-se os percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2, para todos os períodos de chuva avaliados. 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 31/03/2023)		CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3
		Folha 295 / 373

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 chuva 2022/2023.

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	-	8	-	57	-	8	42	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ferro	* 281.000 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Alumínio	* 45.200 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	58	92	-	-	
TRAÇOS																												
Arsênio	5,9 mg/kg	92	96	100	33	79	81	100	82	100	100	56	100	100	20	75	75	64	100	20	20	8	100	100	100	71	92	
Cádmio	0,6 mg/kg	-	17	35	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chumbo	35 mg/kg	-	17	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-		
Cobre	35,7 mg/kg	4	100	100	-	4	5	52	-	17	58	-	55	-	-	-	9	-	-	-	-	83	83	100	4	-		
Cromo	37,3 mg/kg	80	-	15	8	21	38	29	5	83	100	33	82	80	20	50	75	55	100	10	20	-	100	100	100	71	100	
Níquel	18 mg/kg	64	83	100	8	21	19	76	5	25	100	22	55	40	-	25	25	18	100	10	10	-	100	100	100	54	50	
OUTROS																												
Fósforo	2000 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N coletas realizadas		25	24	26	24	24	21	21	22	12	12	9	11	5	5	4	4	11	9	10	10	12	12	12	26	24	12	

NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência; *Vicq (2015) utilizado para comparações com ferro, alumínio e manganês.
Elaboração: Arcadis (2023).





	RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE CICLO	
RELATÓRIO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS - FECHAMENTO DE CICLO (25/01/2019 a 31/03/2023)		CÓDIGO VALE 1.03.08.50435-QM-RT-0029-Rev.3 CÓDIGO ARCADIS 1.03.08.50435-QM-RT-0026-Rev.3
		Folha 296 / 373

Tabela 12.3-2 - Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para a chuva 2022/2023.

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	12	4	62	-	-	10	5	-	8	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	-	-	-
Cádmio	3,5 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cromo	90 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	17	8	-	-	
Níquel	35,9 mg/kg	-	21	77	-	8	-	14	-	-	-	9	-	-	-	-	9	-	-	-	-	17	17	4	-	-	
Zinco	315 mg/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N coletas realizadas		25	24	26	24	24	21	21	22	12	12	9	11	5	5	4	4	11	9	10	10	12	12	12	26	24	12

NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência.

Elaboração: Arcadis (2023).



De acordo com a **Tabela 12.3-1** constatou-se que, para o período de chuva 2022/2023 os parâmetros Manganês e Alumínio superaram os valores orientadores Vicq (2015) em pelo menos um local monitorado. Arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo e níquel ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1) 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 (As, Cr e Ni). O cobre também ocorreu em toda a bacia, porém com menores porcentagens de variação acima da Resolução CONAMA 454/12. 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 registradas concentrações acima do VOR 1 para os parâmetros Ferro (majoritário) e Fósforo.

Em relação aos pontos que apresentaram maior ocorrência (mais de 3 parâmetros violados) de metais que ultrapassaram esses valores de referência estão o PT-52, PT-11, PT-12, PT-13, PT-09, PT-02, PT-03, PT-14, PT-15, PT-17, PT-20, PT-28, PT-21 e JRB-02. Os pontos PT-01, PT-13, PT-09, PT-05, PT-48, PT-53, PT-54, PT-43, PT-16 e JRB-02. Os pontos que apresentaram menos ocorrência de valores acima do VOR 1 (até 3 parâmetros violados) foram: PT-01, PT-05, PT-48, PT-53, PT-54, PT-43, PT-16, PT-18, PT-49, PT-19, PT-55 e PT-22. Os pontos referentes as regiões 2D e 3 são discutidos no **Anexo IX** deste documento.

Destaca-se que os pontos localizados entre o ribeirão Ferro-Carvão e região 1B (PT-11 até PT-15) estão nas regiões mais afetadas pelos rejeitos provenientes das barragens B1, B4, B4A justificando os maiores percentuais de resultados em desacordo com o valor orientador de Manganês para as chuvas 2022/2023, particularmente, nos pontos PT-11 e PT-12, localizados no ribeirão Ferro-Carvão, e no ponto PT-02, localizado na região 1A. Esses pontos, coincidentemente, possuem maiores proporções de sedimentos finos (silte e argila), quando comparados aos demais dispostos até a região 2A. Os pontos PT-13, PT-03, PT-14 e PT-15 apresentaram resultados em desacordo com a legislação para Manganês em menores proporções (< 50%) para a chuva 2022/2023. 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 grossos e finos, é esperado aumento das concentrações de elementos químicos nesta localidade. Já no PT-15, o aumento das concentrações na chuva 2022/2023, pode ser relacionado com erosões marginais, transporte por arraste de materiais durante as chuvas de 2021/2022 e deposição em locais de maior retenção hidráulica como proximidade de ponte, que puderam acumular sedimentos finos e favorecer a retenção de metais.

Ainda de acordo com as **Tabela 12.3-1 e Tabela 12.3-2**, observou-se que para o período de chuva atual, houve concentrações de Al acima do valor proposto por Vicq (2015), somente na região inserida no reservatório da UHE Retiro Baixo, 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 que contém 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 da região Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), PT-02 (Região 1A), PT-20, PT-28 e PT-21 (Região 2B) predominam os maiores percentuais de concentrações acima do preconizado pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para metais traço (As, Cu, Cr e Ni).

Em relação aos resultados em desacordo com o valor orientador do nível 2 (**Tabela 12.3-2**) da Resolução CONAMA 454/12, no período de chuva 2022/2023, houve desvios para: As e Ni no PT-11, PT-12 (Ferro-Carvão), PT-02 (região 1A), PT-20 e PT-28 (região 2B); Cr no PT-20, PT-28 e PT-21 (região 2B); As, Cr e Ni no PT-20 e PT-28 (região 2B - UHE Retiro Baixo); As no PT-52 (região Montante), PT-11 e PT-12 (região Ferro-Carvão), PT-09 e PT-02 (região 1A), PT-03 e PT-14 (região 1B) e PT-20, PT-28 (região 2B - UHE Retiro Baixo) e por fim, Ni no PT-11 e PT-12 (região Ferro-Carvão), PT-13 e PT-02 (região 1A), PT-15 (região 1B), PT-17 (região 2A) e PT-20, PT-28 e PT-21 (região 2B). Os pontos localizados até a região 1B, estão em área afetada pelo rejeito da barragem B1, B4, B4A, mas também se constatou que para os PT-11, PT-12, PT-02 e PT-14 houve predominância de silte e argila nas amostras na chuva 2022/2023, o que pode ter favorecido a adsorção dos metais e aumento de suas concentrações neste período sazonal. Nos pontos situados no ambiente de reservatório da UHE Retiro Baixo, esse fato pode ser explicado pela localização em ambiente mais lântico, o que favorece o acúmulo contínuo de sedimentos finos e favorece a adsorção de metais nessas partículas.

A **Tabela 12.3-3** consolida a evolução das concentrações dos metais ao longo dos ciclos chuvosos ocorridos entre 2019 e 2023. Estas tabelas contemplam cada região de interesse (montante até 2C) e apresentam os percentuais de concentração de metais e suas comparações com o ciclo chuvoso seguinte. Esta avaliação também foi efetuada utilizando como referência a Resolução CONAMA 454/12, contemplando comparações com os valores orientadores de nível 1 e nível 2. 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 454/2012 para o período chuvoso de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 entre as regiões de Montante a 2C.

▪ Região Montante

Esta 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, B4, 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 chuvoso (janeiro/2019 a março/2019), os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram o As, Cu, Cr e Ni e, destes, apenas o Ni ultrapassou o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12. Este período, nesta região, pode indicar a possibilidade de que tais parâmetros sejam característicos da bacia, de modo a contribuir nas concentrações das demais regiões.

No segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), constatou-se que o As e Zn ultrapassaram o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, registrando elevação no percentual de desvios, ao passo que Cu, Cr e Ni registraram redução no percentual em relação ao período anterior. Para o nível 2, foi registrada elevação no percentual de desvio para As e Cr. 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 chuvoso de 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021), tendo em vista os desvios, observa-se que na região montante, houve violação do percentual de desvios da Resolução CONAMA nº 454/2012 nível 1 para Cu e Hg, observando elevação no percentual de desvios e As, Cu, Ni e Zn, com redução nos percentuais de desvios em relação ao período passado. Para o nível 2, foi observada elevação no percentual de desvio para Ni, ao passo que para Cr foi registrada redução. A elevação nos percentuais de desvios observadas para ambos os parâmetros que superaram os níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA 454/12, podem refletir no aumento da vazão, transporte e deposição observada no período chuvoso.

Para o período chuvoso de 2021/2022 (outubro/2021 a março/2022), constatou-se que os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 neste período foram As, Cu e Hg, registrando redução no percentual de desvios, Cr e Ni, apresentando elevação, ao passo que os demais parâmetros registraram a manutenção dos percentuais de desvios em relação ao período anterior. Para o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12, apenas o As apresentou redução no percentual de desvios.

No último período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, observa-se que na região montante, os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 foram As, Cu e Ni, ambos registrando elevação no percentual de desvios, enquanto o Cr apresentou redução do percentual em relação ao período anterior. Para o nível 2, apenas o As apresentou elevação no percentual para o período em questão, sem desvios registrados para os demais parâmetros.

Considerando todos os períodos chuvosos, apesar da oscilação entre os períodos, os parâmetros As, Cr e Ni foram observados acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 em todos os períodos chuvosos. O parâmetro Hg esteve acima do valor orientador somente no período chuvoso de 2020/2021. 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, 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) neste 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, estabelece-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 chuvoso (janeiro a março/2019) As, Cu, Hg e Ni apresentaram desvio em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, à medida em que não foi registrado, para nenhum parâmetro avaliado, concentrações acima do nível 2.

No segundo período chuvoso, entre outubro/2019 e março/2020, com exceção do Zn, que não ultrapassou o valor orientador da Resolução CONAMA nº 454/2012 neste período, todos os outros elementos (As, Cd, Pb, Cu, Cr, P, Hg e Ni) ultrapassaram o nível 1 estipulado pela Resolução CONAMA e apresentaram elevação no percentual de desvios. Para o nível 2, houve aumento para As, Cd, Cu, Cr, P, Ni em relação ao período anterior. Esse aumento foi 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 chuvoso 2020/2021, os principais comportamentos dos percentuais de desvio da legislação na região Ferro-Carvão foram as elevações para o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 dos parâmetros As, Pb, Cu, Hg e Ni e reduções nos percentuais de desvio para Cd, Cr e P. O metal Zn seguiu comportamento semelhante ao período chuvoso anterior e não apresentou concentrações em desacordo com a legislação. Para o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12, As, Cd e P registraram redução nos percentuais de desvios, à medida em que Cu, Cr e Ni apresentaram elevação, comportamento similar ao período anterior para estes parâmetros.

Em relação ao período chuvoso 2021/2022, observa-se aumento dos desvios em relação ao período de chuva anterior para As, Cd e Cu e redução nos percentuais de desvio para Pb, Cr, P, Hg e Ni. Para o nível 2 da Resolução de referência, houve desvios para As, com elevação do percentual, e para Ni, com redução do mesmo em relação ao período anterior. A persistência desses metais acima dos valores orientadores, pode ser justificada pelo represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão, que estabeleceu uma condição mais lântica de movimentação da água.

Para o último período chuvoso (2022/2023), tendo em vista os desvios da Resolução CONAMA 454/12, observa-se que na região Ferro-Carvão houve redução dos percentuais de desvio para As (49 desvios – 98%), Cd (13 desvios – 26%), Cr (4 desvios – 8%) e Hg (0 desvios – 0%), à medida em que houve elevação nos percentuais de desvio para Pb (22 desvios – 44%), Cu (50 desvios – 100%) e Ni (46 desvios – 92%). Para o nível 2, foi registrada elevação no percentual de desvios para As (17 desvios – 34%) e para Ni (25 desvios – 50%).

O aumento das concentrações pode ser decorrente de deposições de sedimentos mais finos observados nesta região (vide capítulo 10) que se acumularam na bacia de contenção e ao longo do ribeirão Ferro-Carvão, antes de se adentrar ao reservatório. As concentrações podem variar em relação ao período anterior, porém sempre os resultados são associados aos sedimentos finos pois apresentam maior tensão superficial, capacidade de troca iônica, entre outros e podem reter mais substâncias.

▪ 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. Os resultados analíticos estão associados com os sedimentos com características químicas de rejeito e transportes de sedimentos naturais da própria bacia. Adicionalmente, a região 1A está disposta sobre rochas metavulcanossedimentares dos Grupo Itabira (Formação Cauê), Grupo Sabará e rochas gnáissicas do Complexo Bonfim. Os primeiros podem conter minerais compostos por As, Cu, Ni e ainda o próprio solo resultante do intemperismo das rochas pode conter minerais/argilominerais com estes 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 do rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4, B4A.

No primeiro período chuvoso (janeiro a março/2019), os parâmetros As, Cr, Pb, Cu, Ni e Zn ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Destes Pb, Cu e Ni ultrapassaram ainda o nível 2.

No segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), tendo em vista os desvios da Resolução CONAMA nº 454/2012 para nível 1, observou-se que As, Pb, Hg e Ni apresentaram elevação nos percentuais de desvio, enquanto Cu, Cr e Zn registraram redução em relação ao período anterior. Em relação ao nível 2 da legislação, As, Pb e Cr apresentaram elevação no percentual de desvios, ao passo que Cu e Ni registraram redução em relação ao período chuvoso anterior. Nos meses de janeiro a março de 2020, constatou-se que os aumentos acima do nível 1 se mantiveram para As, Pb, Cu e Ni, porém, tais aumentos foram menores em comparação com os meses de outubro a dezembro/2019, sugerindo que, apesar da intensidade das chuvas e elevação do nível de água do rio, as contribuições de aporte de sedimentos causados por eventuais erosões e deposições das margens do rio, bem como mobilizações associadas ao transporte do rejeito das barragens B1, B4, B4A e as remobilizações do leito do rio, foram menores.

No período chuvoso 2020/2021, foi observada redução dos percentuais de resultados acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 para o nível 1 dos parâmetros: Pb, Cu, Cr e Ni. O parâmetro Hg foi o único a registrar elevação no percentual de desvio neste período para nível 1. Para o nível 2, somente As registrou redução no percentual de desvio, ao passo que o Ni apresentou elevação em relação ao período chuvoso anterior. Ao longo do monitoramento observou-se elevações do percentual de As em relação ao Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, contudo, no período chuvoso corrente, observou-se pela primeira vez ao longo do monitoramento a redução nestes percentuais. De modo geral, para os demais elementos observaram-se elevações nos percentuais de desvios para o Nível 1, resultado do aumento da vazão do corpo hídrico.

No período chuvoso 2021/2022, os parâmetros que apresentaram elevação do percentual de desvios para nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram: As, Cd e Cr, registrando elevação no percentual de desvio e Pb, Cu, Hg e Ni, mas houve redução nos mesmos em relação ao período chuvoso anterior. Para o nível 2, As e Cr apresentaram elevação no percentual de desvio e, o Ni, redução. Para os demais parâmetros todos apresentaram manutenção para o período de chuva avaliado.

O último período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, tendo em vista os desvios da Resolução CONAMA nº 454/2012 para o nível 1, observou-se que houve desvios para As (83 desvios – 74,1%), Cd (2 desvios – 1,8%), Pb (0 desvios – 0%), Cu (13 desvios – 11,6%), Cr (22 desvios – 19,6%) e Ni (28 desvios – 25%), registrando reduções nos percentuais em relação ao período anterior. Para o nível 2 estipulado pela Resolução de referência, observa-

se redução dos percentuais de desvios para As (3 desvios – 2,7%) e Cr (0 desvios – 0%) e elevação no percentual para Ni (5 desvios – 4,5%).

Ao realizar a comparação entre os períodos chuvosos de todos os anos considerados, nota-se, em geral, que os mesmos parâmetros apresentaram concentrações acima do nível 1 e, somente o fósforo não apresentou desvios ao longo dos períodos analisados para ambos os níveis regulamentados pela Resolução CONAMA 454/12.

▪ Região 1B

No primeiro período chuvoso (janeiro a março/2019), tendo em vista os desvios regulamentados pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para nível 1, observou-se desvios para os parâmetros As, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn. Para o nível 2, foram registrados desvios para os parâmetros As, Cr e Ni.

No período chuvoso 2019/2020, para o nível 1 estipulado pela Resolução de referência, constatou-se desvios para os parâmetros analisados sendo elevação nos percentuais de desvio para As, Cr, P, Hg, Ni e Zn e redução nos percentuais de desvio para Pb e Cu. Para o nível 2, constatou-se redução nos percentuais para As, Cr e Ni, à medida em que houve elevação no percentual de desvio do P em relação ao período anterior. Para o Cd não se constatou desvio.

No período chuvoso 2020/2021, observou-se elevação do percentual de desvios da Resolução CONAMA nº 454/2012 para o nível 1 para As e Cr, em relação ao ciclo anterior. Em contrapartida, a maioria dos parâmetros apresentou redução no percentual de desvios (Pb, Cu, Hg e Ni). Para o nível 2 da Resolução CONAMA 454/12, somente o As, registrou elevação e Ni, redução do percentual.

Para o período chuvoso 2021/2022, os parâmetros que ultrapassaram os valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 nível 1 e apresentaram elevação de percentual foram Cd, Cr e Zn. Em contrapartida, As, Pb, Cu, Hg e Ni apresentaram redução da percentagem de desvios para este período. Para o nível 2, somente As e Ni apresentaram desvios, ambos registrando redução nos percentuais de desvio em relação ao ciclo anterior.

Para o último período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, tendo em vista os desvios estipulados pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para o nível 1, constatou-se elevação nos percentuais de desvio para Cu (15 desvios – 34,1%), Cr (34 desvios – 77,3%) e Ni (23 desvios – 52,3%). Para o nível 2, constatou-se elevação para As (7 desvios – 15,9%) e redução para o Ni (1 desvio – 2,3%).

A região 1B está posicionada em área afetada pelo rejeito das barragens B1, B4, B4A, estando geologicamente disposta sobre rochas metavulcânicas do Grupo Itabira/Sabará, em unidades 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 das barragens B1, B4, B4A.

▪ **Região 2A**

A região 2A está entre as regiões pouco afetadas pelo rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4, B4A. Nessa região, há uma variedade de unidades geológicas 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 primeiro período chuvoso, entre janeiro e março/2019, os metais que ultrapassaram os valores orientadores nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram As, Cd, Pb, Cu, Cr e Ni e, destes, somente As, Cr e Ni ultrapassaram o valor orientador de nível 2. Os parâmetros P, Hg e Zn não apresentaram desvios em relação ao nível 1 e 2 da legislação para o período.

No período chuvoso de 2019/2020, tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, para o nível 1, constatou-se desvios para As, Cu, Cr e Ni, ambos registrando reduções nos percentuais e para Pb e Zn, com elevações em relação ao período anterior. Para o nível 2, Cr e Ni apresentaram desvios, o primeiro, com elevação no percentual para o período e, o segundo, registrando reduções. Neste período, os parâmetros P e Hg não apresentaram desvios em relação aos níveis 1 e 2 de referência, comportamento também observado para o Cd.

Para o terceiro período chuvoso, entre outubro/2020 e março/2021, ocorreu elevação do percentual da Resolução CONAMA nº 454/2012 para nível 1 para As, Cd, Cu, Cr e Ni. Para o nível 2, apresentaram elevações no percentual de desvio As e Cd, à medida em que Cr e Ni registraram reduções em comparação ao ciclo anterior. Os parâmetros Pb, P, Hg e Zn não ultrapassaram os valores estipulados pela referência.

No período chuvoso de 2021/2022, constatou-se desvios para o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para As, Cu, Cr e Ni, ambos registrando redução nos percentuais de desvios no que concerne àqueles registrados nos ciclos anteriores. Para o nível 2 não foram registrados desvios. Ressalta-se que os parâmetros Cd, P, Hg e Zn não apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para o período.

Para o último período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, constatou-se desvios para o nível 1 para As (33 desvios – 47,1%), Cr (28 desvios – 40%) e Ni (17 desvios – 24,3%), ambos registrando elevações nos percentuais de desvio e, para Cu (1 desvio – 1,4%), com redução no percentual em relação ao ciclo 2021/2022. Para o nível 2, somente o Ni (1 desvio – 1,4%) registrou elevação no percentual de desvio. Neste período, não foram registrados desvios, novamente, para os parâmetros Cd, Pb, P, Hg e Zn, comportamento similar ao observado para o período chuvoso 2021/2022.

Ao avaliar os períodos chuvosos de 2019 a 2023, foi possível verificar que os parâmetros P, Hg e Zn não apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 em nenhum período analisado. Para todos os parâmetros percebeu-se redução ou manutenção das concentrações desde 2019, não se constatando aumentos ou contribuições provenientes do rejeito no rio Paraopeba.

▪ **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 chuvoso de 2019 (janeiro a março), As, Cu, Cr e Ni apresentaram desvios para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Destes, apenas As e Ni ultrapassaram o nível 2 da legislação.

No período chuvoso 2019/2020, para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, foram registrados desvios nos parâmetros analisados, com reduções nos percentuais observadas para As, Cu, Cr e Ni e elevação registrada para Pb. Destes, As e Ni também registraram reduções nos percentuais de desvio para o nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e, o Cr, elevação em comparação ao ciclo anterior. Para este período, Cd, P, Hg e Zn não apresentaram desvios em relação aos níveis 1 e 2 de referência.

Para o terceiro período chuvoso, entre outubro/2020 e março/2021, observou-se desvios para o nível 1 da CONAMA 454/12 para todos os parâmetros analisados, com exceção do P e do Zn. Foram registradas elevações nos percentuais de desvio para As, Cd e Hg e reduções nos percentuais para Pb, Cu, Cr e Ni em relação ao período chuvoso 2019/2020. Para o nível 2, somente As e Cr apresentaram redução nos percentuais de desvio, enquanto Cd e Ni registraram elevações.

Ao longo do período chuvoso 2021/2022, foi verificado que para o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 os metais As e Cd apresentaram redução nas percentagens de desvio em relação ao período anterior, à medida em que Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, registraram elevação no percentual. Para o nível 2, As e Cr registraram incremento no percentual de desvio para o período. Os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram desvios em nenhum período de chuva analisado nesta região.

Para o período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, constatou-se desvios os níveis 1 e 2. Para o nível 1, foi registrado incremento no percentual de desvios para As (50 desvios -100%), Cu (46 desvios - 92%), Cr (50 desvios - 100%) e Ni (50 desvios - 100%). O Pb (1 desvio - 2%)

apresentou redução no percentual de desvio em relação ao período de chuva anterior. Para o nível 2, Cr (7 desvios – 14%) e Ni (5 desvios – 10%) apresentaram elevação no percentual, à medida em que As (2 desvios – 4%) apresentou redução em comparativo ao ciclo 2021/2022. Os parâmetros Cd, P, Hg e Zn não apresentaram desvios para os níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para este período, assim como, de forma geral, foi observado nos ciclos chuvosos anteriores.

▪ 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 chuvoso de 2019 (janeiro a março), os parâmetros em desacordo com o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram As, Pb, Cu, Cr e Ni. Destes, somente o Pb registrou desvio também para o nível 2 de referência.

No segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 para os níveis 1 e 2, foram registrados desvios nos parâmetros analisados. Para o nível 1, os metais As, Cd e Pb apresentaram incremento na percentagem de desvios, enquanto Cu, Cr e Ni registraram redução em relação ao ciclo chuvoso anterior. Para o nível 2, Cd e Ni apresentaram desvios no período, registrando incremento no percentual de desvio. Os metais P, Hg e Zn não ultrapassaram os valores orientadores de referência para nível 1 e nível 2 neste período.

Para o período chuvoso 2020/2021, em relação aos valores orientadores da Resolução CONAMA nº 454/2012 para nível 1, As e Cd apresentaram elevação nas percentagens de desvio e Cr e Ni, redução em comparativo com o período chuvoso 2019/2020. Destes, somente o Ni apresentou desvio no que tange o nível 2, registrando incremento no percentual neste período. Os parâmetros P, Hg e Zn não ultrapassaram os valores orientadores de referência para nível 1 e nível 2, assim como observado no ciclo 2019/2020.

No período chuvoso 2021/2022, foram observados desvios somente no que tange os valores orientadores para o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Neste período, As registrou redução no percentual de desvio, enquanto o Cr apresentou incremento em comparativo com o ciclo chuvoso 2020/2021. Cd e Ni apresentaram redução neste período, no entanto, não ultrapassaram os valores orientadores definidos pela referência.

Para o período chuvoso, entre outubro/2022 e março/2023, de acordo com os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, para a região 2C, foram registrados incrementos nos percentuais de desvio para As (28 desvios – 77,8%), Cu (1 desvio – 2,8%), Cr (29 desvios – 80,6%) e Ni (19 desvios – 52,8%) para o nível 1. Para o nível 2, não foram observados desvios neste período.

Ao longo do monitoramento, sobretudo os últimos dois períodos chuvosos, observa-se redução da quantidade de parâmetros que apresentaram desvios nas concentrações em relação a Resolução CONAMA 454/12. Nesse período todo, a granulometria continuou com predominância de sedimentos finos e, portanto, apesar do transporte de materiais resultantes das elevações do nível de água e vazões dos rios da bacia, se constatou situação de maior equilíbrio no aporte e na deposição de sedimentos.

12.3.1. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos

Os mapas temáticos presentes no **Anexo VIII** 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 março/2023, enquanto os mapas apresentados ao longo deste texto mostram o consolidado da evolução dos metais ao longo dos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023. A análise foi baseada no comportamento da concentração máxima dos sedimentos agregados por região e comparados em relação à 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**

A **Figura 12.3.1-1** indica o consolidado dos períodos de chuva/2019 até chuva 2022/2023. Verificou-se que, após o rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4A, B4, o Manganês identificado como marcador do avanço do rejeito foi transportado tanto por arraste como em 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 fonte dos rejeitos acumularam mais sedimentos com característica de rejeitos, enquanto na 2A mais afastada em relação à fonte acumulou também, mas em menores concentrações comparativamente e no período de chuva/2019. Nas regiões Ferro Carvão, 1A e 1B as concentrações foram mais que 5 vezes acima do valor orientador de Vicq (2015) que é de 3300mg/kg reflexo de sedimentos transportados por arraste/suspensão e sedimentação em áreas de retenção hidráulica, enquanto na região 2A, as concentrações máximas ficaram, em geral, entre 2 e 5 vezes maiores que Vicq (2015) e foram consideradas como reflexo dos sedimentos transportados em suspensão, principalmente. Nas regiões 2B e 2C não se perceberam aumento da concentração do Manganês 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.

Na chuva 2019/2020, de forma geral, observou-se que as concentrações se atenuaram em relação à referência de Vicq (2015) nas regiões 1A até 2A, sendo que as maiores concentrações ficaram persistentes na região fonte, do ribeirão Ferro-Carvão, e em seguida a região 1B, com valores mais que 5 vezes acima da referência de Vicq (2015). Na região 2A, houve melhoria das condições em relação ao período de chuva anterior, com concentrações

elevadas de forma localizada nas proximidades do PT-53, PT-18, PT-19 e PT-54, podendo ser reflexos de contribuições difusas provenientes de exploração de areia no rio Paraopeba ou ainda de processos de erosão marginal, cujos materiais com granulação mais fina puderam reter metais, incluindo o manganês. Os acúmulos pontuais foram observados também no PT-20 na entrada do reservatório da UHE Retiro Baixo, onde o ambiente muda de lótico para intermediário, a velocidade da água é reduzida e os materiais transportados se dissiparam e depositaram nessas localidades, ainda que em concentrações até 1,2 vezes o valor de Vicq (2015), mas ainda manteve a característica de sedimento natural (vide capítulo 13). Ainda sobre as elevações verificadas, observa-se uma grande transição da situação do tributário da região 2C, passando de concentrações máximas menores ou iguais a referência (chuva/2019) para concentrações 5 vezes maiores ao VR (chuva 2019/2020), o que pode estar relacionado as atividades de uso e ocupação do solo ocorrentes no período supracitado.

No período de chuva 2020/2021, 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. Entretanto, nota-se comportamento próximo ou indicativo de menores concentrações no período de chuva 2020/2021 em relação ao período de chuva 2019/2020 em toda extensão do monitoramento.

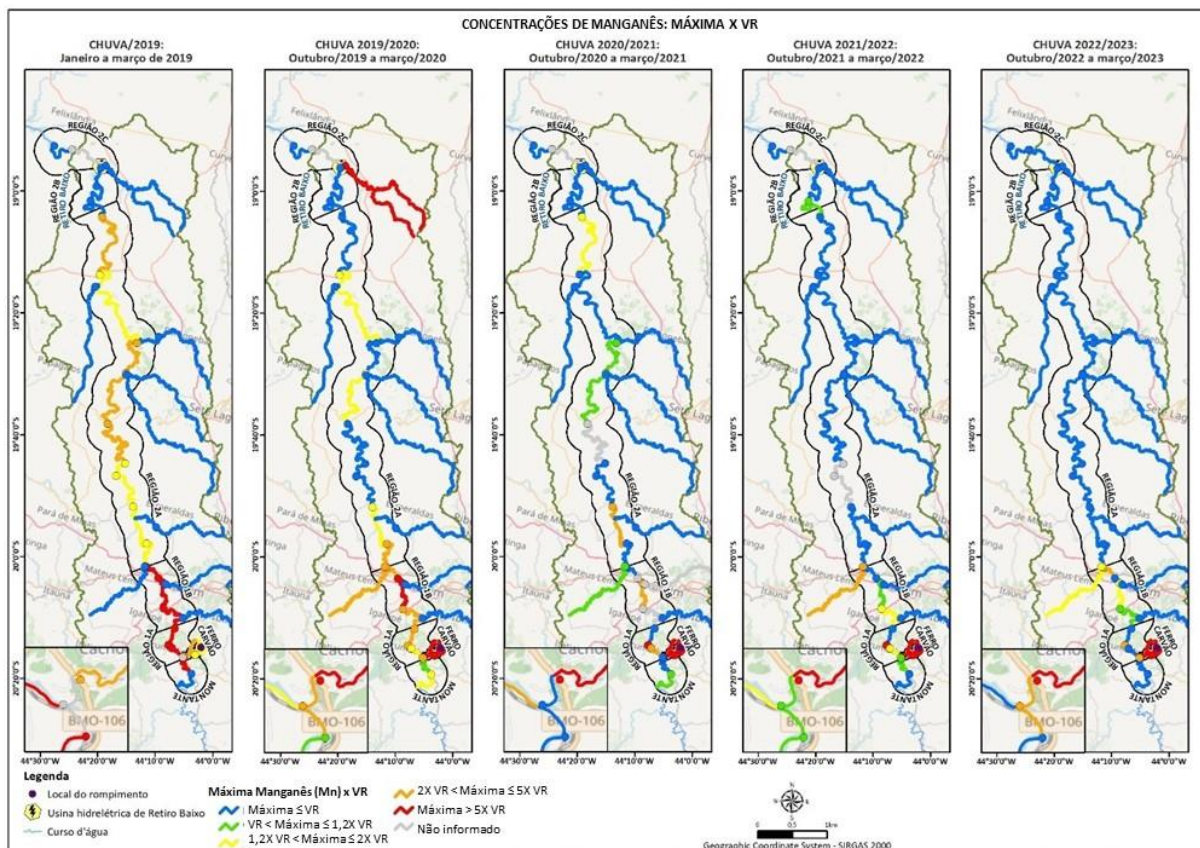
No período de chuva 2021/2022, verifica-se persistência de concentrações 5 vezes maiores que a referência Vicq (2015) nas mesmas localidades do período anterior, Ferro Carvão e pontualmente na região 1A. Para as regiões à jusante dessa, nota-se um comportamento predominante de redução das concentrações de Manganês, com exceção de um tributário da Região 1B, que apresentou aumento nas concentrações em relação ao período anterior, de 1,2 vezes o valor de referência (VR) para até 5, podendo ser reflexos de contribuições difusas provenientes de exploração de areia no rio Paraopeba ou ainda de processos de erosão marginal, cujos materiais com granulação mais fina puderam reter o manganês.

No período de chuva atual 2022/2023, verifica-se persistência de concentrações 5 vezes maiores que a referência Vicq (2015) na Região Ferro Carvão. Para as regiões à jusante dessa, assim como para o tributário da Região 1B, nota-se um comportamento predominante de redução das concentrações de Manganês, exibindo padrão semelhante ao período chuvoso anterior.

Ao se avaliar a distribuição do Manganês, compreendendo os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 (**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 barragens, 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 Ribeirão dos Gomes (CE-01), na região 2C, no período 2019/2020 e com concentrações de 2 até 5 vezes acima de Vicq (2015) no Ribeirão Serra Azul (TT-04) na Região 1B em 2019/2020 e 2021/2022, indicando contribuição de Manganês nestas localidades, porém, não afetaram a qualidade dos sedimentos do rio Paraopeba. 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 chuva monitorados.

Figura 12.3.1-1 Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.



▪ **Ferro**

O Ferro, principal constituinte do rejeito, tem distribuição em concentrações elevadas em toda a bacia do rio Paraopeba. O IGAM adota a referência orientadora para Ferro de 281.000 mg/kg proposta por Vicq (2015). No período de chuva/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 chuva 2019/2020, as concentrações ora identificadas no período anterior apresentaram aumento, com maior quantidade de pontos que exibiram teores de Ferro acima de 281.000 mg/kg, desde a região Ferro-Carvão até 1B, deste modo, essas concentrações permaneceram entre 1,2 e 2 vezes maiores que o valor proposto por Vicq (2015), enquanto

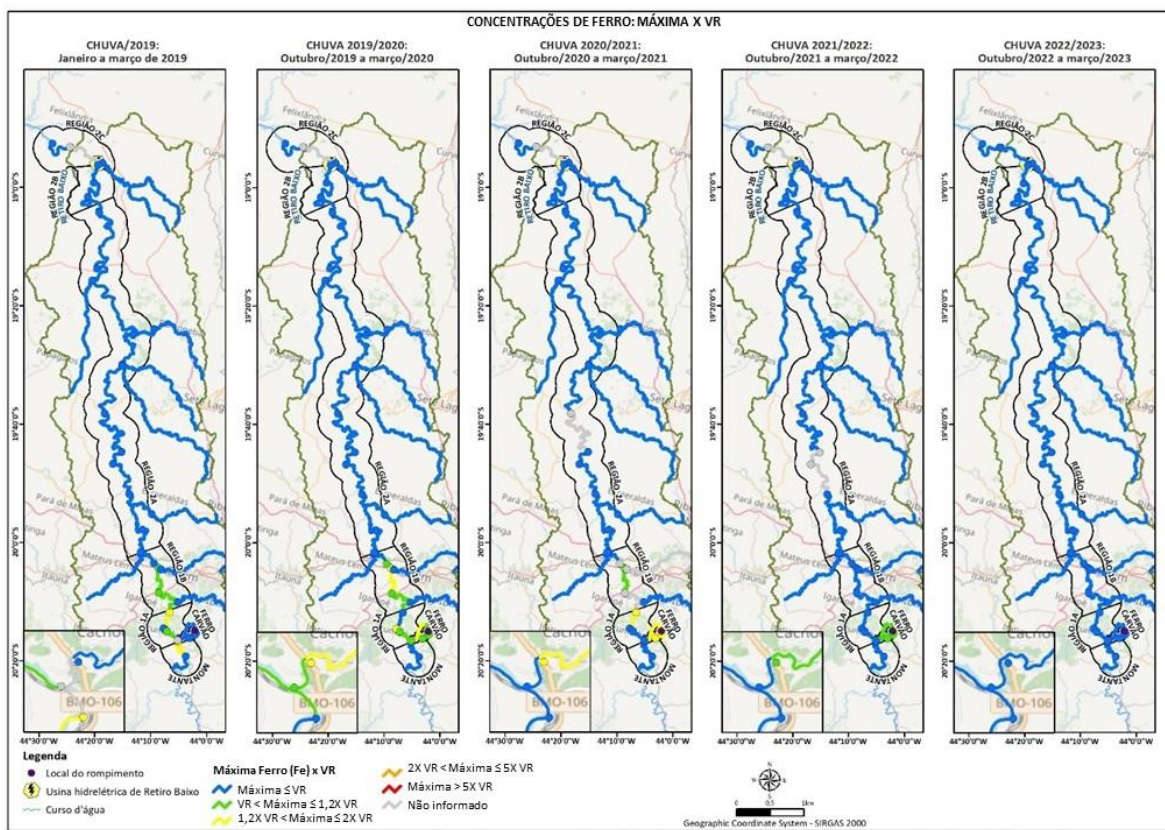
nas demais regiões, os valores das concentrações permaneceram abaixo da referência adotada.

O período de chuva 2020/2021 apresentou comportamento semelhante ao observado no período anterior, porém, com menor quantidade de pontos que apresentaram teores de Ferro acima de 281.000 mg/kg. Embora menos pontos tenham registrado valores acima do proposto por Vicq (2015), as concentrações entre a região Ferro-Carvão até a 1B permaneceram entre 1,2 e 2 vezes maiores que o valor proposto por Vicq (2015). Nas demais regiões, os valores das concentrações permaneceram abaixo da referência adotada.

Nos períodos de chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023 constatou-se redução das concentrações de Ferro entre as regiões Ferro-Carvão até a 1B. Em 2021/2022 somente o PT-11 e PT-12 apresentaram valores acima do proposto por Vicq (2015), exibindo concentrações até 1,2 vezes maiores que a referência. Enquanto em 2022/2023, nenhum ponto apresentou concentrações acima da referência. Durante esses dois períodos, nas demais regiões os valores das concentrações permaneceram abaixo da referência adotada.

De modo geral, ao se avaliar a distribuição do Ferro, compreendendo os períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 (**Figura 12.3.1-2**), as concentrações demonstraram redução ao longo do tempo e espaço. Observa-se ainda que de 2019 a 2021 havia disposição espacial localizada nas regiões Montante, Ferro-Carvão, região 1A e 1B, e, nas chuvas 2022/2023 essa disposição espacial se reduziu, não havendo variações espaciais de Ferro ao longo de nenhuma região, incluindo os tributários.

Figura 12.3.1-2 Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



▪ **Alumínio**

O Alumínio, que é um elemento abundante na bacia do rio Paraopeba. Ao se avaliar a distribuição dessa substância ao longo do rio, no período chuvoso de 2019, constatou-se que, as regiões 2B e 2C apresentaram as maiores concentrações, exibindo teores de 2 a 5 vezes maiores que o valor de referência de 45.300 mg/kg proposto por Vicq (2015) e adotado pelo IGAM, indicando incremento de Al nessas localidades. As regiões Montante, 1B e 2A apresentaram concentrações de 1,2 a 2 vezes mais elevadas do que a referência.

No período de chuvas de 2019/2020, a região Montante continuou a apresentar concentrações entre 1,2 e 2 vezes maiores que a referência, já a região Ferro-Carvão exibiu um leve aumento se comparado ao período anterior, apresentando concentrações entre 1,2 a 2 vezes maiores que o VR. 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 granitóides do Complexo Belo Horizonte, Granito Noschese e contribuições difusas nesta região do rio Paraopeba.

As regiões 1B e 1A não apresentaram valores maiores que o VR. A região 2 A, de modo geral, apresenta redução das concentrações, apresentando somente um pequeno trecho com teores

entre 1,2 a 2 vezes valor proposto por Vicq (2015). No entanto, o tributário ribeirão do Cedro (TT-07) apresentou concentrações de Alumínio mais elevadas, se comparado ao período anterior, exibindo valores até 1,2 vezes o valor proposto por Vicq (2015).

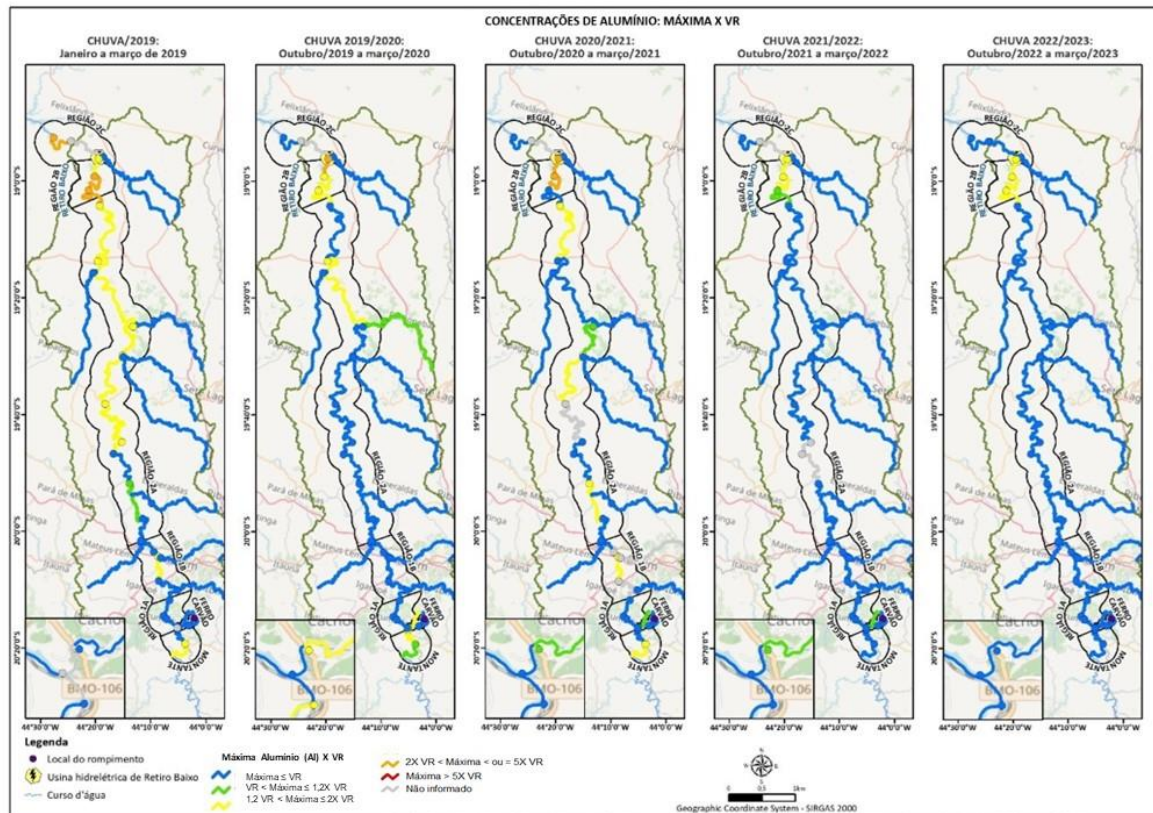
Na região 2B, onde o trecho que, no período anterior (2019) apresentou concentrações mais elevadas (de 2 a 5 vezes o VR), neste período apresentou concentrações mais reduzidas (de 1,2 a 2 vezes o VR), em contrapartida, o trecho que, no período anterior (2019) apresentou concentrações mais reduzidas (próximo a região 2C), neste período apresentou teores mais elevados (de 2 a 5 vezes o VR) e tais concentrações ficaram no reservatório da UHE Retiro Baixo. Na região 2C não foram registradas concentrações maiores que o VOR em 2019/2020.

Na chuva 2020/2021, as concentrações foram mais atenuadas na região Ferro-Carvão (até 1,2 vezes o valor proposto por Vicq (2015)). A região Montante mostrou, assim como no período anterior, concentrações entre 1,2 a 2 vezes mais elevadas que o VR. A região 1B apresentou aumento nos teores de Alumínio, exibindo concentrações entre 1,2 e 2 vezes o VR, a região 2A apresentou mais trechos exibindo concentrações entre 1,2 a 2 vezes o VR. A região 2B permaneceu exibindo valores mais elevados (2 a 5 vezes o valor de VR), a região 2C exibiu o mesmo comportamento do período anterior, sem registros de concentrações acima da referência.

Nos períodos 2021/2022 e 2022/2023 nota-se semelhança no comportamento do Alumínio, exibindo, na maior parte da bacia, concentrações menores que o VR (45.300 mg/kg) proposto por Vicq (2015), e, na região 2B, concentrações entre 1,2 a 2 vezes o VR. Em 2021/2022 na região Ferro-Carvão, somente o PT-12 apresentou concentrações mais elevadas que o VR, exibindo teores até 1,2 vezes mais elevados que a referência.

Ao se avaliar o Alumínio nos mapas temáticos nas chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 (**Figura 12.3.1-3**) tem-se a evidência de que a bacia tem concentrações elevadas para tal elemento principalmente a partir do PT-18 (região 2A) e região 2B. 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), granitóides (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 2021, havia disposição espacial de Al acima do proposto por Vicq (2015) em todas as regiões, com exceção da região 1A, e, a partir da chuva 2021/2022 essa disposição espacial se reduziu, se concentrando na região 2B, que é um ambiente mais lântico 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 12.3.1-3 Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



▪ **Níquel**

Na **Figura 12.3.1-4**, as concentrações de Níquel estão apresentadas por períodos sazonais de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. 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 de referência, 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.

Nas chuvas de 2019, as concentrações de Níquel tiveram ampla distribuição por toda a bacia, apresentando teores de 2 a 5 vezes acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, somente as regiões Ferro-Carvão e 2C apresentaram concentrações mais amenas (de 1,2 a 2 vezes acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12). Em relação aos tributários, o Rio Betim (TT-01) e o Ribeirão Serra Azul (TT-04) apresentaram concentrações de 1,2 a 2 vezes acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, enquanto o Ribeirão São João (TT-06) e o Ribeirão Cedro (TT-07) exibiram teores mais elevados, entre 2 a 5 vezes acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Os demais tributários não apresentaram concentrações acima do valor de referência.

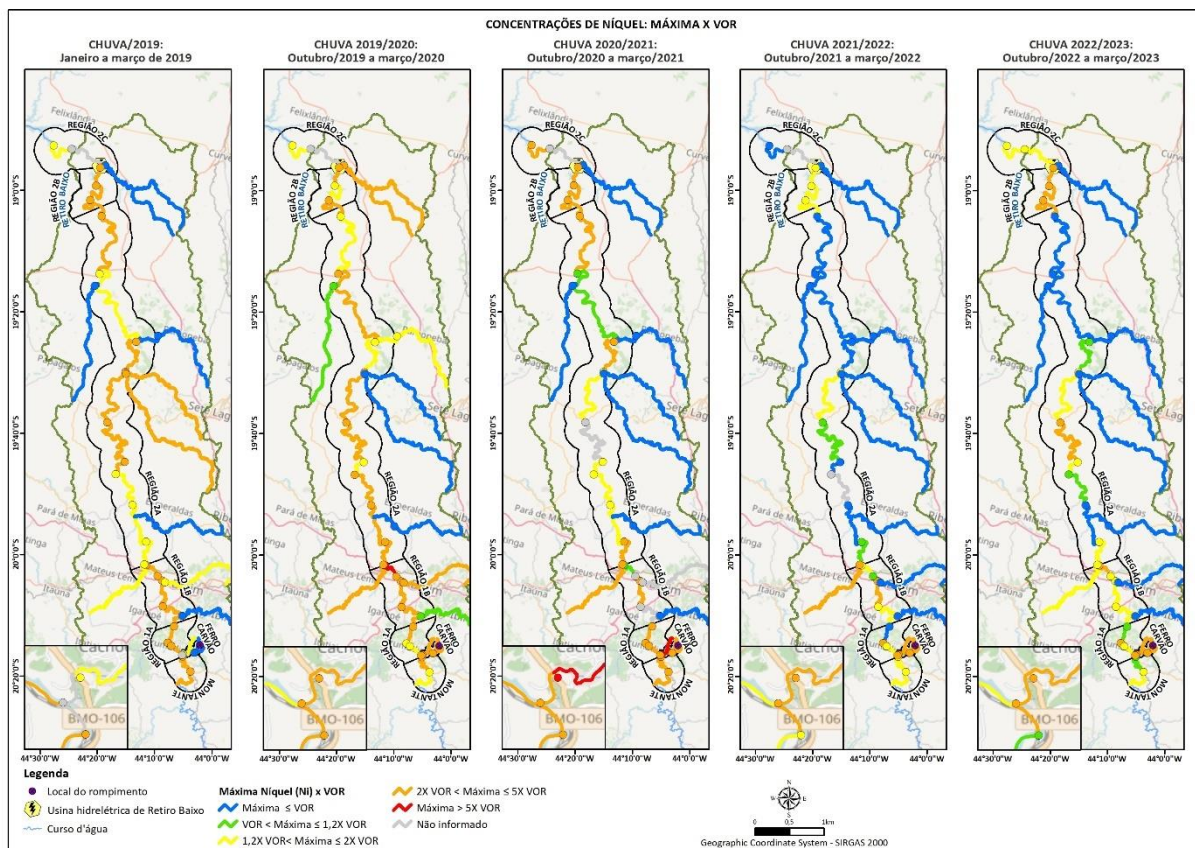
Nas chuvas de 2019/2020 as concentrações de Níquel permaneceram acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 em toda a bacia, a maior concentração foi observada pontualmente no PT-15 (região 1B), que mostrou teores 5 vezes mais elevados que o valor de referência. As demais regiões mostraram variação das concentrações acima do valor de referência, entre 1,2 a 5 vezes). Os tributários Ribeirão São João (TT-06) e o Ribeirão Cedro (TT-07) que, no período anterior apresentaram concentrações elevadas de Níquel, no período 2019/2020 exibe redução das concentrações, não apresentando valores acima da referência. Em contrapartida, o Rio Betim (TT-01) e o Ribeirão Serra Azul (TT-04) mostraram aumento das concentrações, apresentando teores entre 2 e 5 vezes mais elevados que a referência. O Ribeirão Sarzedo (TT-02), diferente do período anterior, mostrou concentrações 1,2 vezes maiores que o valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. O rio Pardo (TT-08) também apresentou aumento das concentrações em relação ao período anterior, exibindo teores até 1,2 vezes maiores que valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, do mesmo modo, o Ribeirão dos Gomes (CE-01) também mostrou aumento das concentrações, apresentando teores entre 2 e 5 vezes maiores que o valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12.

O período de 2020/2021 as concentrações de Níquel em comparação com as chuvas de 2019 e 2019/2020 (**Figura 12.3.1-4**) foram reduzidas nas regiões 1B e 2A, bem como em alguns tributários. Por outro lado, a região Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) e 2C apresentaram elevação das concentrações, apresentando teores maiores que 5 vezes o valor de nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 na região Ferro-Carvão, e, de 2 a 5 vezes o valor de nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 na região 2C. Neste período, o único tributário que apresentou valores acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 foi o Ribeirão Serra Azul (TT-04).

Os períodos de chuva 2021/2022 e 2022/2023 apresentam similaridade na distribuição espacial do Níquel, nota-se que, assim como no período anterior, somente o tributário Ribeirão Serra Azul (TT-04), mostrou concentrações acima do valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. De modo geral, nesses dois períodos, as concentrações variaram entre 1,2 a 5 vezes o valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12.

Comparando o período atual 2022/2023 com o anterior (2021/2022), nota-se redução na região Montante, manutenção das concentrações máximas entre as regiões Ferro-Carvão até a 1B, aumento em trechos da 2A e aumento na região 2B, esta última apresentando teores entre 2 e 5 vezes mais elevados que o valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Na região 2C também houve aumento e os teores de Ni ficaram entre 1,2 e 2 vezes mais elevados que o valor de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Estas variações estão, possivelmente, associadas ao reflexo do transporte e acúmulo de sedimentos provenientes do intemperismo de rochas, uso do solo, erosões marginais da bacia do Paraopeba. Ainda, na região 1B tem-se que o intemperismo de rochas máficas/ultramáficas do Grupo Nova Lima e erosões de solos marginais, puderam incrementar o aumento nas concentrações locais desses elementos. Com as chuvas, há o transporte de materiais que acaba por se acumular nos reservatórios. No caso da região 2B houve um incremento em relação ao período anterior, mas provavelmente associado ao material já depositado no próprio reservatório.

Figura 12.3.1-4 Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



▪ **Cobre**

Na **Figura 12.3.1-5**, as concentrações de Cobre estão apresentadas por períodos sazonais de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023. Com o rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de Cobre no rio Paraopeba na chuva/2019, seja por causa das contribuições provenientes do rejeito da barragem B1, B4, B4A em que as concentrações na região 1A e 1B foram cerca de até 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 chuva/2019/2020, as concentrações mais elevadas foram registradas na região Ferro-Carvão, que foram até 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, enquanto as regiões 1A e 1B, que no período anterior mostrou valores mais elevados, neste período, apresentou redução das concentrações, exibindo teores entre 2 a 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. A região 2 A apresentou menor quantidade de pontos que ultrapassaram o valor de referência, embora as concentrações tenham sido semelhantes (entre 2 a 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12). A região 2B mostrou comportamento semelhante ao observado no período anterior, mantendo as concentrações, já

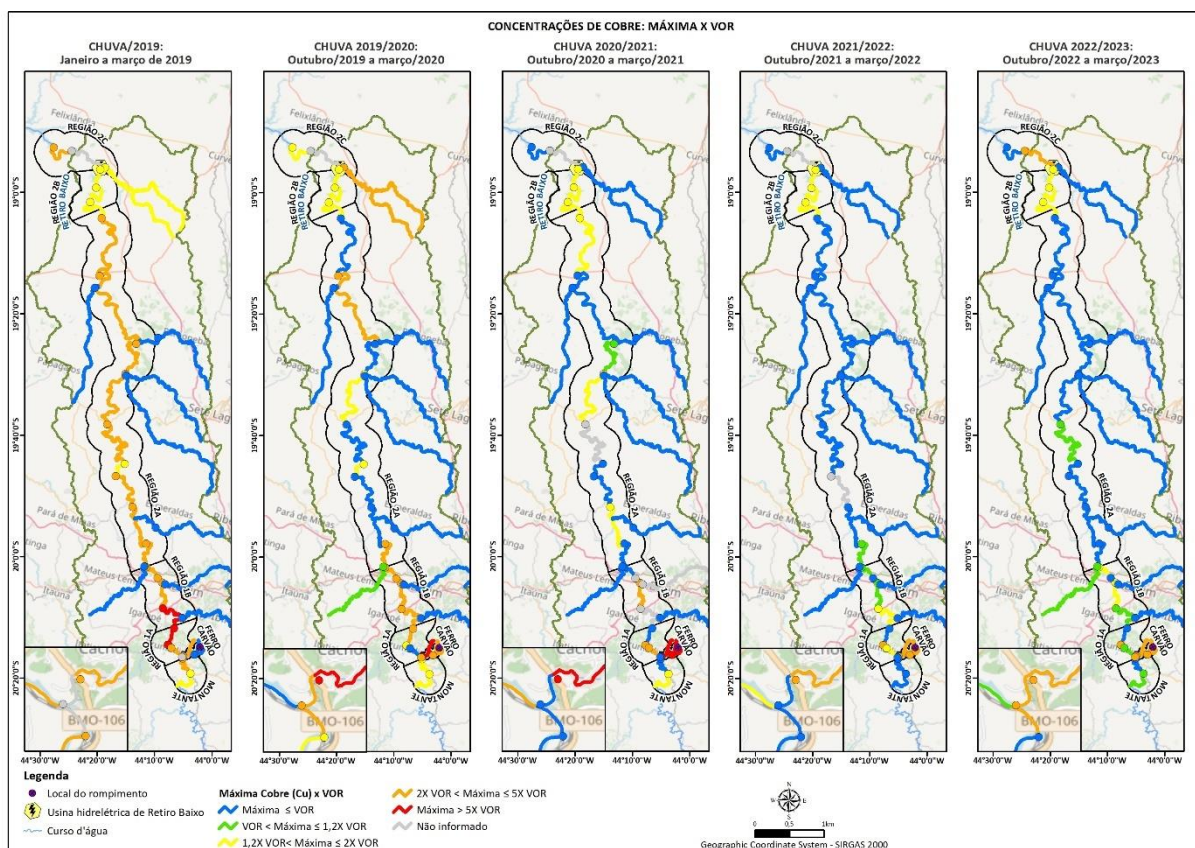
a região 2C apresentou redução das concentrações. Os tributários Ribeirão Serra Azul (TT-04) e o Ribeirão dos Gomes (CE-01) mostraram neste período, aumento das concentrações em relação ao período anterior, com teores até 1,2 vezes maiores (TT-04) e de 2 a 5 vezes (CE-01) maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12.

No período 2020/2021, observa-se que, em relação aos períodos anteriores (2019 e 2019/2020), as concentrações de Cobre na bacia do rio Paraopeba foram se reduzindo. As concentrações mais elevadas foram registradas na região Ferro-Carvão, com teores até 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. A região 1B mostrou concentrações entre 2 a 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, já a região 2A, exibiu teores até 2 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. A região 2B mostrou os mesmos teores em todos os períodos chuvosos analisados (entre 1,2 até 2 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12). A região 2C não apresentou concentrações maiores que o valor de referência.

Por fim, nas chuvas 2021/2022 e 2022/2023, o comportamento do Cobre mostrou semelhança nas concentrações. A região Ferro-Carvão exibiu teores entre 2 a 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, em ambos os períodos. As demais regiões apresentaram concentrações entre 1,2 até 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. O tributário Ribeirão Serra Azul (TT-04) apresentou em 2022/2023, concentrações até 1,2 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12.

Ao se avaliar a distribuição do Cobre, compreendendo os períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 (**Figura 12.3.1-5**), as concentrações demonstram redução ao longo da evolução temporal e espacial. Entre 2019 a 2021, havia disposição espacial de Cu acima da Resolução CONAMA nº 454/2012 em todas as regiões, ao passo que, em 2021/2022, essa disposição se reduziu, ocupando as regiões do mapa com concentrações acima do VOR em até 5 vezes em alguns trechos da região Ferro-Carvão e pontualmente na 1A. Na região a montante e na maior parte da região 2A, não foram observadas concentrações em desacordo com a referência da Resolução CONAMA 454/12. Na chuva 2022/2023 essa condição se manteve, com exceção da região de Montante e 2C.

Figura 12.3.1-5 Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



■ **Chumbo**

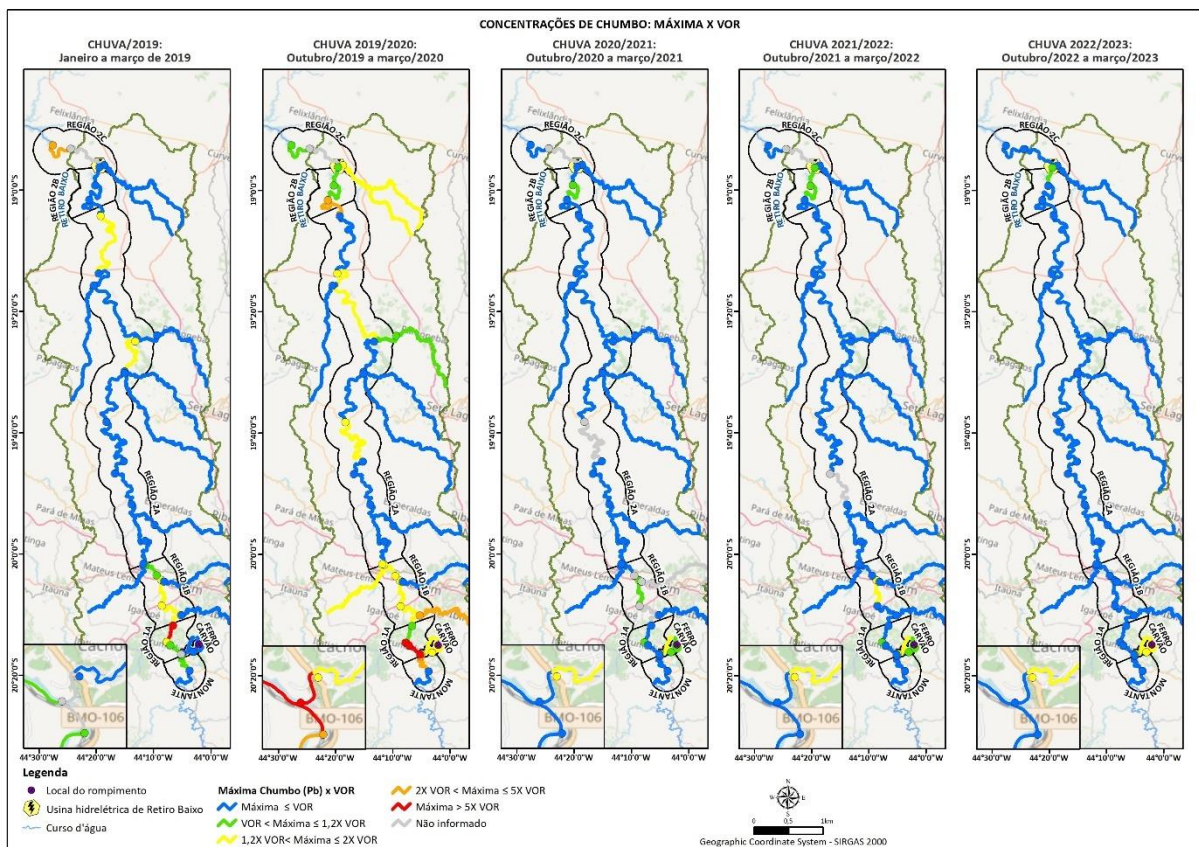
No período de chuva/2019, as concentrações de Chumbo (**Figura 12.3.1-6**) ficaram maiores que o valor orientador da Resolução CONAMA nº 454/2012 em trechos desde a Região montante até a Região 2C, sendo as maiores concentrações identificadas na região 1A, mais que 5 vezes acima do VOR 1, possivelmente, resultante de alguma contribuição anômala local associada com a mistura de materiais com rejeito e a própria contribuição difusa de uso de solo na localidade.

Na chuva 2019/2020, observou-se aumento das concentrações de Chumbo nas regiões Montante e na 2B, exibindo teores até 5 vezes o valor de VOR nível 1. Por outro lado, a região 2C mostrou redução das concentrações. Nas demais regiões, as concentrações mostraram manutenção, quando comparados com o período anterior. Nesse período, os tributários Ribeirão Sarzedo (TT-02), Ribeirão Serra Azul (TT-04) e Ribeirão dos Gomes (CE-01) apresentaram concentrações acima do VOR 1, indicando contribuições de chumbo provenientes da própria bacia.

Os períodos 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, apresentaram redução das concentrações em relação aos períodos anteriores e semelhança na distribuição espacial do Chumbo, exibindo concentrações entre 1,2 a 2 vezes o valor de referência da Resolução CONAMA 454/12, apenas nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B, sendo que, no período atual (2022/2023), somente a região Ferro-Carvão e 2B apresentaram concentrações até 2 vezes mais elevadas que o VOR. Este acúmulo também está associado com a granulometria do sedimento, visto que em áreas de maior retenção hidráulica como no caso da estaca prancha no Ferro-Carvão, UTE Igarapé na região 1B e reservatório de UHE Retiro Baixo na região 2B são ambientes mais lânticos que contribuem para a dissipação e sedimentação de materiais finos, com consequente, aumento de substâncias químicas no sedimento. A Região 2C já apresentava Chumbo nos sedimentos mesmo antes do rompimento da barragem e isso pode ser reflexo de contribuições locais como uso e ocupação do solo.

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 12.3.1-6 Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



▪ **Arsênio**

Na **Figura 12.3.1-7** são apresentadas as variações de Arsênio nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.

As concentrações de Arsênio na chuva 2019, ficaram entre 1,2 a 5 vezes maiores que os valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, com permanência desde a região Montante até a 2B, enquanto na 2C, as concentrações foram até 2 vezes maiores que a referência neste período. Os tributários do rio Paraopeba também apresentaram concentrações entre 1,2 até 2 vezes o valor da referência e acima do nível 1.

Na chuva 2019/2020, o Arsênio apresentou concentrações máximas com comportamento semelhante ao da chuva/2019 nas regiões Montante, 1A, 1B, 2B, 2C e trechos da 2A, com aumento em relação a chuva/2019, na região Ferro-Carvão. Houve aumento também no número de tributários que apresentaram valores acima da referência, as concentrações desses tributários variaram de 1,2 a 5 vezes maiores que a referência.

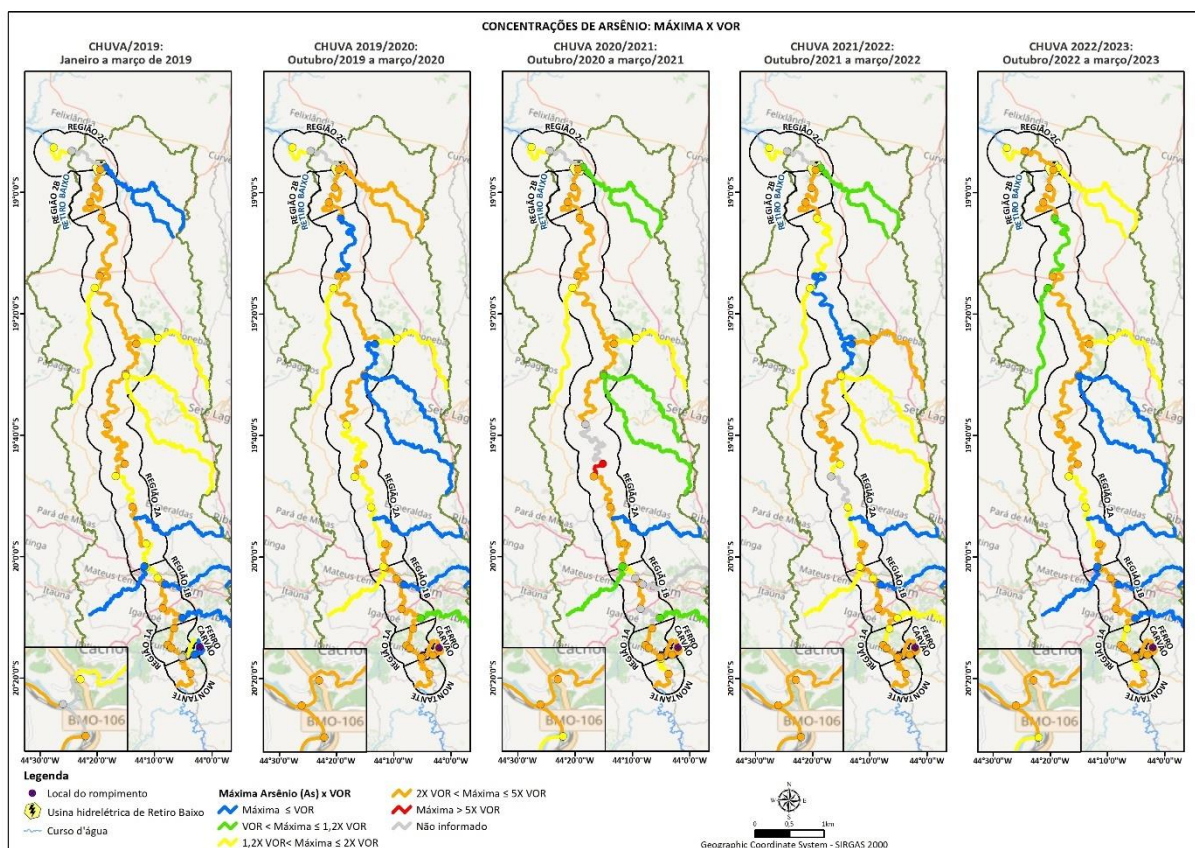
No período de chuva 2020/2021, observa-se aumento das concentrações de Arsênio em alguns trechos da região 2A, chegando a apresentar concentrações até 5 vezes maiores que a legislação. Em relação aos tributários, observa-se redução ou manutenção das concentrações, em relação ao período anterior.

No período de 2021/2022, observa-se redução das concentrações em alguns trechos da região 2A, com concentrações de 1,2 até 5 vezes maiores que a referência. Observa-se aumento das concentrações em alguns trechos das regiões Montante e 1B, além de aumento dos teores de Arsênio na maioria dos tributários.

No período de 2022/2023, nota-se que variação nos teores de Arsênio da região 2A, com alguns trechos apresentando redução, e outros, aumento, em relação ao período anterior. A região Montante apresentou redução das concentrações, e a região 2C, apresentou aumento. Nesse período os notou-se que uma menor quantidade de tributários apresentou valores acima da referência.

De modo geral, esse 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 12.3.1-7 Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



■ **Cromo**

Os mapas de distribuição espacial do Cromo por períodos de chuva/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 estão na **Figura 12.3.1-8**. De modo geral, observa-se semelhança na distribuição espacial do Cromo na bacia do rio Paraopeba entre os períodos de chuva analisados.

Na chuva/2019, as maiores concentrações de Cromo, com teores entre 2 e 5 vezes acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram registradas ao longo de toda a bacia, exceto na região Ferro-Carvão, 1A e 2C, que apresentaram concentrações mais reduzidas.

Comparando-se a chuva 2019/2020 com a anterior (2019), percebeu-se que as concentrações apresentaram aumento nas regiões Ferro-Carvão, 1B e 2A, mostrando concentrações até 5 vezes acima da referência da Resolução CONAMA 454/12. Este 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. Na região 1B e início da 2A, o aumento foi, provavelmente, por causa de atividades de lixiviação de Cromo de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima, presente na margem esquerda do rio Paraopeba

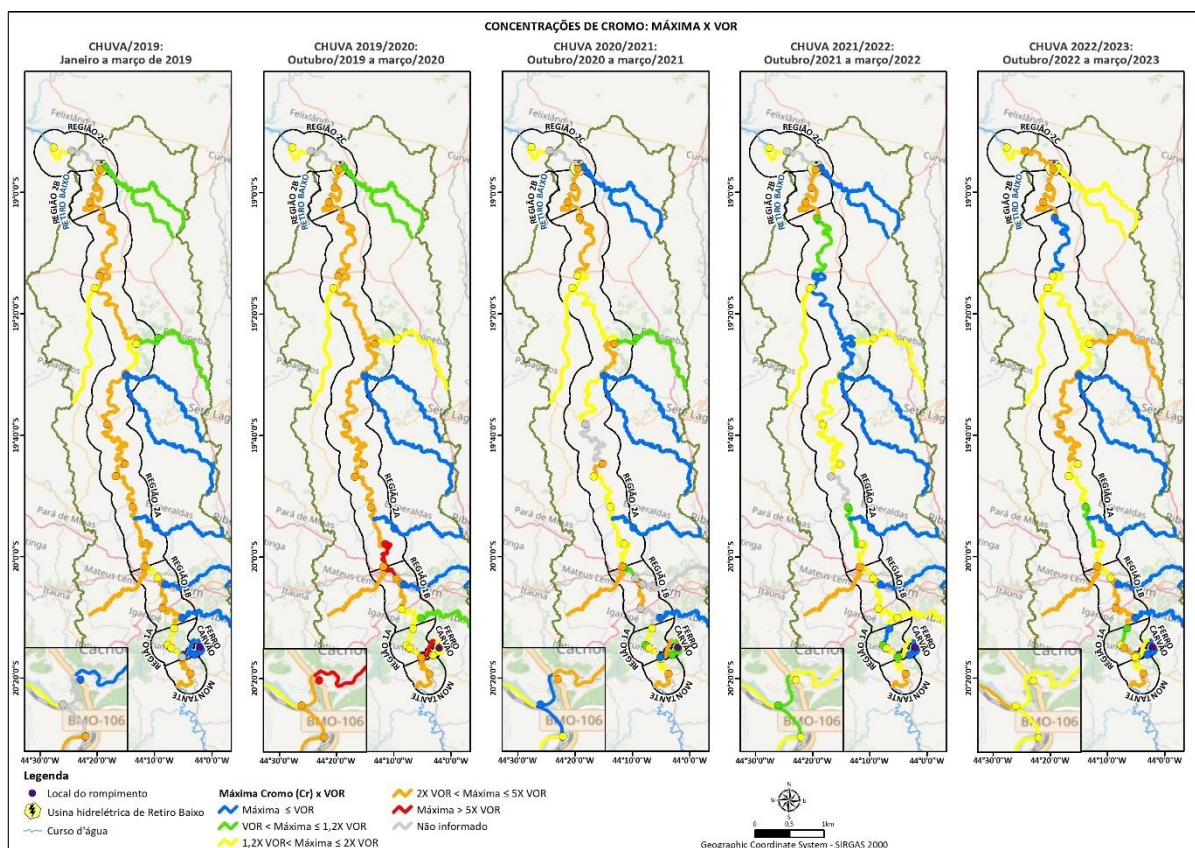
ou até mesmo consequência de erosão marginal. Na região 2A, ainda o uso e ocupação do solo aliado ao transporte de materiais provenientes de regiões a montante dela, erosões marginais como reflexo do aumento das vazões dos rios e escoamento direto de locais mais desmatados contribuíram para o aumento dessas substâncias. As regiões 2B e 2C mantiveram concentrações maiores que a referência da Resolução CONAMA 454/12, como no período anterior.

Nos períodos de chuva 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 as concentrações mostraram semelhança na distribuição espacial na bacia, exibindo redução em determinados trechos que, no período anterior, mostravam concentrações mais elevadas. Os teores máximos nesses períodos foram de até 5 vezes acima da referência da Resolução CONAMA 454/12.

Dessa forma, ao se avaliar o comportamento do cromo no tempo e no espaço, constatou-se que ele está presente na bacia do rio Paraopeba (Atlas Geoquímico, CPRM 2018 e mapa geoquímico de distribuição do cromo nos sedimentos de fundo da bacia do Paraopeba (Arcadis, 2020b). Ele não é constituinte do rejeito da barragem como pode ser visto nas concentrações de rejeito observadas por Geoenviron (2019) e, a constar pelos resultados analíticos, os rejeitos das barragens B1, B4, B4A não corroboraram para intensificar as concentrações de Cromo que já existiam na bacia.

A distribuição espacial do Cromo nos períodos chuvosos analisados (**Figura 12.3.1-8**), também corrobora com o comportamento observado e que demonstra características da própria bacia, uma vez que as concentrações, mesmo atenuadas, permanecem acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 em toda bacia, incluindo nos tributários.

Figura 12.3.1-8 Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.



■ **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 das barragens B1, B4, B4A. 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 228nm 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.

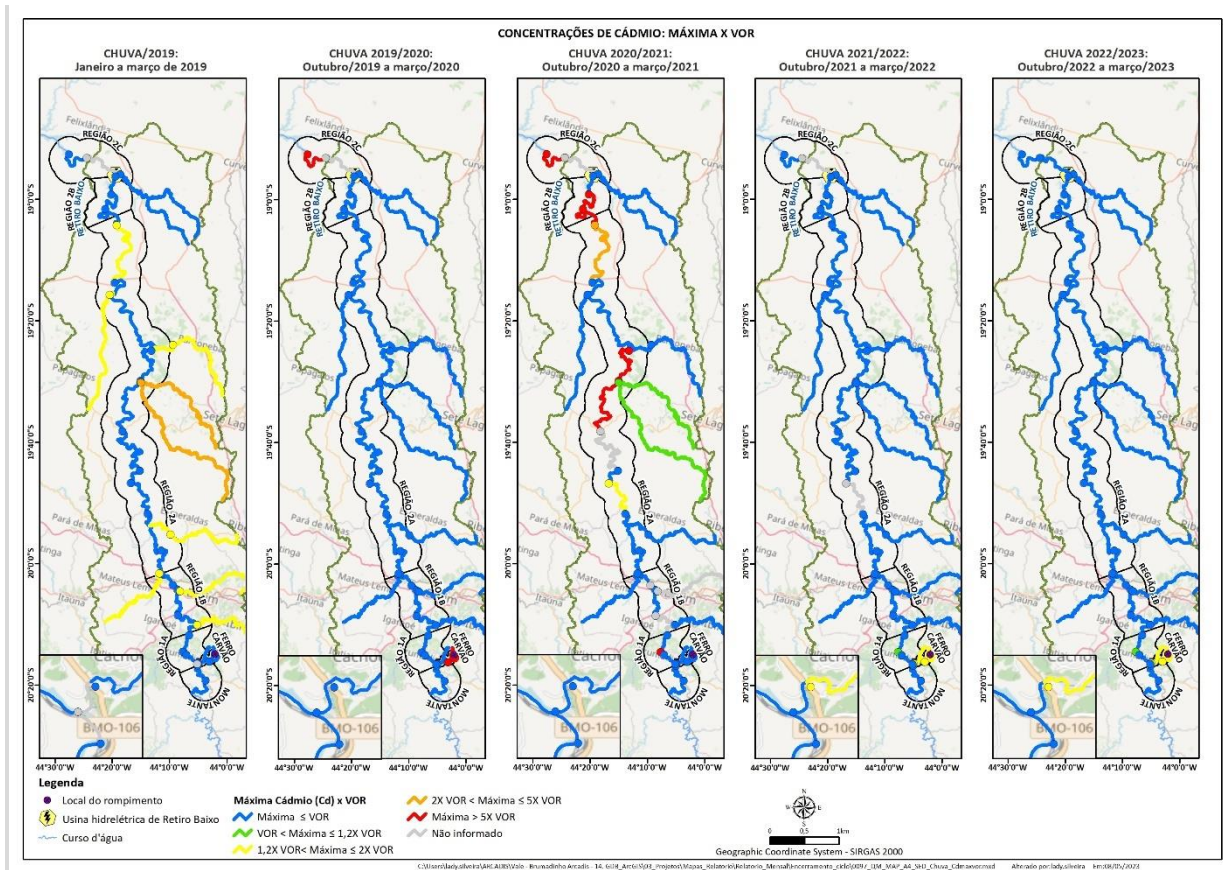
Na chuva/2019 (**Figura 12.3.1-9**) foram constatados afastamentos em relação a referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 em todas as regiões, com exceção de um pequeno trecho da região 2B, em geral, com concentrações até 2 vezes acima da referência na bacia do rio Paraopeba, enquanto nos tributários as concentrações se mantiveram até 5 vezes o valor de referência e com provável associação ao uso do solo local.

Na chuva 2019/2020, observa-se redução de Cádmio ao longo de toda a extensão do monitoramento, com valores acima do VOR 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 apenas nos tributários e pontualmente na região Ferro-Carvão e 2C, onde a ocorrência de Cádmio está relacionada a acúmulo de sedimentos muito finos no Ferro-Carvão e 2C e a alguma contribuição de uso e ocupação de solo locais.

Na chuva 2020/2021, as concentrações de Cádmio apresentam aumento ao longo de alguns trechos da bacia, pontualmente na região 1A, 2A e 2B e 2C, além da 2C, esses trechos apresentaram teores até 5 vezes acima da referência. Por serem pontuais e não persistentes no tempo, os resultados foram associados a contribuições difusas locais.

Na chuva 2021/2022, assim como em 2022/2023, observa-se redução das concentrações ao longo de toda a bacia, sendo somente a região Ferro-Carvão a apresentar concentrações acima da referência, de 1,2 a 2 vezes acima do valor da referência. Estes resultados estão associados a presença de sedimentos finos na localidade, bem como lixiviação de solo e minerais de rochas da litologia local.

Figura 12.3.1-9 Evolução do Cádmiu no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023

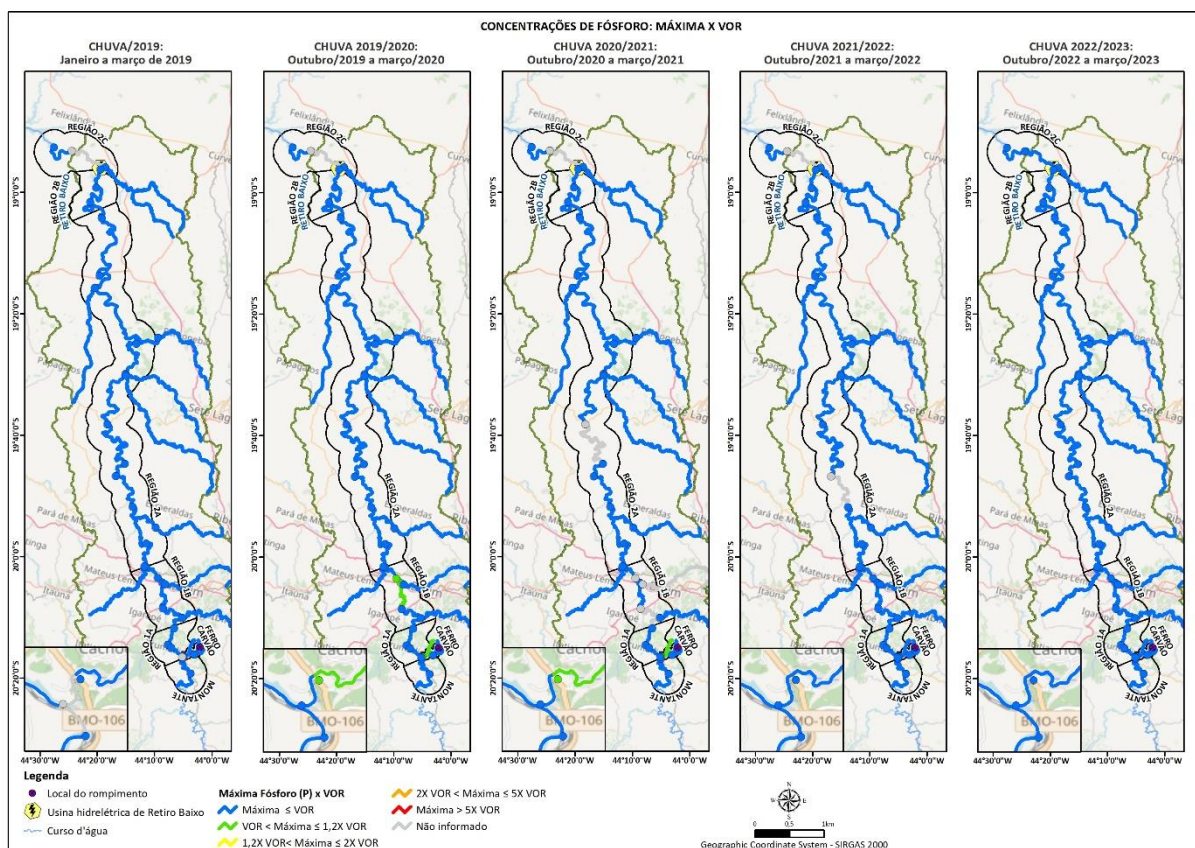


■ **Fósforo**

Os mapas de distribuição espacial do Fósforo por períodos de chuva/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 estão na **Figura 12.3-10**. De modo geral, durante todos os períodos de chuva analisados, observa-se semelhança na distribuição deste parâmetro ao longo da bacia do rio Paraopeba e que esteve predominantemente com valores abaixo da referência da Resolução CONAMA 454/12. Percebe-se com isso que o rompimento da barragem não contribuiu para aumentar as concentrações de fósforo no rio Paraopeba.

Pontualmente, as concentrações acima do VOR 1 (2000 mg/kg) só foram observadas nos períodos de 2019/2020, nas regiões Ferro Carvão e 1B, e em 2020/2021, somente na região Ferro-Carvão, essas concentrações alcançaram teores de até 1,2 vezes o valor de VOR e tais valores se dissiparam não sendo identificados em outros trechos da bacia 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.

Figura 12.3.1-10 Evolução do Fósforo no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023.



▪ **Zinco**

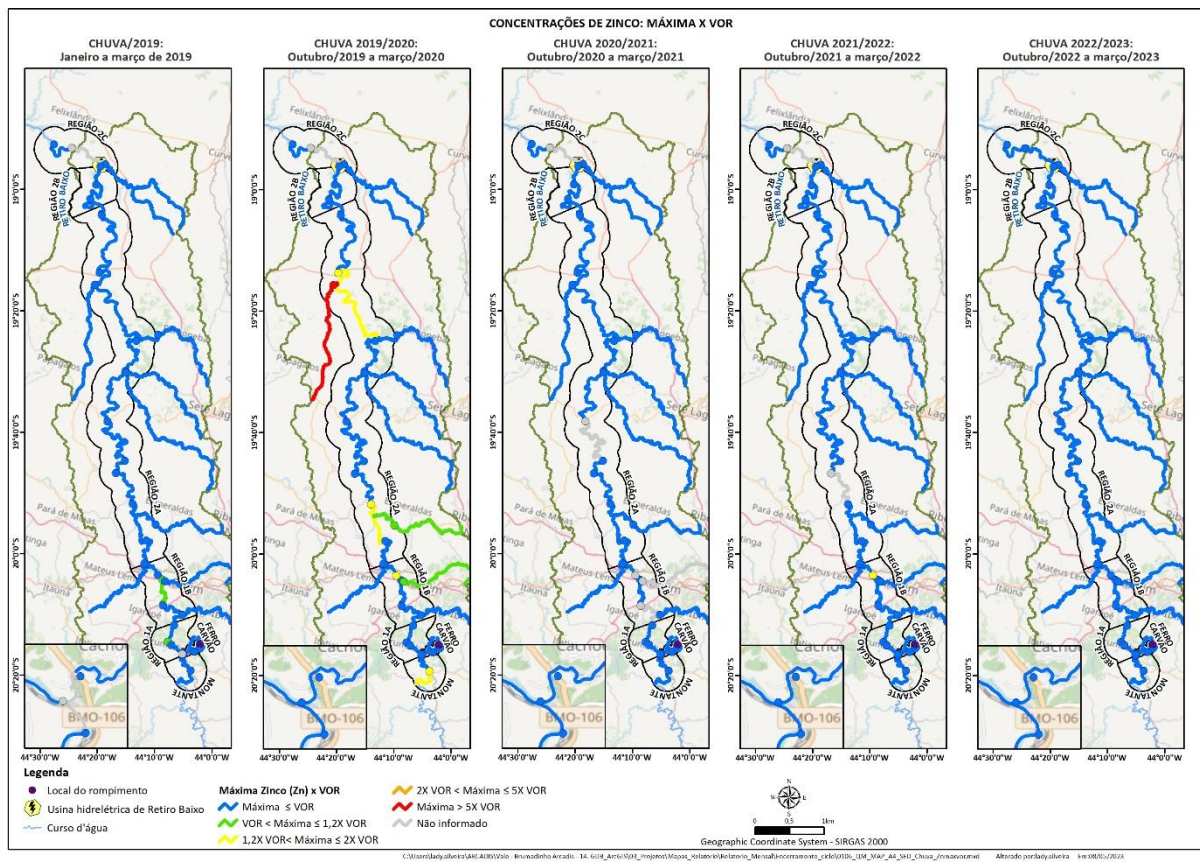
Os mapas de distribuição espacial do Zinco por períodos de chuva/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 estão na **Figura 12.3.1-11**. De modo geral, observa-se semelhança na distribuição deste parâmetro ao longo da bacia do rio Paraopeba.

Nota-se que, na chuva/2019, concentrações acima do VOR 1 (123 mg/kg) só foram observadas na região 1B e pontualmente na região 1A, esses teores foram até 1,2 vezes maiores que o VOR.

Em 2019/2020, observa-se aumento das concentrações de Zinco entre 1,2 e 2 vezes maiores que o VOR, nas regiões Montante, pontualmente na 1B, e em alguns trechos da 2A. O tributário Rio Pardo (TT-08) apresentou as maiores concentrações desse período, chegando a alcançar teores 5 vezes maiores que o valor de VOR, enquanto o rio Betim (TT-01) e ribeirão Grande (TT-05) exibiram concentrações até 1,2 vezes o valor de VOR. Em 2021/2022 somente uma ocorrência pontual na região 1B mostrou valores 1,2 a 2 vezes maiores que o VOR.

Em 2020/2021, assim como no período atual, 2022/2023, não foram observadas concentrações maiores que o valor de referência. As concentrações de zinco estão associadas diretamente com o uso do solo e à sua disposição na bacia do rio Paraopeba. Os locais em que o zinco apareceu no sedimento foram pontuais e distantes da área fonte das barragens B1, B4, B4A não verificando-se associação direta com os rejeitos delas.

Figura 12.3.1-11 Evolução do Zinco no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



■ **Mercúrio**

Os mapas de distribuição espacial do Mercúrio por períodos de chuva/2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 estão na **Figura 12.3.1-12**.

Na chuva/2019, as maiores concentrações de Mercúrio, com teores entre 2 e 5 vezes acima da referência da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram registradas nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A e 1B, um pequeno trecho da região 1B. Neles, as concentrações foram 1,2 a 2 vezes o valor da referência.

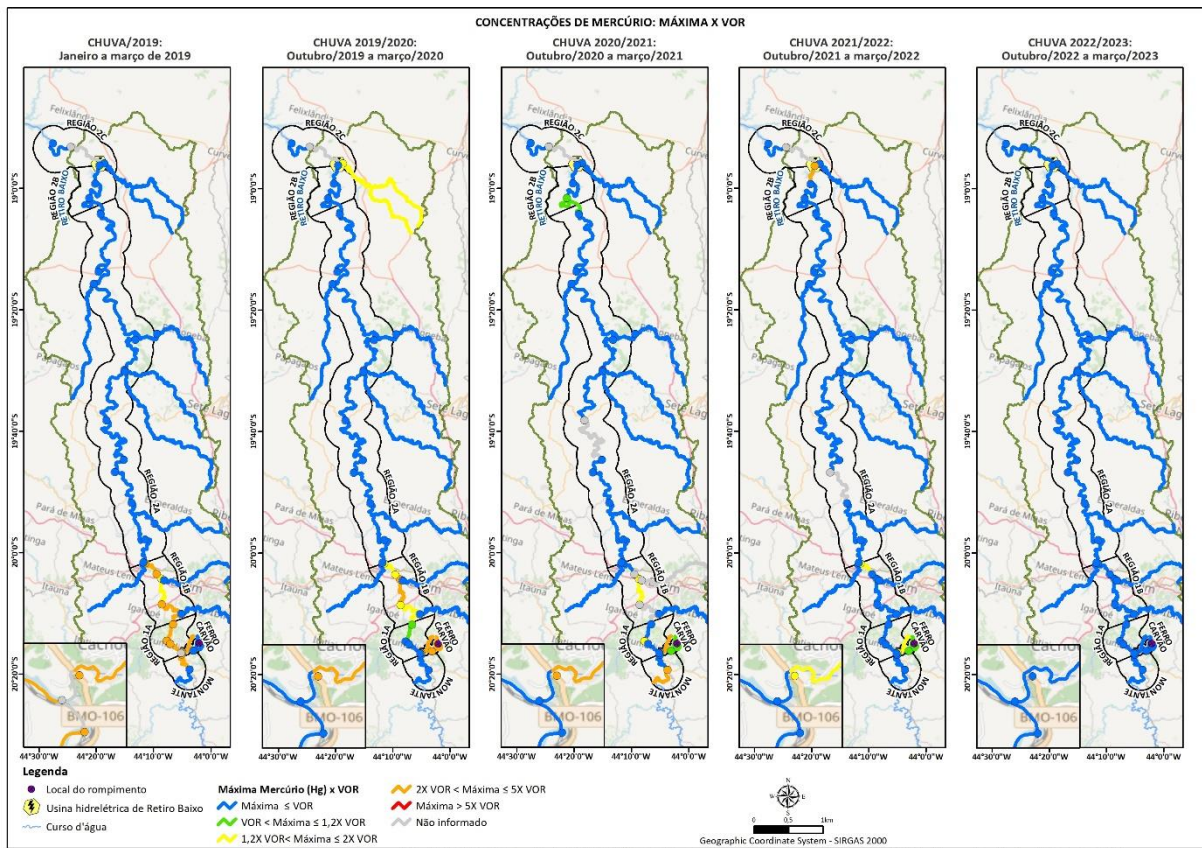
Em 2019/2020 notou-se concentrações semelhantes com as encontradas no período anterior, exceto na região Montante, que apresentou redução das concentrações em relação ao período

anterior, não apresentando neste, concentrações maiores que o VOR. Do mesmo modo, a região 1A mostrou redução das concentrações de Mercúrio, exibindo teores até 1,2 vezes maiores que o VOR. O tributário ribeirão dos Gomes (CE-01) mostrou concentrações de Mercúrio 1,2 a 2 vezes maiores que o valor de referência.

Em 2020/2021 observa-se aumento das concentrações na região Montante, com teores 2 a 5 vezes maiores que o VOR, a região Ferro-Carvão exibiu manutenção das concentrações em um trecho e no outro, redução. Pontualmente na região 1A, observa-se teores 1,2 a 2 vezes maiores que o VOR, a região 2B também mostra essas concentrações. A região 2B mostrou aumento das concentrações em relação ao período anterior, com teores até 1,2 vezes o valor da referência. Já em relação ao ribeirão dos Gomes, houve redução das concentrações de Mercúrio, não apresentando neste período, teores maiores que o VOR.

Em 2021/2022 observa-se que a região Ferro-Carvão apresentou redução das concentrações em relação ao período anterior, apresentando teores até 2 vezes maiores que o VOR. Na região 1B, observa-se registro pontual de concentrações entre 1,2 a 2 vezes o valor da referência, por outro lado, a região 2B mostrou teores entre 2 a 5 vezes o valor de VOR. No período atual, 2022/2023 não foram observadas concentrações superiores ao VOR.

Figura 12.3.1-12 Evolução do Mercúrio no sedimento nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021, chuva 2021/2022 e chuva 2022/2023



12.4. Considerações

Para a comparação dos percentuais de desvios em relação aos valores orientadores, no período chuvoso de 2022/2023, 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. No período chuvoso em análise, Manganês e alumínio ultrapassaram os valores orientadores Vicq (2015) e arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo e níquel ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1) da Resolução CONAMA nº 454/2012. Em relação ao valor orientador do nível 2 da mesma Resolução, ocorreram desvios para arsênio nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B, cromo na região 2B e níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2B.

Os pontos localizados entre PT-11 (Ferro-Carvão) e Região 1B estão localizados nas regiões mais afetadas pelos rejeitos provenientes das barragens B1, B4, B4A sendo que é neste intervalo que ocorreram os maiores aumentos de Manganês no período de 2019 e ainda até 2020/2021. Destaca-se que, dentre esses pontos, o PT-11, PT-12, PT-02, PT-14 e PT-15 são os que possuem maior percentual de concentrações acima do valor orientador e, coincidentemente, possuem maiores proporções de sedimentos finos (silte e argila) quando comparados aos demais mencionados.

Os pontos da Região 2B (Reservatório da UHE Retiro Baixo) também possuem predomínio das frações finas (silte e argila), no entanto, há ausência de concentrações de Ferro e Manganês acima do valor de referência proposto por Vicq (2015). Por outro lado, observa-se que apenas 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. 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 orientadores nessa região.

Os parâmetros que apresentaram elevação nos percentuais em relação ao nível 1, para a chuva 2022-2023 em relação a anterior (2021/2022), foram: Arsênio (regiões Montante (92,0%), 2A (47,1%), 2B (100,0%) e 2C (77,8%)), Chumbo (região Ferro-Carvão (44,0%), Cobre (regiões Montante (4,0%), Ferro-Carvão (100,0%), 1B (34,1%), 2B (92,0%) e 2C (2,8%), Cromo (regiões 1B (77,3%), 2A (40,0%), 2B (100,0%) e 2C (80,6%)), e Níquel (regiões Montante (64,0%), Ferro-Carvão (92,0%), 1B (52,3%), 2A (24,3%), 2B (100,0%) e 2C (52,8%). Para o nível 2, analisando-se a chuva 2022/2023 em comparação a chuva 2021/2022, apresentaram elevação os parâmetros: Arsênio (regiões Montante (12,0%), Ferro-Carvão (34,0%), e 1B (15,9%), Cromo (Região 2B (14,0%), Níquel (regiões Ferro-Carvão (50,0%), 1A (4,5%), 2A (1,4%) e 2B (10,0%).

Ao se avaliar a evolução dos sedimentos no tempo e no espaço constatou-se que as concentrações dos metais prioritários (Ferro, Alumínio e Manganês) apresentaram, ao longo do tempo, redução, para a maioria das regiões. Em relação aos parâmetros traço, notou-se que, alguns deles apresentaram, ao longo do tempo, maior redução das concentrações do que outros, são eles: Cobre, Chumbo, Cádmio e Mercúrio. Por outro lado, outros parâmetros (Níquel, Arsênio, Cromo, Fósforo e Zinco) também apresentaram redução ao longo do tempo, porém, menos expressivas que as citadas anteriormente. Contudo, verifica-se que nas regiões afetadas pelo rejeito (Ferro-Carvão, 1A e 1B), ainda se observa a interferência deste, principalmente, para Manganês.

13. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais

13.1. Objetivo

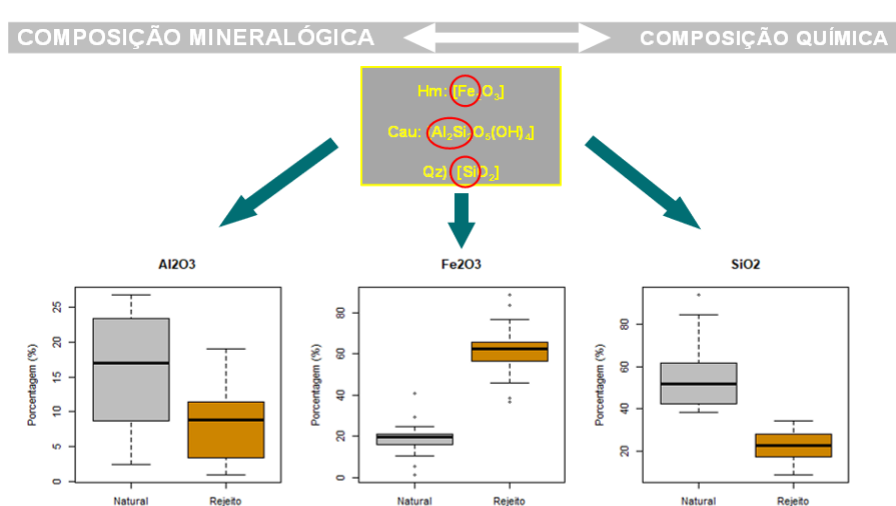
O objetivo da avaliação da evolução da composição químicas dos sedimentos ao longo do período de chuva 2022/2023 foi verificar se houve mudanças na distribuição dos sedimentos com características químicas de rejeitos ao longo do rio Paraopeba ao se comparar com os ciclos sazonais anteriores.

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, 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 alumina (**Figura 13.2-1**).

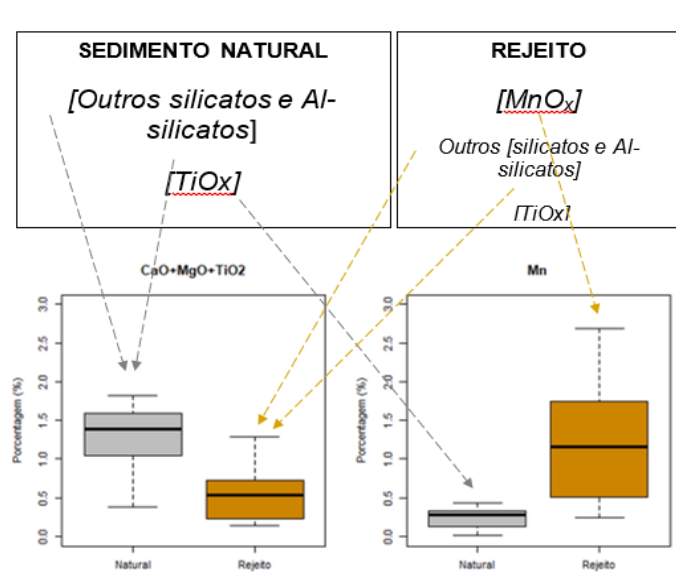
Figura 13.2-1 Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, contendo as porcentagens de ocorrência de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 nos rejeitos e sedimentos naturais



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)



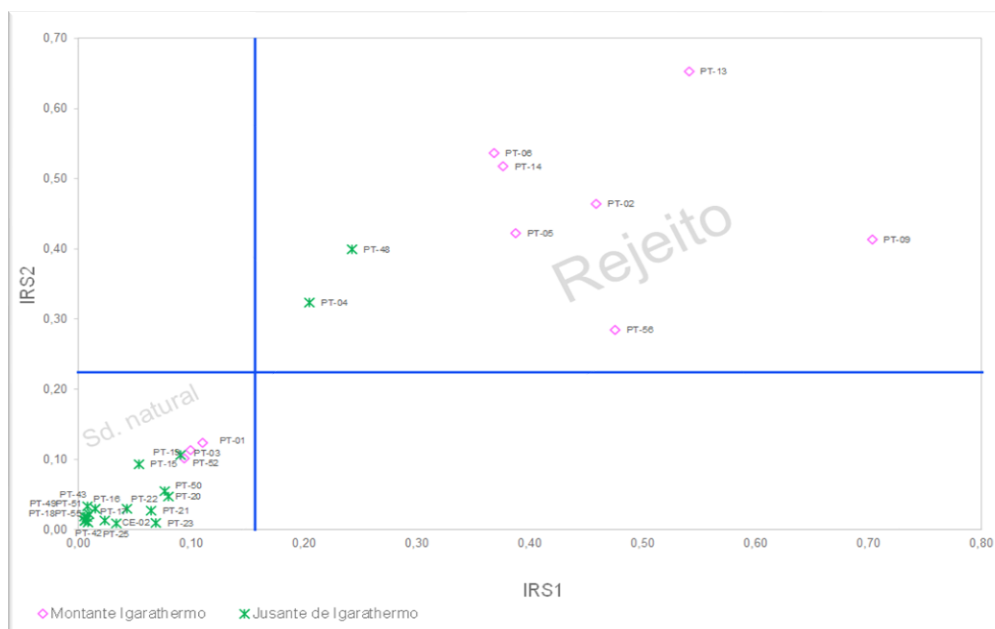
Fonte: Arcadis, 2020a.

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 de 2019, onde foram separados os locais com predominância de rejeitos dos materiais com predominância de sedimentos naturais (**Figura 13.2-3**) 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.

Figura 13.2-3 Diagrama dos índices composicionais IRS1 e IRS2 para dados de sedimentos de corrente localizados a montante e a jusante da UTE Igarapé, com uso dos dados de sedimentos de corrente avaliados com o XRF



Fonte: Arcadis (2020a)

Com base no diagrama da **Figura 13.2-3** procurou-se evidenciar os locais que não foram afetados pelos rejeitos das barragens B1, B4 e B4A e, com isso, estabelecer os balizadores que apresentaram os valores limites dos quadrantes que indicam os índices composicionais de característica química de sedimentos naturais e de rejeito, fundamentado em dados P95.

Os índices balizadores foram avaliados, inicialmente, com os dados brutos das análises composicionais realizadas sobre sedimentos de corrente, através do método XRF, do período de chuvas de 2019/2020, até o período de chuvas de 2020/2021. Os balizadores identificados na avaliação dos dados brutos foram calculados considerando o percentil 95 (P95) dos dados analíticos brutos das análises por Fluorescência de Raios X (XRF) de sedimentos de corrente, para cada região, a fim de agrupar os pontos e se evitarem os *outliers*. Para fins de acompanhamento de eventual variação, os índices balizadores foram reavaliados com os dados brutos das análises composicionais realizadas sobre sedimentos de corrente, através do método XRF, do período de chuvas de 2019, até o período de chuvas de 2022/2023.

A região Montante, não afetada pelo rejeito da barragem, 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 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 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).

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 chuvas e estiagem até o ciclo de chuva 2022-2023, para que se estabeleça 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 P95, onde avaliam-se as características dos sedimentos nos pontos analisados das regiões Montante, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C e tributários do rio Paraopeba. 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) e ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), sendo este o que recebeu a maior carga dos rejeitos da barragem.

Conforme solicitação realizada no Relatório 60612553-ACM-DM-ZZ-RP-PM-0046-2022, foram incluídos no escopo do PME, na versão 26 do plano (VALE, 2023), em 17/02/2023, os pontos de monitoramento PT-59 (ribeirão Ferro-Carvão); PT-60 (córrego Olaria); PT-61 (córrego Laranjeira) e PT-62 (córrego Tijuco). Em conjunto com os pontos PT-10 (ribeirão Samambaia) e PT-47-E (dreno de fundo de barragem), são realizadas análises dos tributários da bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Entretanto, por não haver dados para a maior parte dos pontos para o ciclo sazonal completo de chuva 2022/2023, visto que foram incluídos na malha amostral em fevereiro de 2023, não foram apresentados neste relatório de fechamento de ciclo análise a partir dos indicadores IRS, podendo ser consultadas informações referentes a esses pontos nos relatórios mensais apresentados de março/2023 em diante.

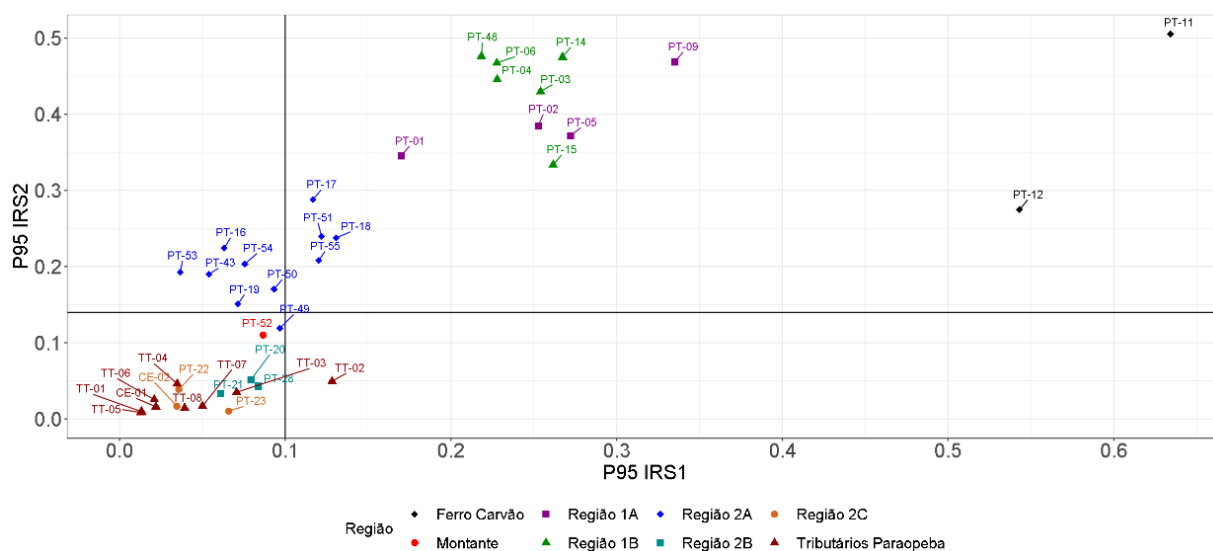
Em relação ao período de chuva de 2019, constatou-se que o ponto de monitoramento na região Montante (PT-52) apresentou característica química de sedimento natural, enquanto no ribeirão Ferro-Carvão, que recebeu a maior carga dos rejeitos da barragem, apresentou índices químicos composicionais maiores, haja vista a ocorrência de Fe e Mn no rejeito, estando inseridos no campo de sedimentos com característica química de rejeitos.

Os dados analíticos das regiões 1A e 1B apresentaram os maiores valores dos índices químicos composicionais, seguido pelos pontos da região 2A, até o PT-55 (km 281 localizado no município de Curvelo). Percebe-se, através da **Figura 13.3.1-1** que os maiores índices da relação de Mn e Fe ocorreram nas regiões mais afetadas pelo rompimento da barragem B1, e galgamento das barragens B4 e B4-A, 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 de rejeitos, 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, entretanto, as características químicas composicionais de rejeito se estenderam até o PT-55 na região 2A, em Curvelo.

Os dados analíticos dos pontos das regiões Montante, 2B e 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.

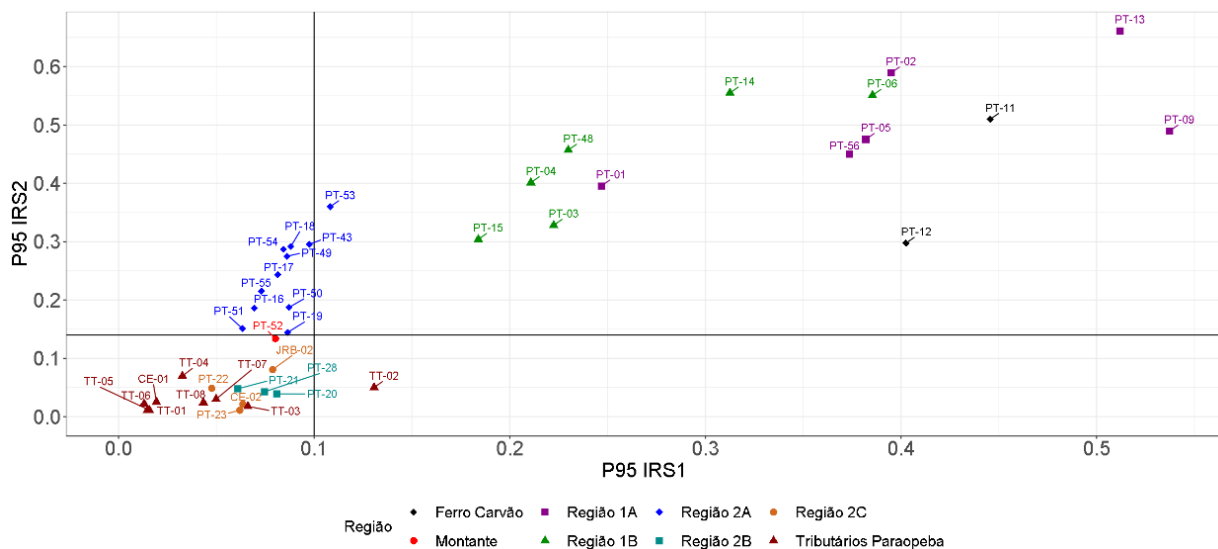
Figura 13.3.1-1 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019



Em relação ao período de estiagem de 2019 (**Figura 13.2.1-2**) constatou-se que, o ponto PT-52 se manteve com característica química de sedimentos naturais, enquanto no ribeirão Ferro-Carvão, os sedimentos apresentaram característica química de rejeitos. Os pontos inseridos nas regiões 1A e 1B mantiveram a característica química composicional de rejeitos, além do PT-53, o primeiro ponto da Região 2A. Na Região 1A, constatou-se maior distribuição dos valores do índice químico do Ferro e do manganês, enquanto na região 1B, os maiores valores ficaram com o IRS2 e houve menor espalhamento para o IRS1. Na região 2A percebeu-se uma migração da maioria dos pontos para o campo com característica composicional em transição. 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.

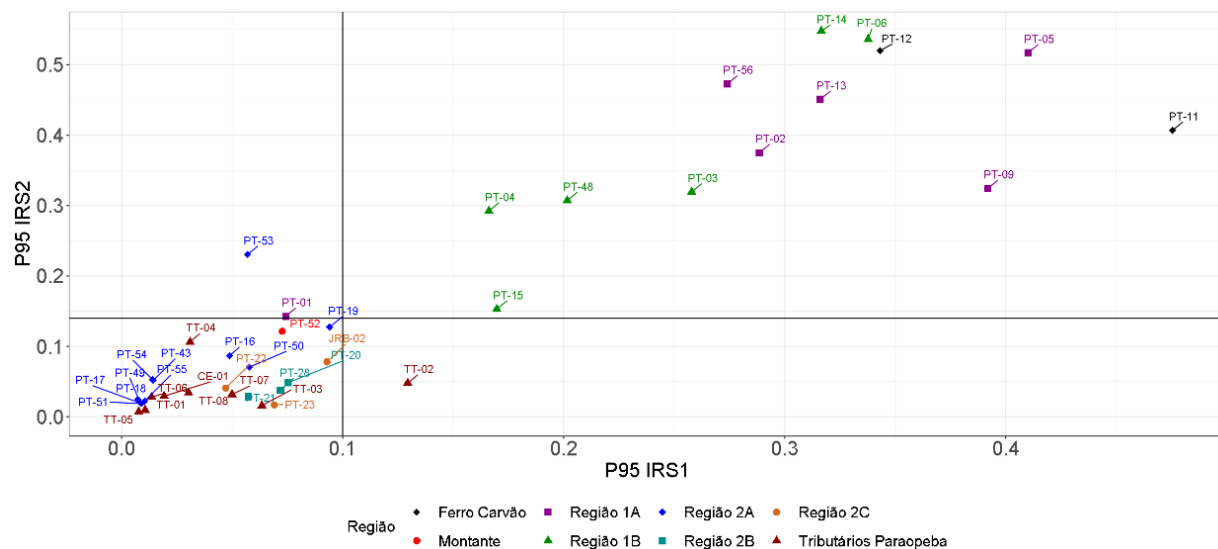
Em relação aos tributários (TT), todos permaneceram com característica química de sedimento natural, exceto o TT-02, no ribeirão Sarzedo, inserido no campo de transição. Este ponto pode apresentar aporte de sedimentos de áreas mais escarpadas, através do transporte e arraste de materiais erodidos/intemperizados, de minério exposto no terminal de carregamento localizado a montante deste ponto, ou de eventuais contribuições de transbordos na planície de inundação do rio.

Figura 13.3.1-2 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2019



No novo ciclo de chuvas que se iniciou em 2019/2020 (**Figura 13.3.1-3**) constatou-se manutenção do ponto PT-52 (Montante) como característica química de sedimentos naturais e os pontos PT-11 e PT-12 como característica química de rejeitos. Houve migração dos índices composicionais das amostras dos sedimentos da região 2A, alterando-se do campo com característica química transicional para o campo com característica química de sedimento natural, com exceção do PT-53, que apresentou característica química transicional para o período, antes interpretado como química de rejeito. Os resultados são coerentes com aqueles apontados por Arcadis (2020c). Os dados indicaram que os sedimentos coletados nas regiões 1A e 1B permaneceram com característica química composicional de rejeitos, sendo que a região 1B indicava IRS1 com valores entre 0,1 e 0,35 e na região 1A, o valor do IRS1 foi maior, até 0,4. Por outro lado, o IRS2 apresentou valores entre 0,15 e 0,6. Similarmente aos demais períodos, as amostras dos sedimentos das regiões montante, 2B e 2C, além dos tributários permaneceram com característica de sedimento natural.

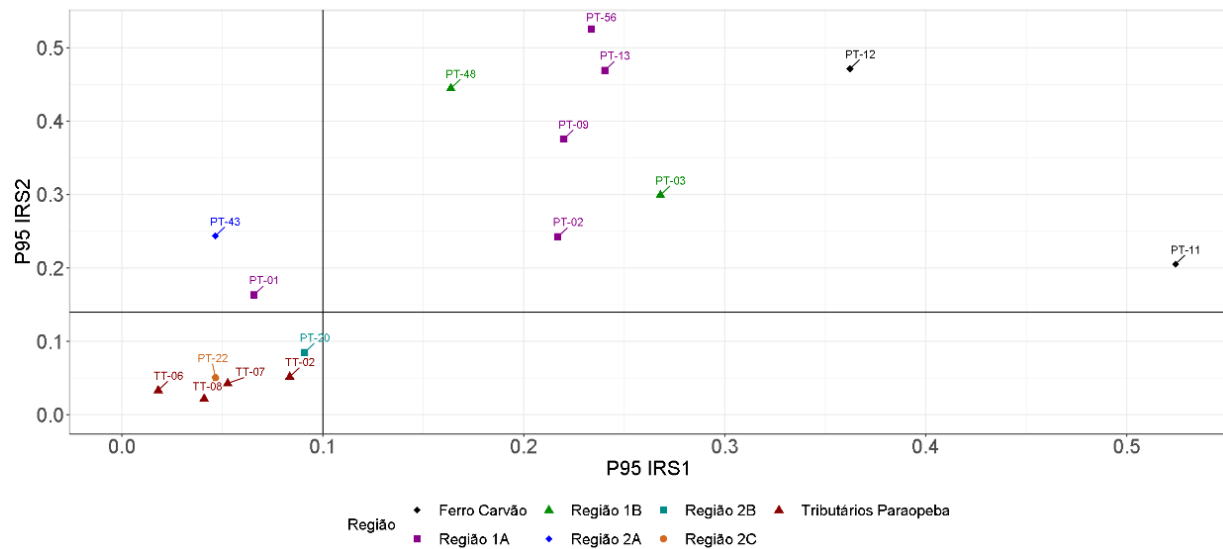
Figura 13.3.1-3 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020



O período de estiagem de 2020 (**Figura 13.3.1-4**) indica que, na região Ferro-Carvão, percebeu-se uma maior dispersão dos resultados sendo a predominância do IRS2 no PT-12 localizado na área de decantação e contenção de sedimentos na cortina metálica (Estaca-Prancha), enquanto no PT-11, a dispersão foi maior para o IRS1.

Nos pontos das regiões 1A e 1B, a característica composicional química dos rejeitos foi mantida. Apenas o ponto PT-01 apresentou assinatura de transição, o que pode estar relacionado a maior mistura com sedimentos naturais. O ponto PT-43, inserido no contexto da Região 2A, apresentou valores IRS1 coerentes com aqueles de sedimentos naturais, mas valores IRS2 apontando para rejeitos. Neste sentido, o PT-43 apresenta uma assinatura de transição possivelmente relacionado a mistura entre sedimentos oriundos dos rejeitos e sedimentos naturais. Isto pode ser compreendido através da dinâmica fluvial sobre o transporte preferencial de finos em suspensão. Além disto, o estudo anterior (Geoenviron, 2019) apontou a elevada presença de Mn nos materiais finos, o que corrobora com esta análise. Neste período, os valores de IRS2 foram menores que no período anterior, e os pontos monitorados mantiveram uma tendência em direção ao campo com características de sedimentos naturais.

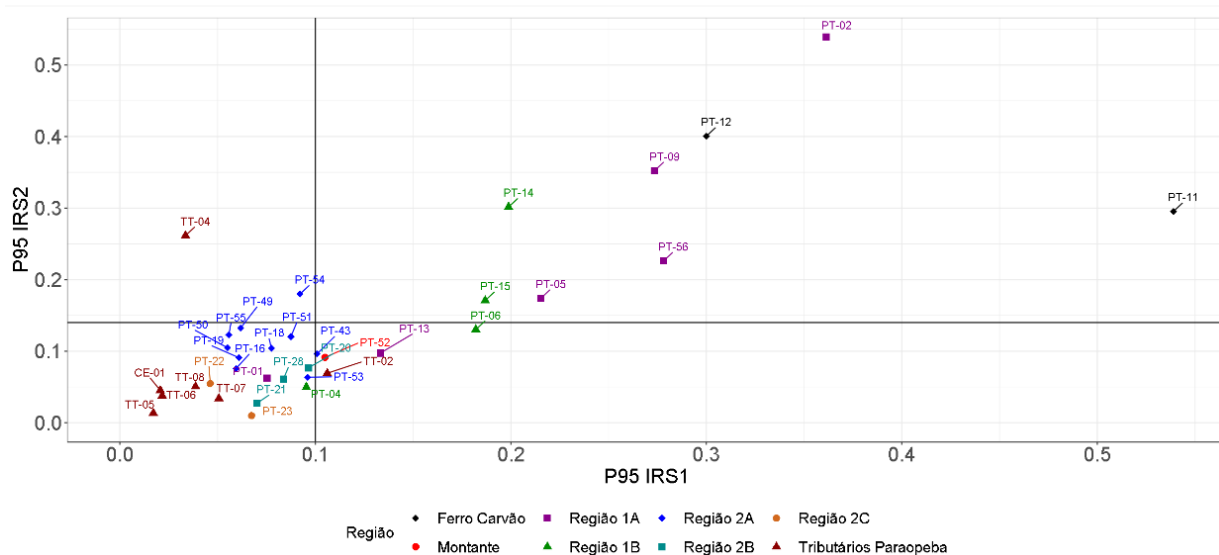
Figura 13.3.1-4 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem de 2020



No período de chuva de 2020/2021, os sedimentos identificados no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) destacam-se por apresentarem maiores valores de IRS1, ficando em um agrupamento que o diferenciou das regiões mais afetadas. Constatou-se neste período a manutenção das características químicas composicionais de rejeito nas regiões 1A e 1B, bem como percebeu-se nítida redução dos índices IRS1 e IRS2, em ambas as regiões, mas principalmente na região 1B, mais afastada da barragem B1 em relação a 1A (**Figura 13.3.1-5**).

Já os sedimentos amostrados na região 2A, apresentaram característica de sedimento natural, muito embora o PT-54 apresentou característica composicional transicional, exibindo valores IRS1 coerentes com aqueles de sedimentos naturais e valores IRS2 apontando para rejeitos. O PT-13 (Região 1A) e PT-06 (Região 1B) também mostraram características transicionais similares. Isto poderia apontar uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais nestes pontos. Semelhante ao período anterior, isto pode ocorrer em função da dinâmica fluvial sobre o transporte preferencial de finos em suspensão. De forma similar, outros pontos relacionados aos tributários e a região Montante também apresentaram assinatura transicional, onde apenas o IRS1 apresentou leve característica de rejeito, relacionado possivelmente a condições da própria bacia ou contribuições difusas durante esse período.

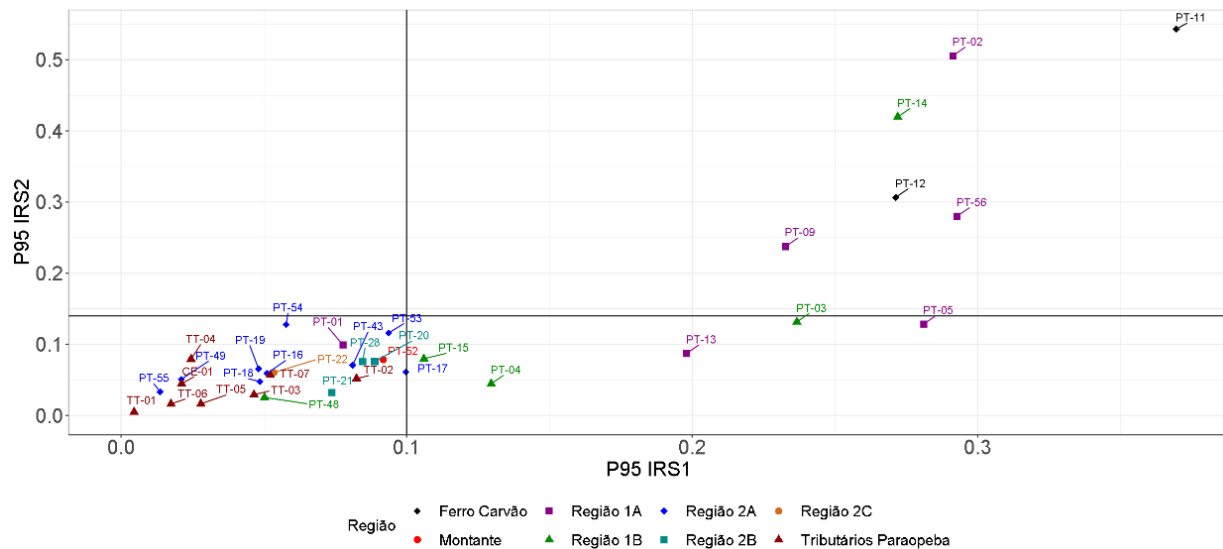
Figura 13.3.1-5 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021



No período de estiagem de 2021 (**Figura 13.3.1-6**) é possível observar que os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão já não se comportaram como um grupo isolado, onde seus valores de IRS1 e IRS2 se assemelharam com os de amostras coletadas na Região 1A. Isto pode apontar uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais nestes pontos, fato identificado nas análises dos testemunhos coletados e analisados em 2020 (Arcadis 2021b), que indicaram mistura de materiais de rejeitos e deposição de sedimentos naturais pós-rompimento. A Região 1A, apesar de continuar com característica química de rejeito também mostra atenuação e migração dos valores em direção ao campo dos sedimentos naturais.

Percebeu-se também redução dos índices IRS1 e IRS2, em ambas as regiões, mas principalmente na Região 1B. O PT-14 foi o que mais se destacou nesta região, mantendo os valores dos índices composicionais entre os mais elevados, enquanto no PT-04 e PT-15, da Região 1B, já se observou migração para o campo de sedimentos com característica de transição. Os pontos inseridos nas regiões 2A, 2B, 2C e Tributários apresentaram característica química de sedimentos naturais.

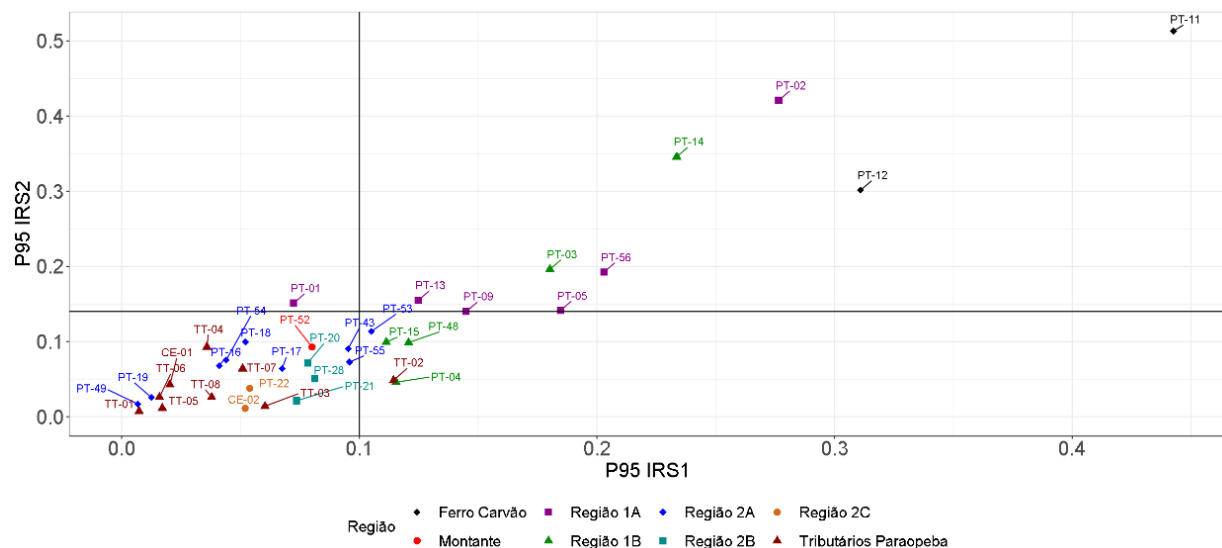
Figura 13.3.1-6 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2021



No período de chuvas de 2021/2022 os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão novamente se destacaram por apresentarem os maiores valores de IRS1 e IRS2. Constatou-se ainda a manutenção das características químicas composicionais de rejeito nas regiões 1A e 1B, bem como percebeu-se variação dos índices IRS1, em ambas as regiões, em que o PT-14 (Região 1B) indicou o limite da posição do sedimento com característica química de rejeitos (**Figura 13.3.1-7**). A região 1B mostrou redução do IRS1 e IRS2, com maioria dos pontos, ainda preservando assinatura química de rejeito, porém mais próximo dos balizadores de sedimentos com característica química natural.

Os sedimentos amostrados na região 2A apresentaram característica de sedimento natural, porém alguns deles como PT-50, apresentou característica composicional transicional, com valor IRS2 coerente com aqueles de sedimentos naturais e valor IRS1 apontando para rejeitos, indicando novamente parcela de finos dos rejeitos misturados aos sedimentos naturais. O PT-53 indicou característica química transicional, enquanto os demais pontos inseridos nas regiões 2A, 2B, 2C e Tributários apresentaram característica química de sedimentos naturais.

Figura 13.3.1-7 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022

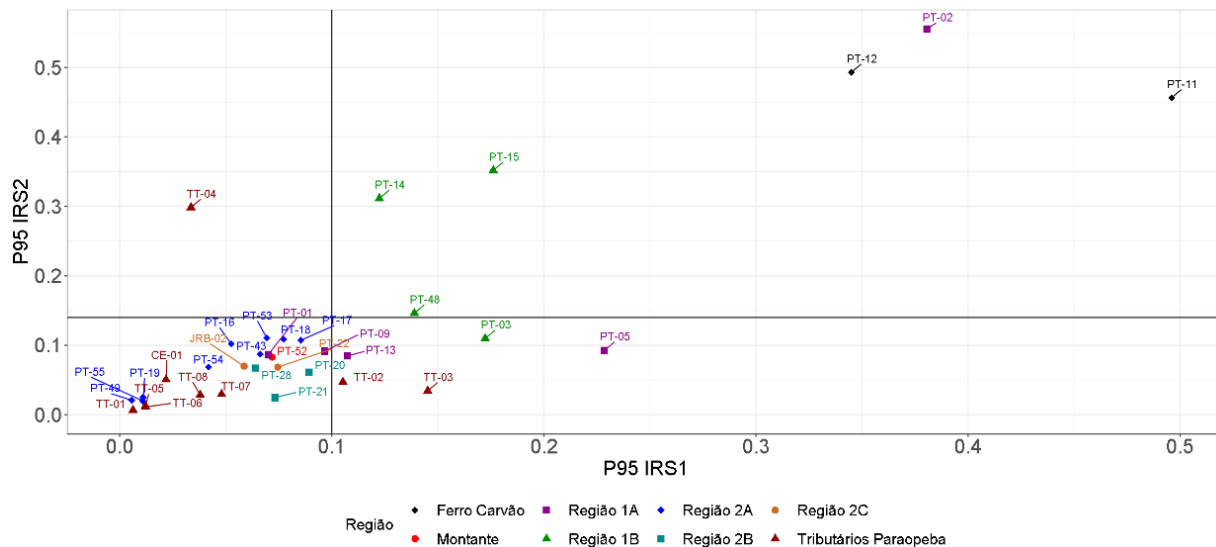


A região Ferro-Carvão, no período de estiagem de 2022 (**Figura 13.3.1-8**), mostrou os maiores valores de IRS1 e IRS2, relacionado principalmente ao maior acúmulo de sedimentos finos na Estaca-Prancha (PT-12), além da influência das precipitações de 2021/2022 e obras do trecho (*chincanas e sumps*). Percebeu-se nova redução dos índices IRS1 e IRS2, principalmente na Região 1A, que tem migrado para o campo com características químicas de sedimentos naturais.

A região 1B mostrou elevação do IRS2, principalmente dos pontos PT-14 e PT-15 (final da região 1B), que voltaram a apresentar características química de rejeitos, como possível reflexo das chuvas intensas de 2021/2022 que afetaram a região e permitiram maior transporte de materiais e erosão de depósitos mais antigos a jusante, indicando reaparecimento do rejeito a jusante da UTE Igarapé.

Alguns pontos dos tributários (TT-02, TT-03 e TT-04) exibiram assinatura de transição entre característica química de rejeito e de sedimento natural. As demais regiões, 2A e 2B e 2C, apresentaram manutenção das assinaturas de sedimentos com característica química natural.

Figura 13.3.1-8 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2022

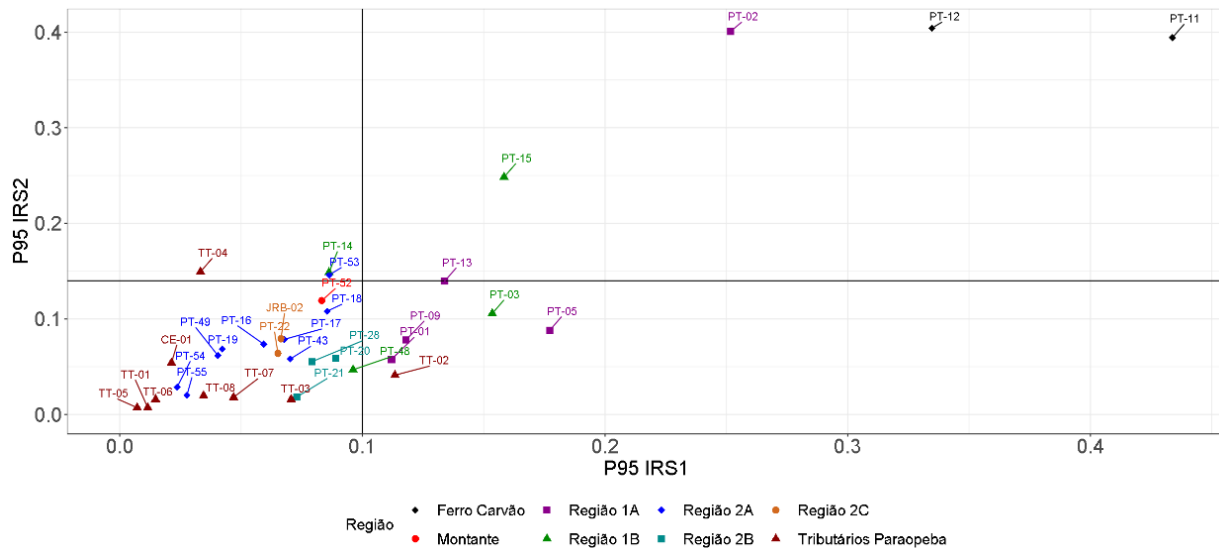


A partir dos dados disponíveis do período de chuva 2022/2023 (**Figura 13.3.1-9**), foi possível observar que os pontos localizados no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), assim como o PT-02 localizado na Região 1A, mantiveram a característica química de rejeito e com elevados valores de IRS1 e IRS2, comportamento histórico observado durante todo o monitoramento. Os demais pontos da Região 1A apresentaram valores de IRS1 acima do balizador, estando inseridos no campo transicional, com o PT-13 apontando estar no limite com o campo de química característica de rejeito. A Região 1B apresenta pontos com característica química de rejeito (PT-15), transicional (PT-14 e PT-03) e natural (PT-48). Na comparação com o período de chuvas anterior (2021/2022), constatou-se mobilização de sedimentos com característica química de rejeitos até o PT-15, cerca de 10,0 km a jusante da UTE Igarapé, haja vista o aumento dois índices composicionais de Fe e Mn identificados nesta localidade. Anteriormente, no período de chuvas 2021/2022 essa distribuição era observada até o PT-14, apenas, o que mostra a característica química dos sedimentos de corrente nesta região específica tem variado, eventualmente em função da dinâmica do rio, que transporta materiais naturais misturados ou não aos sedimentos com rejeitos.

Os pontos das regiões 2A (com exceção do PT-53, próximo ao limite do balizador IRS2, em campo transicional), 2B e 2C mantiveram a característica de sedimentos com composição química natural ao longo dos últimos períodos sazonais. Em relação aos tributários do rio Paraopeba analisados, todos os pontos estão no campo dos sedimentos com característica composicional química natural, com exceção do TT-04 e do TT-02, que apresentaram característica de transição, com valores acima dos balizadores IRS2 e IRS1, respectivamente. O TT-04, inserido no rio Serra Azul, afluente do rio Paraopeba, pode apresentar contribuições, possivelmente naturais, haja vista sua inserção sob rochas do Grupo Nova Lima, além de contribuições difusas dos arredores. O TT-02, 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 dos índices IRS1 e IRS2 nas regiões Montante a 2C no período de chuva de 2022/2023



13.3.2. Avaliação do comportamento químico do rejeito com os índices IRS1 e IRS 2 por ponto de monitoramento

De modo a verificar a evolução dos resultados analíticos, aplicou-se os índices químicos composicionais com os dados brutos, onde avaliam-se as características dos sedimentos em determinados pontos da bacia. O critério de seleção dos pontos foi:

- Máximo de dois pontos de amostragem por região;
- Pontos próximos a algum local relevante do ponto de vista da deposição do rejeito na calha do rio;
- Localização do ponto próximo a algum marco relevante, como antigas captações de água, montante e jusante do barramento da UTE Igarapé e reservatório de Retiro Baixo.

Dessa forma, os pontos selecionados ao longo do rio Paraopeba foram:

- Região 1A:
 - PT-02: localizado próximo à antiga captação da COPASA
- Região 1B:
 - PT-14: proximidade da UTE Igarapé
 - PT-15: jusante da UTE Igarapé
- Região 2A:

- PT-49: proximidades da antiga captação da COPASA
- PT-55: limite da região 2A
- Região 2B:
 - PT-20 e PT-21: entrada e barramento do reservatório da UHE de Retiro Baixo, respectivamente

Nesta avaliação, o produto dos índices (*i.e.*, IRS1xIRS2) foi introduzido como parâmetro adicional de análise, a fim de avaliar seus efeitos conjuntos, ao longo do tempo. O produto entre as 2 variáveis foi utilizado como artifício, uma vez que, conceitualmente, são sinérgicos os efeitos dos índices para a diferenciação entre sedimentos naturais e rejeitos.

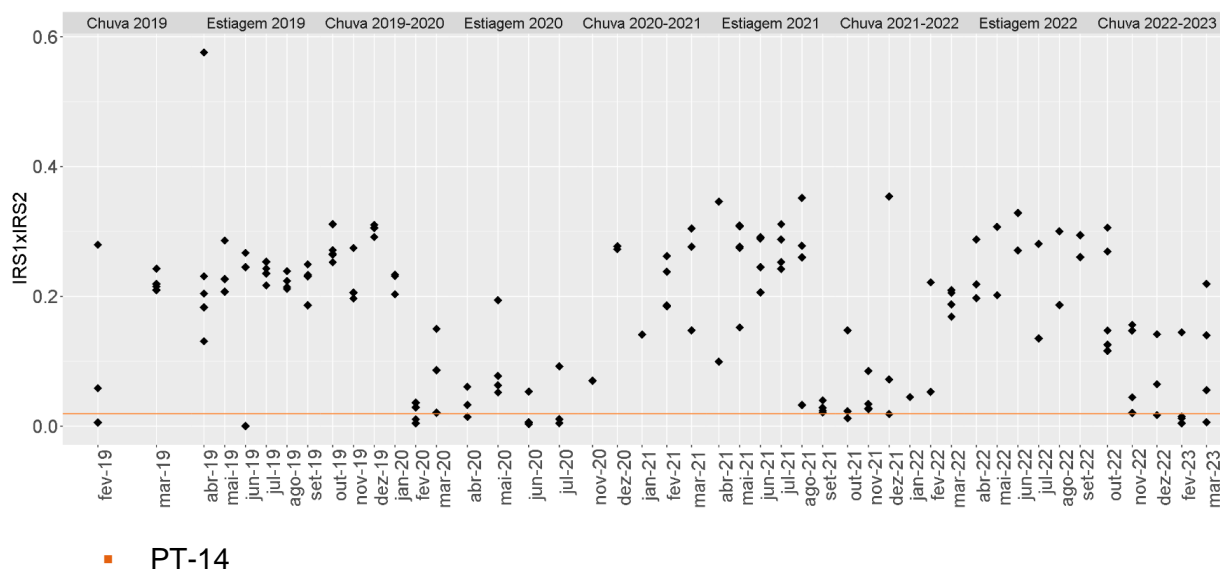
Neste caso, por analogia, os balizadores brutos (IRS1=0,12 / IRS2=0,16) determinados anteriormente foram multiplicados entre si, obtendo-se o valor de 0,0192 (Arcadis, 2020a). Este limite foi aplicado na análise temporal apresentada abaixo.

- PT-02

Para o PT-02, distante cerca de 18 km da barragem B1, quando considerado o produto entre IRS1 e IRS2 ao longo tempo (**Figura 13.3.2-1**), evidenciam-se dois campos composicionais principais, a partir da dispersão dos dados analíticos no diagrama. O primeiro deles correspondeu ao período que engloba chuva/2019 até chuva/2019-2020, até janeiro/2020, para os quais houve uma estabilidade composicional dentro do campo de materiais com características de rejeitos. Entre janeiro e fevereiro de 2020 houve brusca queda composicional, com dados analíticos permanecendo em torno do limite rejeitos/sedimentos naturais, durante esse último mês. A partir de março/2020 até maio/2020, houve tendência de incremento do produto IRS1xIRS2, alcançando, ainda que com grande dispersão dos pontos, níveis de valores equivalentes àqueles do primeiro período avaliado.

De junho/2020 a novembro/2020 houve redução dos valores, em patamar mais próximo ao limite com o limite do balizador. Entre as chuvas de 2020/2021 e a estiagem de 2021, houve predomínio de sedimentos com característica química de rejeitos e a condição se manteve nas chuvas de 2021/2022. Na estiagem de 2022 ocorre nova elevação dos valores de IRS1xIRS2, ao mesmo patamar de valores que o do primeiro período avaliado (2019), com características químicas de rejeitos. No período de chuvas subsequente (2022/2023) observa-se padrão de redução dos valores com distribuição de dados acima e abaixo do limite entre os campos de sedimentos naturais e rejeitos, mas ainda predominando o campo da composição de rejeitos.

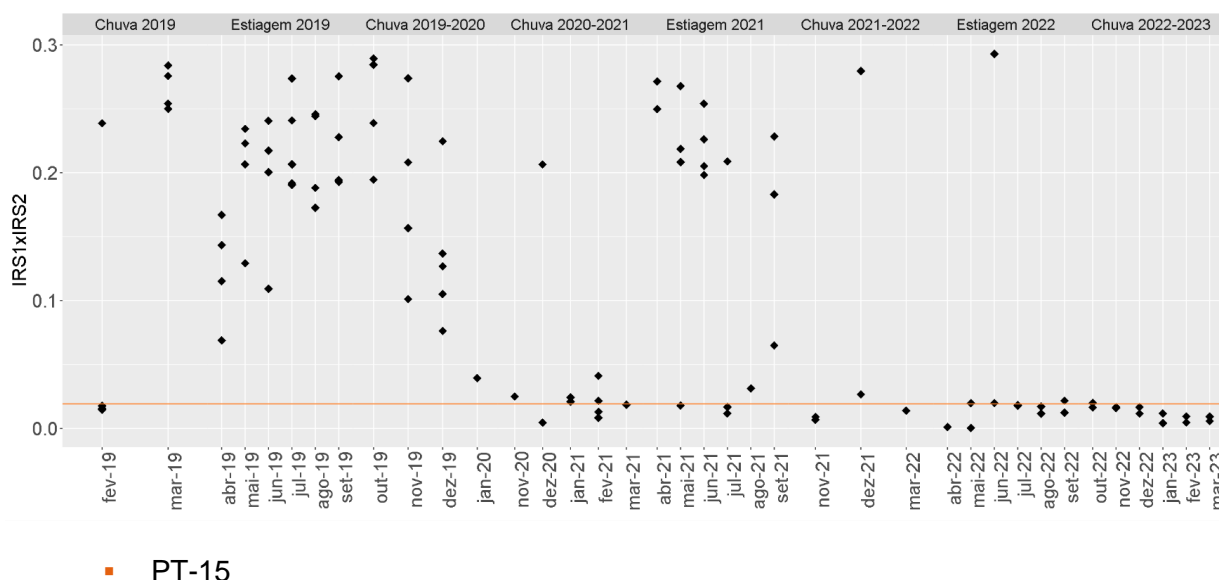
Figura 13.3.2-1 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-02



Inserido no contexto da Região 1B, o PT-14 indicou, essencialmente, predominância de característica química composicional de rejeitos ao longo de todos os períodos sazonais, com valores mais elevados até o período de estiagem/2022. Em geral, o produto IRS1xIRS2 mostrou uma estabilidade da dispersão dos dados, no campo de materiais com características de rejeitos, até o período outubro-novembro de 2019 (**Figura 13.3.2-2**). A partir daí, houve uma tendência de decréscimo dos índices químicos, atingindo o limite rejeitos/sedimentos naturais entre novembro e dezembro de 2020, permanecendo em torno deste limite até março/2021.

Com o retorno da estação de estiagem/2021 constatou-se maior acúmulo de materiais com característica química de rejeitos nesta localidade e repetindo o ciclo, nas chuvas de 2021/2022 e estiagem de 2022 constatou-se nova oscilação nos valores, com característica no limite de transição entre sedimento com característica química natural e de rejeito. O período de chuvas/2022-2023 indicou uma menor distribuição dos dados, com concentração de valores próximos ao limite do balizador, indicando um comportamento transicional para o período.

Figura 13.3.2-2 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-14

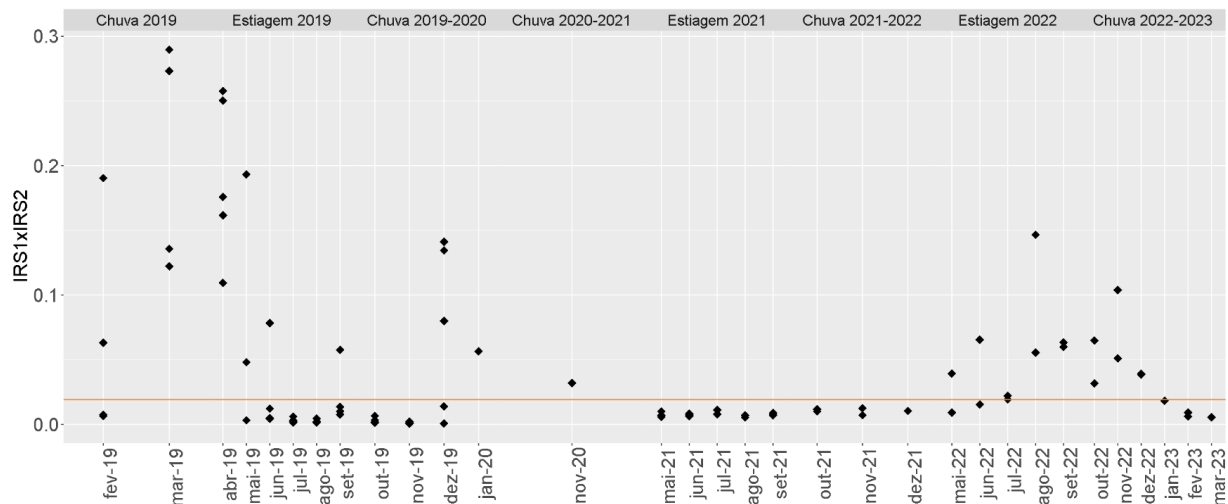


O PT-15 está localizado a jusante do barramento da UTE Igarapé e no limite da região 1B. Durante as chuvas de 2020/2021, este ponto foi amostrado até dezembro/2021. Nos meses subsequentes (até abril/2022) houve dificuldade de acesso ao ponto por conta de alagamentos e condições inseguras para a coleta do sedimento. A estiagem de 2022 apresentou normalidade na amostragem, com dados a partir de maio, até setembro de 2022. O período de chuvas 2022-2023 apresenta dados cobrindo todo o ciclo sazonal.

Entre fevereiro e abril de 2019, a dispersão dos dados no diagrama permitiu sugerir uma tendência de incremento dos valores, para o campo dos materiais com características de rejeitos (**Figura 13.3.2-3**). Entre abril e junho do mesmo ano (2019), a tendência se inverteu, e os pontos passaram a apresentar valores de materiais com características de sedimentos naturais. Este padrão se manteve até dezembro/2019, que apresentou incremento de valores para o campo de rejeitos, seguido de nova tendência de queda em janeiro/2020.

Entre fevereiro e setembro de 2020 não há resultados disponíveis, porém em novembro/2020 percebeu-se que o produto IRS1xIRS2 mantinha a característica química de rejeito para os sedimentos locais. Os resultados disponíveis já tangenciavam o limite de transição para os sedimentos naturais e a partir de maio/2021, até dezembro/2021, os resultados indicavam regressão dos materiais com característica química de rejeito na localidade. A partir de maio/2022, no período de estiagem/2022, o produto IRS1xIRS2 voltou a evidenciar assinatura de rejeito, com progressão de valores até agosto/2022. Esse comportamento se mantém até dezembro/2022, no período de chuva 2022-2023. A partir de janeiro/2023 observa-se uma redução progressiva dos valores, ficando dentro do limite do campo de sedimentos naturais.

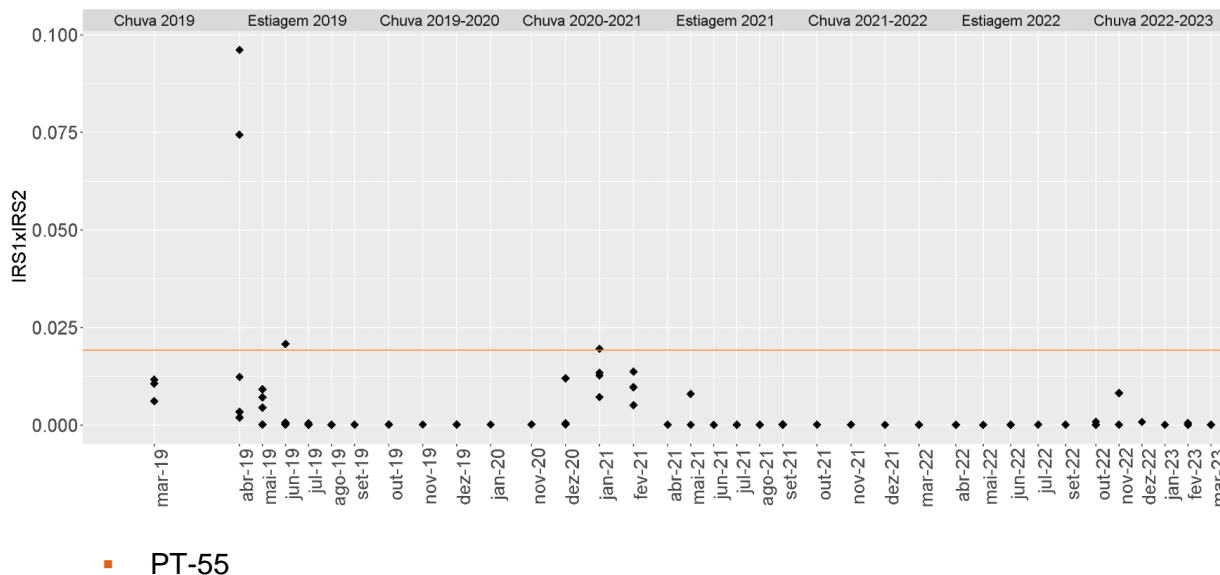
Figura 13.3.2-3 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-15



■ PT-49

O ponto PT-49, inserido no contexto da Região 2A, indicou característica química composicional predominantemente de sedimentos naturais, ao longo de todo período avaliado. Na avaliação do parâmetro IRS1xIRS2 (**Figura 13.3.2-4**) constatou-se que somente entre fevereiro e abril de 2019, houve tendência de incremento de valores, indicando materiais com características de característica química de rejeitos da barragem B1. Nos ciclos seguintes todos os resultados apontaram para a presença de materiais com características de sedimentos naturais, apenas indicando uma variação nos valores nos períodos de chuvas 2020-2021 e 2022-2023. A partir destes resultados, presume-se que, durante as chuvas de 2019, houve transporte e deposição de materiais finos no PT 49, com características químicas de rejeitos. Estas teriam se modificado nos períodos sucessivos, passando à característica químicas de sedimentos naturais já na estiagem de 2019, corroborando com a hipótese de dissipações de fluxos de cargas de materiais em suspensão, ainda em 2019. A característica química no PT-49 se manteve desde então como de sedimentos naturais.

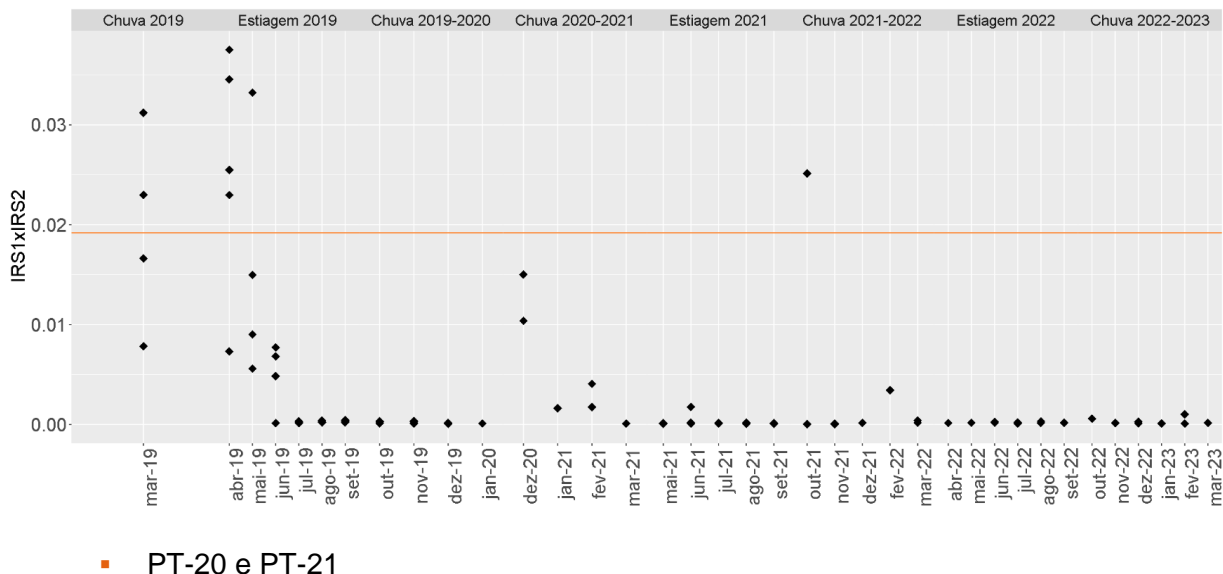
Figura 13.3.2-4 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-49



A partir da dispersão dos resultados no PT-55 no diagrama IRS1xIRS2 (**Figura 13.3.2-5**), verificou-se que os períodos de chuvas de 2019 e estiagem de 2019 (maio), se enquadraram no campo de materiais com características de rejeitos. A partir de junho/2019 é possível observar comportamento de sedimentos com característica natural. Cabe destacar que um dos valores obtidos em outubro/2021 mostrou uma amostra anômala com característica química de rejeito, mas sem continuidade até o final das chuvas/2022. Isto pode ser relacionado com alguma variação local, não relacionada ao rejeito das barragens B1, B4, B4A, haja vista que em pontos a montante não se evidenciou variação nos pontos monitorados.

Importante lembrar que o período de estiagem de 2020 não foi incluído nestes gráficos, haja vista a suspensão da coleta para análises composicionais através da técnica XRF, em meados do período chuvoso de 2019/2020, com subsequente retomada analítica no período das chuvas de 2020/2021 até a estiagem/2021. No ciclo sazonal de chuva 2022-2023 o padrão de materiais com química característica de sedimentos naturais se mantém, no mesmo patamar dos períodos anteriores de chuva e estiagem.

Figura 13.3.2-5 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-55



Os pontos PT-20 e PT 21 estão localizados, respectivamente na entrada do reservatório da UHE Retiro Baixo e no próprio reservatório. O diagrama dos produtos IRS1xIRS2 (**Figura 13.3.2-6** e **Figura 13.3.2-7**) indicaram materiais com característica química de sedimentos naturais durante todo o período monitorado até março/2023.

Figura 13.3.2-7 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-20.

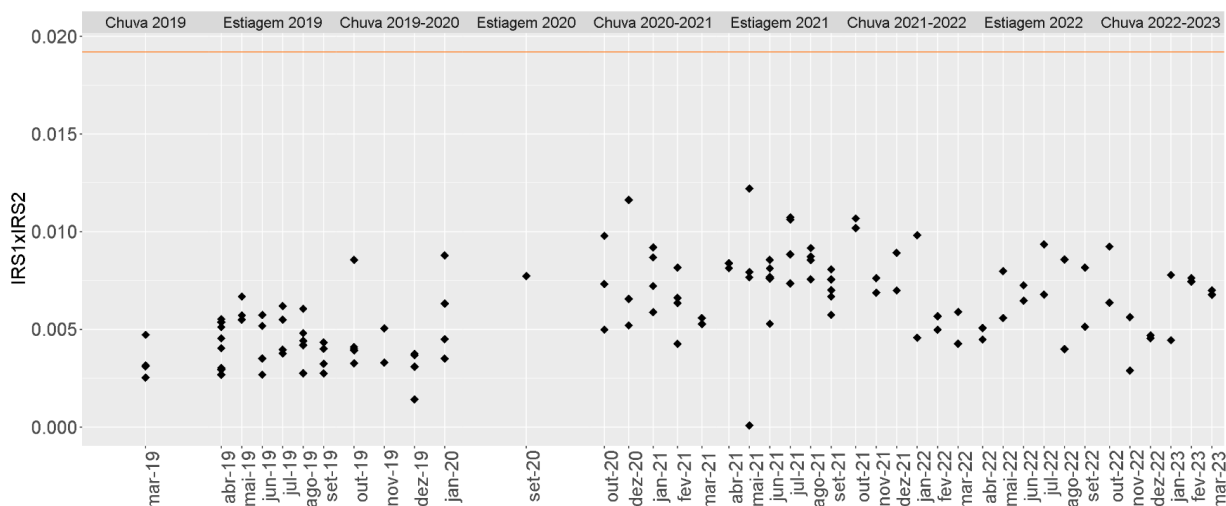
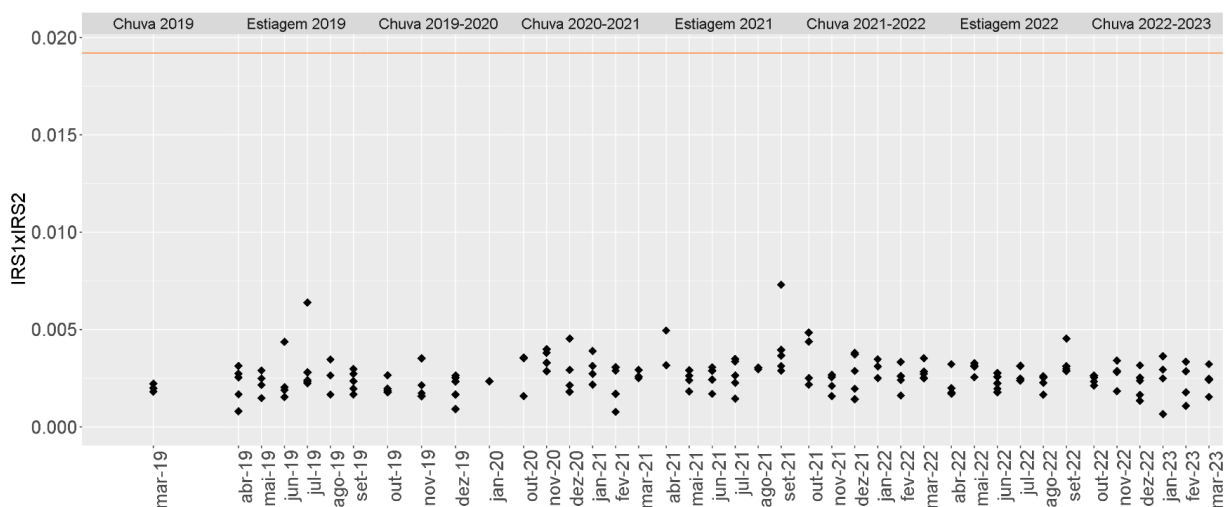


Figura 13.3.2-8 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2023 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-21.



13.4. Considerações

A partir da análise dos diagramas apresentados, constatou-se que:

- Os índices químicos composicionais (IRS1 e IRS2) permitiram identificar a variação composicional dos sedimentos com característica de rejeitos ou de sedimentos naturais, ao longo dos ciclos hidrológicos avaliados.
- Os valores obtidos para os índices químicos composicionais permitiram mostrar que as regiões 1A e 1B continuam apresentando, em geral, características químicas composicionais de rejeitos desde o período chuvoso de 2019 até a chuva de 2022-2023,

onde ocorre uma distribuição espacial até o ponto de monitoramento PT-15, localizado no fim da região 1B. Ainda ambas as regiões já sinalizam pontos que tendem a apresentar características químicas de sedimentos naturais.

- Nas chuvas de 2019, na Região 2A, os índices químicos composicionais indicaram a presença de sedimentos com características químicas de rejeitos até o ponto PT-55, localizado no km 281 em relação a barragem B1.
- Os períodos de estiagem 2021 e chuva 2021-2022 indicam comportamento de sedimentos com química característica de rejeitos no PT-14 (Região 1B), enquanto, na estiagem 2022 e chuva 2022-2023, esse comportamento se entende até o PT-15, no final da Região 1B. Nos demais locais, a jusante do PT-15, já na região 2A, a característica química permaneceu como de sedimentos natural e não se alterou até a chuva de 2022-2023.
- Nos pontos de monitoramento PT-20 e PT-21 localizados, respectivamente, na entrada e no barramento da UHE de Retiro Baixo, os dados avaliados apresentaram plenas características de sedimentos naturais desde o período chuvoso de 2019.
- É válido ainda reiterar que, ao contrário do que foi verificado nas regiões 1A e 1B, as características químicas de rejeitos indicadas dizem respeito principalmente ao índice IRS2, que relaciona teores composicionais de Mn, contra teores de outros componentes minoritários (i.e., Ca, Mg, Ti e Na). Como na composição original dos rejeitos da barragem B1, o Mn se encontrava predominantemente associado às partículas finas (Geoviron, 2019), os resultados dão sentido à hipótese formulada (ARCADIS, 2020a), segundo a qual a presença dos rejeitos estaria relacionada ao transporte e deposição de partículas em suspensão, na região 2A, e não às massas brutas do rejeito, como um todo, como ocorreria na região 1A e 1B.
- Com exceção do ribeirão Ferro-Carvão, os demais tributários da bacia do rio Paraopeba avaliados apresentaram características químicas de sedimentos naturais, com baixo índice composicional de Mn e Fe, indicando que eles não contribuíram para variação dos índices no rio Paraopeba. Há exceções identificadas no TT-02 e TT-04, inseridos em campo de transição. 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. Já o TT-04, inserido no rio Serra Azul, afluente do rio Paraopeba, pode apresentar contribuições, possivelmente naturais, haja vista sua inserção sob rochas do Grupo Nova Lima, além de contribuições difusas dos arredores.

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 das chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023, e avaliar se tais variações identificadas no período recente encontram-se correlacionadas nos mesmos trechos e/ou se estes trechos continuam afetados pelo rejeito das barragens B1, 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 apresentam 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 das barragens B1, B4 e B4A. 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, 2022).

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 Cádmiu, 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 Cádmiu, além de Turbidez e Sólidos Totais (**Gráficos 14.3-2**).

Esta exposição tem 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). A distância entre os pontos pode ser vista no diagrama unifilar apresentado na caracterização da área de estudo encontrada no **Anexo II**.

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, simplificadamente, avaliar o quanto os valores de cada ponto/região estão acima dos valores médios da bacia, considerando cada parâmetros e período sazonal.

Nesse sentido, o fato de porções da curva de tendência apresentarem valores positivos (até +1) ou negativos (até -1) indica que, dentre a 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.

Para os sedimentos, a análise dos parâmetros foi realizada de forma unificada para os diferentes períodos sazonais de chuva (2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023). 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, Cádmiu, 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 chuva 2019, sendo possível identificar que as regiões 1B e a transição entre 2A e 2B apresentam predominância de sedimentos de menor granulometria (silte e argila), relacionados a locais de barramento com retenção e deposição de materiais finos, como 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 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, tendo as demais regiões aspecto similar e bastante próximo da região Montante. Nesse sentido, observou-se que, após o rompimento, os rejeitos das barragens foram transportados como carga de fundo, principalmente até a região 1B, onde foram barrados e depositados próximos ao PT-14. ARCADIS (2021b, 2020c) também indicaram interpretação similar. Pontos a jusante apresentaram dinâmica mais característica da bacia, com menor influência do rompimento, até o limite da região 2B, região também de barramento hidráulico.

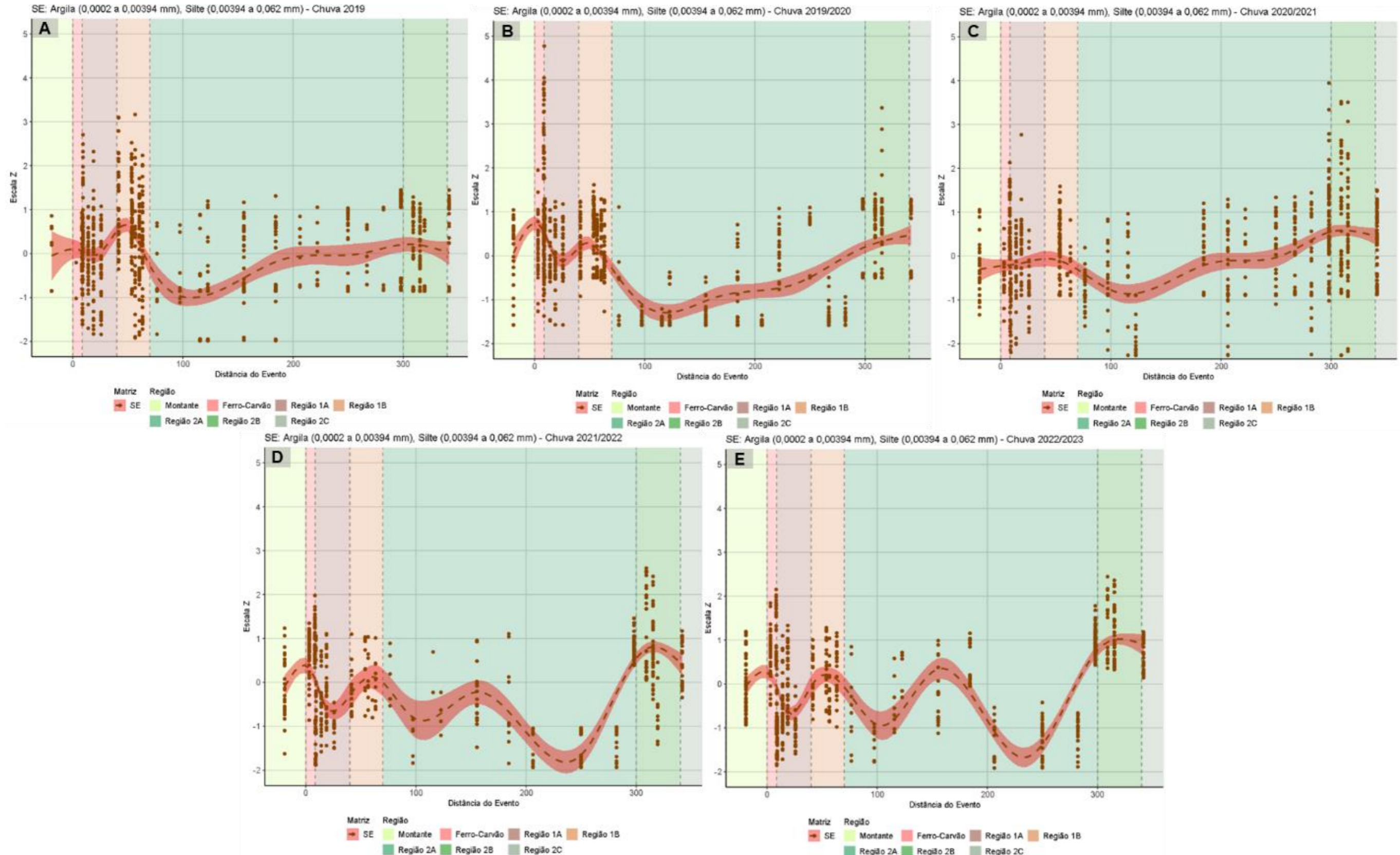
A chuva 2019/2020 (**Gráfico 14.3-1B**) apresentou aspecto similar, com surgimento de elevação de valores principalmente na região Ferro-Carvão. A elevação na região Ferro-Carvão deveu-se, principalmente, pela construção do reservatório Alberto Flores, com estrutura de retenção Estaca-Prancha, com retenção 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 na região 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, indicado pelos valores mais elevados, e que foi seguida pelas regiões 1B (PT-14) e 2B (PT-20).

Já o período de chuva 2020/2021 (**Gráfico 14.3-1C**), marcado por menores períodos pluviométricos, registrou comportamento diferente dos períodos anteriores, com menor oscilação granulométrica entre as regiões e menores valores. A curva de tendência sugeriu um leve pico na região 1B, da mesma forma que nos períodos anteriores, com concentrações similares aos demais períodos. As demais regiões também apresentaram comportamento similar. A diferença consistiu no fato da região Ferro-Carvão não apresentar o pico característico na curva de tendência igual ao do período sazonal anterior. De maneira geral, a presença de sedimentos finos foi menor que o histórico (com valores em escala Z, oscilando entre -2 até 2), o que sugere uma maior oscilação dos valores em relação à média. E, neste sentido, a curva modelo de tendência não apresentou o aumento característico que se esperaria, dado o contexto de acúmulo de material. Dessa forma, o menor aporte e transporte de sedimentos finos para a bacia deste período poderiam justificar a oscilação na presença de silte e argila e até ausência de um pico característico para esta região. Este aspecto de oscilação nos valores de silte e argila também foram observados nas demais regiões (Montante, 2A e 2B).

Já os dois últimos períodos sazonais avaliados, chuva 2021/2022 (**Gráfico 14.3-1D**) e chuva 2022/2023 (**Gráfico 14.3-1E**), apresentaram comportamento similar entre si, mas um pouco diferente do histórico. O comportamento semelhante relaciona-se principalmente aos ciclos de precipitações similares nos dois períodos e característicos de um período mais chuvoso. 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 picos negativo (-1) e positivo (+1), respectivamente, relacionado aos pontos de onde há acúmulo de material. Já a região 2B manteve valores mais elevados relacionados ao acúmulo de sedimentos no reservatório. 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 2021/2022, com maior dispersão nos depósitos de silte/argila. Enquanto na chuva 2022/2023, 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 chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 ou mudanças nos locais de amostragens 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. Somente as regiões 1B e 2B mostraram elevação das concentrações com bastante dispersão dos dados, relacionado ao contexto de acúmulo de sedimentos em reservatório. 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. Enquanto 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.

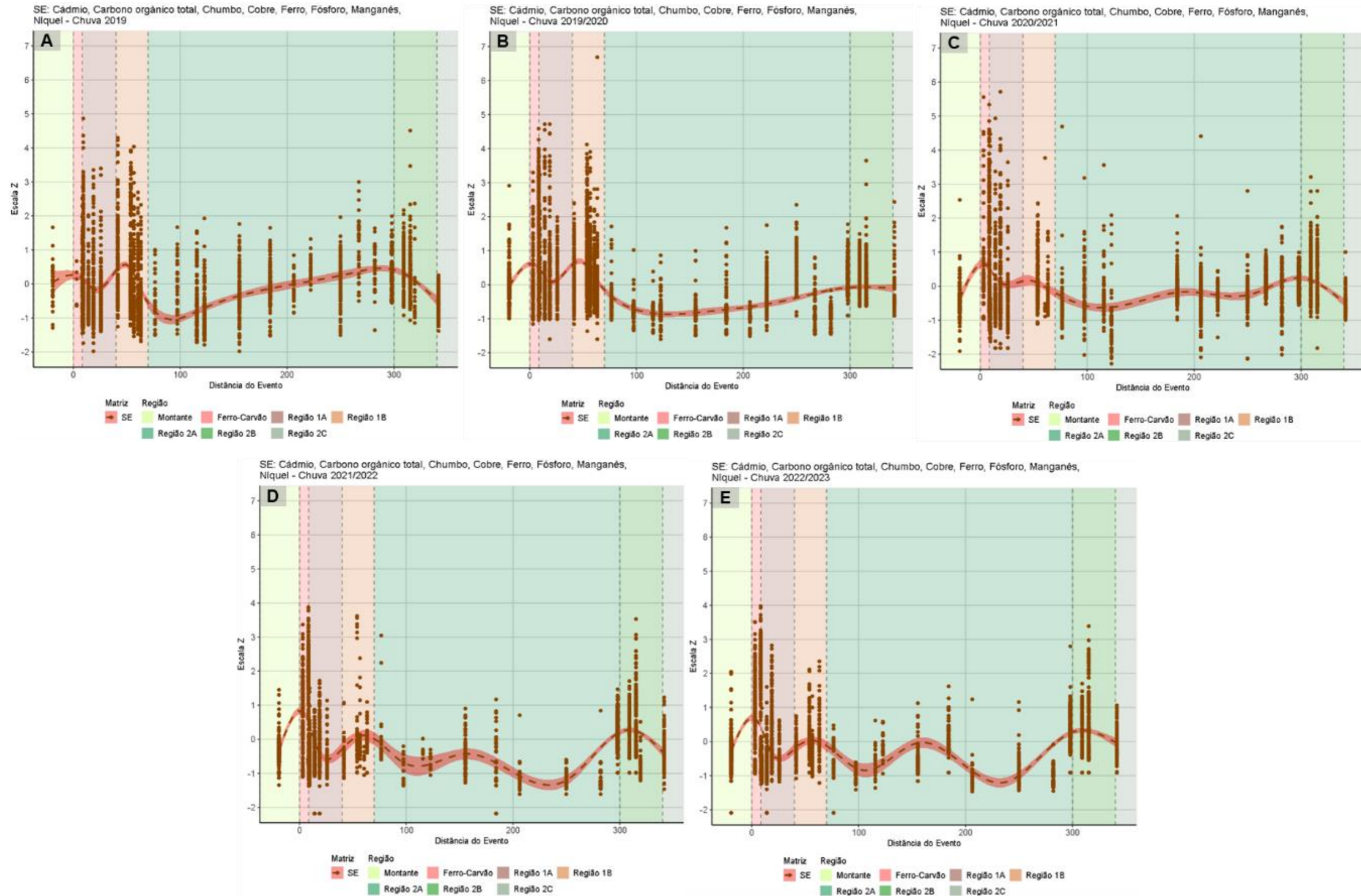
O **Gráfico 14.3-2B** destacou-se pelo surgimento de um pico na curva de tendência na região Ferro-Carvão, relacionado à construção do reservatório Alberto Flores e seu represamento de materiais. Mostrou ainda que as maiores concentrações continuaram relacionadas aos trechos de Ferro-Carvão até 1B, principalmente 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 (chuva 2020/2021), indicado no **Gráfico 14.3-2C**, evidenciou, de maneira geral, uma curva de tendência com pico bem-marcado na região Ferro-Carvão, seguido de um comportamento mais homogêneo para as demais regiões. As regiões 1B e 2B apresentaram pico mais discreto, mais próximos das regiões montante, 2A e 2C, apesar de apresentarem grande dispersão dos dados. Comportamentos estes, relacionado principalmente 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 as chuvas de 2021/2022 e 2022/2023 apresentaram condições hidráulicas, sedimentológicas e de concentração de metais similares. Em ambos os períodos, as chuvas foram intensas e capazes de transportar e erodir materiais ao longo do rio. Nesse sentido, a região Ferro-Carvão apresentou concentrações mais elevadas, com pico na curva suavizada e

alta frequência de dados elevados (até cerca de +4), sugerindo importante contribuição dos rejeitos no trecho. Importante considerar que esta é uma região em reparação, o que favorece o maior transporte de material e mobilidade elementar em períodos de chuva. As regiões 1B e 2B também apresentaram picos menos acentuados como vinha sendo visto em 2020/2021, relacionados a pontos de acúmulo de materiais, porém que indicaram maiores concentrações de metais nestas regiões quando comparadas com as demais (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, por isso os valores mais amenos de metais, enquanto na região 2B, os valores elevados relacionam-se ao fato deste ser um importante trecho de acúmulo de metais, presente no rio ao longo do tempo. A maior diferença entre os dois últimos períodos sazonais centra-se no comportamento da região 2A, onde a chuva 2022/2023 apresentou aspecto mais acentuado dos picos, relacionado principalmente ao comportamento granulométrico dos pontos avaliados.

Gráfico 14.3-2 Distribuição de metais nos sedimentos do rio Paraopeba (até região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 chuva (2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023), 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 chuva 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.

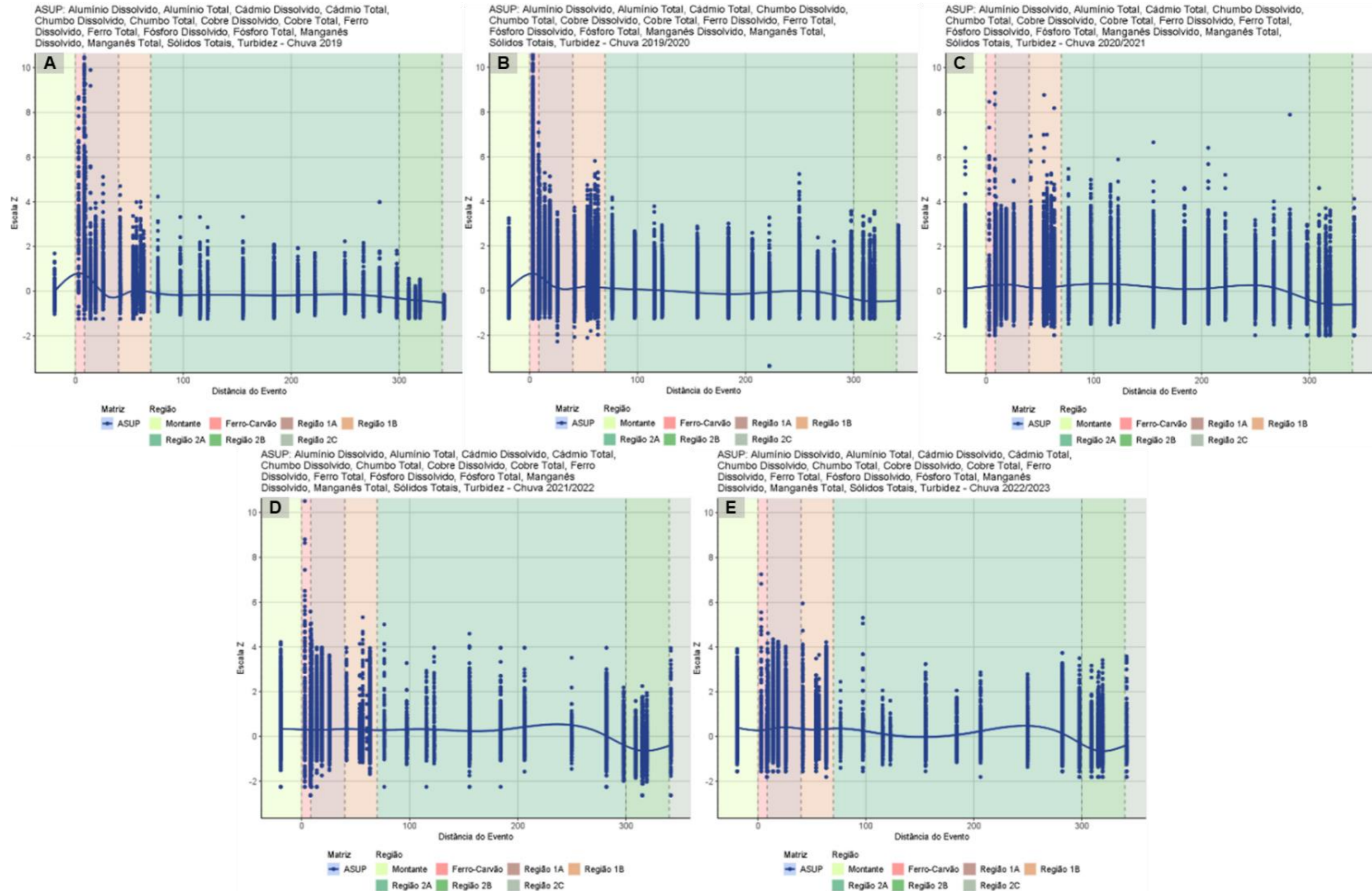
De forma similar, a chuva 2019/2020 (**Gráfico 14.3-3B**) também apresentou comportamento heterogêneo, com pico na curva modelo na região Ferro-Carvão, com maiores valores pontuais, seguido de padrão mais retilíneo até o limite com a região 2B, que mostrou redução. A região 1B apesar de apresentar valores pontuais elevados, mostrou frequência de dados menores, indicados por leve oscilação positiva na curva suavizada. A região Montante também apresentou aumento, o que indica uma maior oscilação na bacia dos parâmetros avaliados em decorrência da influência das precipitações. Em comparação com o período anterior, observou-se manutenção de altas concentrações 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 chuva 2020/2021 (**Gráfico 14.3-3C**), observou-se redução das concentrações pontuais nas regiões 1A, 1B e, especialmente, na região Ferro Carvão. A região Montante destacou-se pelo aumento dos valores pontuais, o que indicou um aumento na bacia das concentrações dos parâmetros avaliados. Isso poderia estar relacionado ao aumento dos valores pontuais 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, chuva 2021/2022 (**Gráfico 14.3-3D**) e chuva 2022/2023 (**Gráfico 15.3-3E**), foram identificadas tendência similares para as curvas alisadas, com aspecto mais retilíneo ao longo da bacia e redução no reservatório de UHE Retiro Baixo (2B). Esse padrão indica uma redução da influência do rejeito ou diluição ao longo da bacia, dada a influência de grandes precipitações nestes períodos e dispersão de valores nos trechos impactados. A presença de valores mais elevados, inclusive parecidos aos do período de rompimento (até +10) nas regiões Ferro-Carvão (trecho em reparação), 1A e 1B pode estar relacionada ao aumento do escoamento superficial, bem como das vazões e níveis das drenagens da região, que favoreceram a suspensão e disponibilização de materiais para a água. A região Montante, da mesma forma, manteve valores altos (até +4), o que indicou que a oscilação nos parâmetros avaliados se relacionou, também, a um comportamento bacinal. O fato da curva modelo da chuva 2022/2023 ter apresentado oscilações um pouco maiores que a da chuva 2021/2022, está relacionado possivelmente a influência das precipitações, cujos efeitos no transporte de material podem ter reverberado no decorrer do tempo, com maior influência na qualidade da água em algumas regiões nos períodos posteriores.

Gráfico 14.3-3 Distribuição de metais na água superficial do rio Paraopeba (até região 2C) ao longo dos diferentes períodos sazonais de chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 e 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 reservatório da Estaca-Prancha, no ribeirão Ferro-Carvão. Da mesma forma, a barragem da UTE Igarapé acumulou sedimentos e rejeitos com o tempo. O **Gráfico 14.3-4** indica 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, conforme pontos onde há acúmulo de sedimentos finos e, por consequência de metais, com aumento até a região de reservatório 2B.

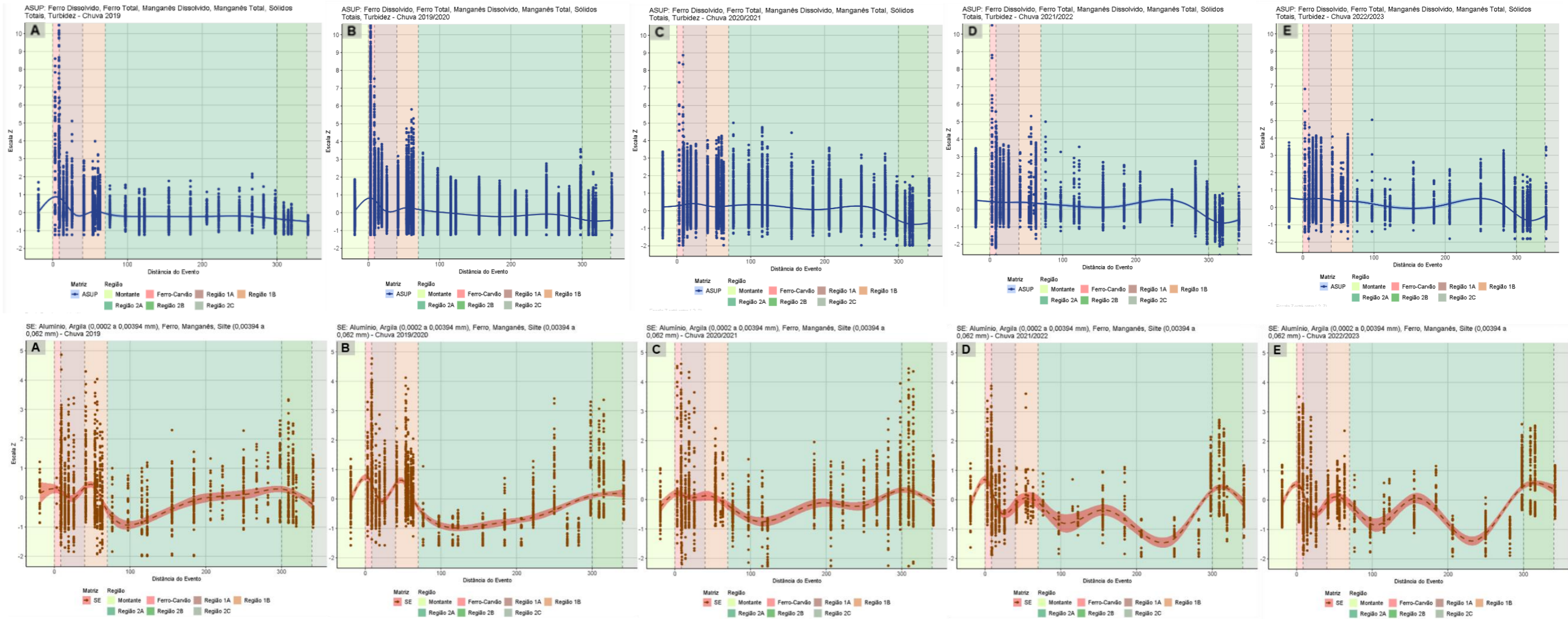
É importante considerar nesta análise o efeito da sazonalidade, no caso das precipitações. Enquanto o período de chuvas é o que mais agrega concentrações de materiais em suspensão na água, refletidas em suas frações totais, decorrentes de ressuspensão de materiais depositados na bacia, escoamentos superficiais 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), as 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 chuva 2022/2023, 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 chuva 2020/2021, 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 (2022/2023), 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 chuva: 2019 (A), 2019/2020 (B), 2020/2021 (C), 2021/2022 (D) e 2022/2023 (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 chuva 2022/2023, notou-se, de modo geral, que há uma manutenção nos padrões de distribuição espacial dos parâmetros, com leve incremento, relacionado às chuvas mais intensas e duradouras de 2021/2022.

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 2. 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 de 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 de 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, B4, 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 chuva/2019, até a chuva 2022/2023, 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 chuva 2022/2023, constatou-se que os sedimentos com característica química de rejeitos se estenderam 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). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>. Acesso em: 24 abr. 2023a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 25 abr. 2023b.

AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish journal of emergency medicine**, v. 18, n. 3, p. 91–93. 2018.

ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. Interpretação de dados de prospecção geoquímica com o auxílio de estatística. 2010.

ARCADIS. **Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno. PMQS – Três Marias**. Abril/2023. 2023.

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 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.

CALLEGARI-JACQUES, SÍDIA M. **Bioestatística:** princípios e aplicações. 1 ed. Porto Alegre: Artmed. 264 p. 2003.

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**, v. 45 (2018): e0707.

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.

CHRISTOFARO, C.& LEÃO, M. M. D. Tratamento de dados censurados em estudos ambientais. **Química Nova**, vol. 37, n. 1, p.104-110. (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. **Caracterização Geoquímica de Rejeitos Fase I – Composição Química Global, Análise Granulométrica e Classificação segundo a Norma NBR ABNT 10.004/200**.

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, 2020 - *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. 2020. *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 2021 – 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.

IGAM 2021a – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Nota Técnica nº 20/IGAM/GEMOQ/2021*. PROCESSO Nº 2090.01.0002169/2019-08. 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, 1952, p. 583–621.

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. 2022.

R CORE TEAM. **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R.G.; DUTTER, R. Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with r. Chichester: Wiley .2008. 362 p.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, p. 1379-1389. 1968.

SILVA, R.M.; SANTOS, C. A.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; SILVA, V. C.; MEDEIROS, I. C. **Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin.** Natural Hazards, 77, 1205-1221. 2015.

TEC3 – Geotecnia e Recursos Hídricos. **Estudo conceitual mina córrego do Feijão – Caracterização hidrológica da bacia do rio Paraopeba.** Relatório Técnico. 2019.

TRINDADE, Ana Laura Cerqueira. Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio São Francisco. 2013.

TUKEY, J. W. Exploratory Data Analysis. Reading (MA): Addison Wesley, 1977.

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, p. 377-392. 1922.